

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la Recherche Scientifique

Université Abderrahmane Mira

Faculté de la Technologie



Département d'Automatique, Télécommunication et d'Electronique

Projet de Fin d'Etudes

Pour l'obtention du diplôme de Master

Filière : Automatique

Spécialité : Automatique et informatique industrielle

Thème

Conception d'une commande MPPT-Floue type TSK appliquée à un système photovoltaïque

Préparé par :

Mr. FETTIOUEN Yacine

Mr. BOUSEKINE Ouahmed Riad

Dirigé par :

Mr. F. YAHIAOUI

Mr. L. BRIKH

Examiné par :

Mr. BELKAID

Mr. AISSOU

Année universitaire : 2021/2022

REMERCIEMENTS

*Avant tout, Nous remercions **Dieu** le tout puissant de nous avoir donnés la force
d'atteindre notre but*

*Nous voudrions tout d'abord adresser toute notre reconnaissance aux directeurs de
ce mémoire, Monsieur F.YAHIAOUI et Monsieur L.BERIKH, pour leur patience,
leur disponibilité et surtout leurs judicieux conseils, qui ont contribué à alimenter
notre réflexion.*

*Nos remerciements vont également à messieurs les jurys qui nous ont fait
l'honneur d'accepter de juger notre modeste travail.*

Un grand merci à tous ceux qui ont contribué dans la réalisation de ce travail.

DEDICACES

Nous dédions ce travail à :

A nos chers parents, pour tous leurs sacrifices, leur amour, leur tendresse, leur soutien et leurs prières tout au long de nos études.

A nos familles et amis(es), et à tous qui nous sont chers.

Yacine & Riad

NOMENCLATURE

NOMENCLATURE

G: ensoleillement dans le plan des panneaux (W/m²)

W_c: Watt crête

kW_c : kilowatt crête

GW_c : gigawatt crête

P_{max}: Puissance maximale au point de fonctionnement (W)

I_D : Courant de jonction (A)

I_L : Courant photo-génère par la cellule photovoltaïque sous éclairage donné (A)

I₀ : Courant de saturation de la diode ou courant à l'obscurité (A)

R_S: Résistance série de la cellule photovoltaïque (Ω)

R_{sh} : Résistance parallèle ou shunt (Ω)

m : Coefficient d'idéalité de la cellule photovoltaïque

k : Constante de Boltzmann (1,38*10⁻²³ J/K)

T : Température de la cellule (K)

T_a : température ambiante (°C)

L : inductance

Noct : Condition de température nominale de fonctionnement de la cellule (45°C)

EG : irradiation solaire

I_{cc} : Courant de court-circuit (A)

V_{CO} : Tension à circuit ouvert (V)

η_c : Rendement d'une cellule

P_s : La puissance maximale mesurée dans les conditions STC

I_{\max} : Courant au point de puissance maximale de la cellule photovoltaïque (A)

V_{\max} : Tension au point de puissance maximale de la cellule photovoltaïque (V)

S : Surface totale de la cellule photovoltaïque (m^2)

ff : facteur de forme (fill factor)

n_s : nombre de cellule en série

n_p : nombre de branche en parallèle

q : la charge de l'électron (coulomb)

M(D) : rapport de conversion

Hz : Hertz

V : volt

I : Tension

m^2 : mètre carré

A & B : Ensembles flous

$\mu_A(x)$: fonctions d'appartenance de l'ensemble A

$\mu_B(x)$: fonctions d'appartenance de l'ensemble B

E : l'erreur du contrôleur floue

ΔE : la variation de l'erreur du contrôleur floue

T_x : une valeur linguistique

ABBREVIATIONS

ABREVIATIONS

PV : photovoltaïque

GPV : générateur photovoltaïque

CPV : Cellule photovoltaïque

FL : fuzzy logic (Logique floue)

FLC : fuzzy logic controller

TSK : Takagi Sugeno Kang

MPPT : maximum power point tracking

MPP: point de puissance maximale

KWc: kilowatt crête

MWc : megawatt crête

GWc : gigawatt crête

DC/DC : Continue/Continue

DC/AC : Continue/Alternatif

STC : standard test condition (conditions de tests standard)

CS : convertisseur statique

P&O : perturbation and observation (perturbation et observation)

IncCond : Incrément de conductance

PSO : particle swarm optimization

PSO-FL : particle swarm optimization in fuzzy logic

NG : Négatif Grand ; P : Négatif Petit

PP : Positif Petit ; PG: Positif Grand

ZE : Zéro

LISTE DES TABLEAUX

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I. 1 : Etude comparative pour les cellules cristallines.[5].....12

Tableau I. 2: Caractéristiques électriques du panneau BP SX150-S.....16

Tableau III. 1 : table de Macvicar.51

LISTE DES FIGURES

LISTE DES FIGURES

CHAPITRE I : SYSTEME DE CONVERSION D'ENERGIE PHOTOVOLTAÏQUE AUTONOME.

Figure I. 1 : Installation d'un système autonome (hors-réseau).	6
Figure I. 2 : Système de Pompage PV.....	7
Figure I. 3 : Système autonome avec stockage en batteries.	7
Figure I. 4 : Système raccordé au réseau.....	9
Figure I. 5 : Installation photovoltaïque hybride en site isolé.	10
Figure I. 6 : Schéma de fonctionnement d'une installation photovoltaïque.....	10
Figure I. 7 : Les principaux types de cellules.	12
Figure I. 8 : Circuit électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque (Modèle à une diode).....	13
Figure I. 9 : Caractéristique de la tension en fonction du courant $I(V)$ d'une cellule PV.....	17
Figure I. 10 : Caractéristique de la tension en fonction de la puissance $P(V)$ d'une cellule PV.....	17
Figure I. 11 : Les différentes zones de caractéristique $I(V)$ d'un générateur photovoltaïque.	18
Figure I. 12 : Influence de l'éclairement sur la caractéristique $I=f(V)$	19
Figure I. 13 : Influence de l'éclairement sur la caractéristique $P=f(V)$	19
Figure I. 14 : Influence de la température sur la caractéristique $I=f(V)$	20
Figure I. 15 : Influence de la température sur la caractéristique $P=f(V)$	20
Figure I. 16 : Schéma d'un convertisseur élévateur (BOOST).....	21
Figure I. 17 : Tensions et courants d'entrée et de sortie en D et Ts pour un Boost.....	21
Figure I. 18 : Schéma de principe du convertisseur MPPT.....	23

CHAPITRE II :NOTIONS DE BASE SUR LA COMMANDE MPPT FLOUE TYPE TSK

Figure II. 1 : Illustration qui démontre la différence entre la logique flou et la logique classique.	27
Figure II. 2: Représentation de la température d'un corps par les ensembles classiques et Flous.	28
Figure II. 3: Différents types de fonctions d'appartenance utilisées.	29
Figure II. 4: Variables linguistiques.....	30
Figure II. 5 :Exemples d'opérations sur des ensembles flous.	31
Figure II. 6 : Structure interne d'un système flou.....	35
Figure II. 7 : Fonction d'appartenance.....	37
Figure II. 8 : Fonction caractéristique.....	37
Figure II. 9 : Les différentes formes des fonctions d'appartenances.	38
Figure II. 10 Opérateur NON	39
Figure II. 11 Opérateur ET.....	39

LISTES DES FIGURES

Figure II. 12 : Opérateur OU.	40
Figure II. 13 : Opérateur ET réalisé par la fonction produit.....	41
Figure II. 14 : Opérateur OU réalisé par la fonction de la somme.	41
Figure II. 15 Opérateur ET flou réaliser par la relation II.21	42
Figure II. 16 Opérateur OU flou réalisé par la relation II.22	43
Figure II. 17 : Opérateur min-max réalisé par la relation II.23.	43

CHAPITRE III : TESTS ET SIMULATIONS

Figure III. 1 : Schéma bloc du système globale sous Simulink.....	47
Figure III. 2 : membership functions (E).....	50
Figure III. 3 : membership functions (DE).....	50
Figure III. 4 : évolution de la puissance sous les conditions STC.....	53
Figure III. 5 : évolution de la tension sous les conditions STC.....	54
Figure III. 6 : évolution du courant sous les conditions STC.....	54
Figure III. 7 : Profile d'ensoleillement variable.	55
Figure III. 8 : évolution de la puissance sous des ensoleillements variables.	56
Figure III. 9 : évolution de la tension sous des ensoleillements variables.	56
Figure III. 10 : évolution du courant sous des ensoleillements variables.	57
Figure III. 11 : Profile de températures variables.	57
Figure III. 12 : évolution de la puissance sous des températures variables.	58
Figure III. 13 : évolution de la tension sous des températures variables.	58
Figure III. 14 : évolution du courant sous des températures variables.	59

TABLE DES MATIERES

TABLE DES MATIERES

Nomenclature

Liste des abréviations

Liste des tableaux

Liste des figures

Introduction générale

CHAPITRE I : SYSTEMES DE CONVERSION D'ENERGIE PHOTOVOLTAÏQUES AUTONOME.

CHAPITRE I	4
I.1 Introduction	5
I.2 Systèmes de conversion d'énergie photovoltaïques	5
I.2.1 Système PV autonome	5
I.2.1.1 Système autonome sans stockage électrochimique de l'électricité (au fil du soleil).....	6
I.2.1.2 Système autonome avec stockage électrochimique de l'électricité	7
I.2.2 Système à injection au réseau (raccordé au réseau)	8
I.2.3 Système hybride	9
I.3 Principe de fonctionnement d'une installation photovoltaïque	10
I.4 Panneau photovoltaïque	11
I.4.1 Définition d'une cellule photovoltaïque.....	11
I.4.2 Types de cellules photovoltaïques	11
I.5 Modélisation mathématique du panneau photovoltaïque	12
I.5.1 Modèle et circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque.....	12
I.5.2 Paramètre des cellules photovoltaïques	14
I.5.3 Courant de court-circuit ICC	14
I.5.4 Tension à circuit ouvert VCO	15
I.5.5 Puissance maximale.....	15
I.5.6 Rendement d'une cellule	15
I.5.7 Facteur de remplissage	16
I.6 Caractéristiques électriques du panneau photovoltaïque.....	16
I.7 Simulation du panneau dans les conditions STC (Standard Test Conditions).....	17

TABLE DES MATIERES

I.7.1	Simulation sur l'influence de l'ensoleillement.....	18
I.7.2	Simulation sur l'influence de la température	20
I.8	Convertisseur de puissance élévateur (BOOST).....	21
I.9	Principe de la MPPT.....	22
I.10	Conclusion.....	24
CHAPITRE II :NOTIONS DE BASE SUR LA COMMANDE MPPT FLOUE TYPE TSK.		
CHAPITRE II		25
II.1	Introduction	26
II.2	Définition de la logique floue	26
II.3	Comparaison entre la logique classique et la logique flou	27
II.4	Ensemble floue	28
II.5	Univers du discours	29
II.6	Variables linguistiques	30
II.7	Operateurs floues.....	30
II.8	Règles floues	32
II.9	Modèle flou TSK.....	32
II.10	Construction d'un modèle flou TSK.....	34
II.11	Structure interne d'un système floue	35
II.11.1	La base de connaissance	36
II.11.2	La fuzzification.....	36
II.11.3	Moteur d'inférence	36
II.11.4	Les fonctions d'appartenances	36
II.11.5	Les opérateurs de la logique flous.....	38
II.11.6	Défuzzification	44
II.12	Conclusion.....	45
CHAPITRE III : TESTS ET SIMULATIONS.		
CHAPITRE III.....		46
III.1	Introduction	47
III.2	Schéma bloc du système PV autonome	47
III.3	Dimensionnement du contrôleur MPPT-TSK.....	48
III.3.1	Variables du contrôleur flou MPPT-TSK	48
III.3.2	Univers de discours.....	49
III.3.3	La fuzzification.....	49
III.3.4	Base de règles	51

TABLE DES MATIERES

III.3.5	Déffuzification.....	52
III.4	Test et simulation	53
III.4.1	Simulation sous les conditions STC.....	53
III.4.2	Simulation du fonctionnement sous des conditions atmosphériques variables.....	55
III.4.2.1	Simulation sous des ensoleillements variables	55
III.4.2.2	Simulation sous des températures variables	57
III.5	Conclusion.....	59
	CONCLUSION GENERALE	61

BIBLIOGRAPHIE.

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale

L'énergie solaire est la fraction extraite par des cellules photosensibles, de l'énergie électromagnétique qui provient du soleil sous forme de rayonnement. C'est une des énergies renouvelables les plus utilisées. Elle consiste à convertir, grâce à l'effet photovoltaïque, le rayonnement électromagnétique en électricité. Ce processus de conversion est à la fois accessible, rentable et non polluant à l'environnement. On parle alors d'énergie propre.

Le monde d'aujourd'hui voit le développement rapide de l'industrie, ceci nous convertit à être plus dépendant de l'énergie. L'industrie des cellules solaires font actuellement l'objet de multiples recherches dans le but de réaliser des panneaux avec le meilleur rapport rendement / prix.

Selon les caractéristiques électriques des cellules photovoltaïques et de leur association, le rendement des systèmes PV peut être amélioré par des méthodes dit techniques de Poursuite du Point de Puissance Maximale (MPPT).

Dans la plupart des systèmes de conversion des énergies PV, il existe un algorithme particulier nommé « Maximum Power Point Tracking ». Cette technique, comme son nom l'indique, permet de tirer le maximum de puissance que le panneau est apte à fournir. La puissance recherchée dépend généralement du changement de conditions climatiques telles que le rayonnement solaire et la température. Par conséquent, la technique MPPT, destinée à contrôler le rapport cyclique du convertisseur DC-DC, est nécessaire pour le fonctionnement optimal du système PV dans différentes conditions d'exploitation.

L'augmentation du coût des énergies classiques d'une part, et la limitation de leurs ressources d'autre part, font que l'énergie photovoltaïque devient de plus en plus une solution parmi les options énergétiques prometteuses avec des avantages comme l'abondance, l'absence de toute pollution et la disponibilité en plus ou moins grandes quantités en tout point du globe terrestre. Actuellement, on assiste à un regain d'intérêt pour les installations utilisant l'énergie solaire, surtout pour les applications sur des sites isolés.

L'objectif de notre travail est la conception d'une commande MPPT floue type TSK appliquée à un système photovoltaïque.

Historique

Le terme « photovoltaïque » désigne le processus physique qui consiste à transformer l'énergie lumineuse en énergie électrique par le transfert de l'énergie des photons aux électrons d'un matériau. Le principe photovoltaïque a été découvert par le physicien français A. Becquerel en 1839 et expliqué par Albert Einstein en 1905 (c'est pour cette explication qu'il a reçu le prix Nobel de Physique en 1921). Ce principe repose sur la technologie des semi-conducteurs. Il consiste à utiliser les photons pour libérer les électrons et créer une différence de potentiel entre les bornes de la cellule qui génère un courant électrique continu.

Le préfixe Photo vient du grec « phos » qui signifie lumière. « Volt » vient du patronyme d'Alessandro Volta (1745-1827), physicien qui a contribué aux recherches sur l'électricité. Photovoltaïque (PV) signifie donc littéralement électricité lumineuse.

L'hélio électricité est apparue en 1930 avec les cellules à oxyde cuivreux puis au sélénium. Mais ce n'est qu'en 1954, avec la réalisation des premières cellules photovoltaïques au silicium dans les laboratoires de la compagnie Bell Téléphone, que l'on entrevoit la possibilité de fournir de l'énergie.

Très rapidement utilisées pour l'alimentation des véhicules spatiaux vers les années 60 avec l'équipement de satellites spatiaux. Puis à partir de 1970, les premières utilisations terrestres ont concerné l'électrification des sites isolés.

Au cours des années 80, la technologie photovoltaïque terrestre a progressé régulièrement par la mise en place de plusieurs centrales de quelques mégawatts, et est même devenue familière des consommateurs à travers de nombreux produits de faible puissance y faisant appel : montres, calculatrices, balises radio et météorologiques, pompes et réfrigérateurs solaires.

Le progrès des techniques de production de cellules photovoltaïques ainsi que l'augmentation des volumes de production ont entraîné, à partir des années 1990, une baisse des prix. La production de modules se fait en Chine (près de 60 % de la production totale), au Japon, aux EU, en Allemagne et en Europe, avec en particulier des grandes compagnies comme *Yingli Green Energy*, *First Solar* et *Suntech Power*. La production mondiale de modules photovoltaïques est passée de 5 MWc en 1982 à plus de 18GWc en 2013.

Concernant l'Algérie, le groupe algérien Condor Electronics, s'est lancé en juillet 2013 dans la production des panneaux photovoltaïques dont la puissance varie entre 70 W et 285 W et à des prix compétitifs.

CHAPITRE I

**SYSTEME DE CONVERSION D'ENERGIE
PHOTOVOLTAÏQUE AUTONOME.**

I.1 Introduction

L'augmentation du coût des énergies classiques d'une part, et la limitation de leurs ressources d'autre part, font que l'énergie photovoltaïque devient de plus en plus une solution parmi les options énergétiques prometteuses avec des avantages comme l'abondance, l'absence de toute pollution et la disponibilité en plus ou moins grandes quantités en tout point du globe terrestre. Actuellement, on assiste à un regain d'intérêt pour les installations utilisant l'énergie solaire, surtout pour les applications sur des sites isolés.

La conversion photovoltaïque est l'un des modes les plus intéressants d'utilisation de l'énergie solaire. Elle permet d'obtenir de l'électricité de façon directe et autonome à l'aide d'un matériel fiable et de durée de vie relativement élevée, permettant une maintenance réduite.

Le but d'un système photovoltaïque (PV) autonome est d'utiliser la conversion directe de l'énergie solaire par effet photovoltaïque pour subvenir aux besoins en énergie électrique de l'utilisation. [1]

I.2 Systèmes de conversion d'énergie photovoltaïques

On distingue trois types de systèmes photovoltaïques :

- Système photovoltaïques autonome. (Avec & sans stockage)
- Système à injection au réseau. (connecté au réseau)
- Système Hybride.

I.2.1 Système PV autonome

Le système PV autonome est un système complètement indépendant d'autres sources d'énergie et qui alimente l'utilisateur en électricité sans être connecté au réseau électrique (Figure I.1). Dans la majorité des cas, un système autonome exigera des batteries ou autres moyens de stockage pour une utilisation durant les périodes de la non disponibilité de l'énergie solaire (par exemple les périodes nocturnes, les périodes non ensoleillées).

Les systèmes PV autonomes servent habituellement à alimenter les maisons en site isolé, en îles, en montagne ainsi qu'à des applications comme la surveillance à distance et le pompage de l'eau (dans certains cas).

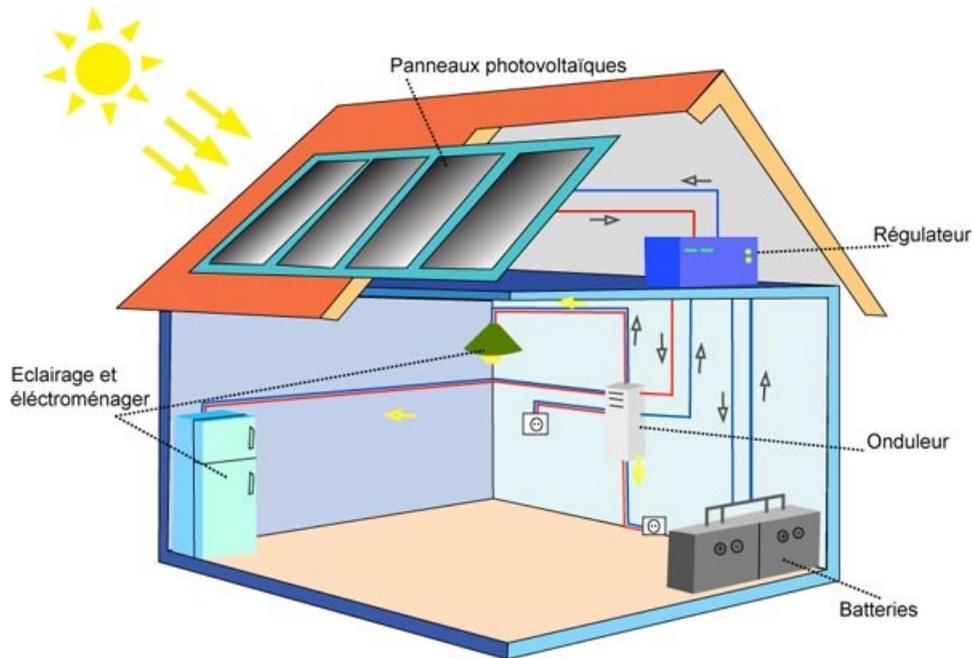


Figure I. 1 : Installation d'un système autonome (hors-réseau).

En règle générale, les systèmes PV autonomes sont installés là où ils constituent la source d'énergie électrique la plus économique. À l'heure actuelle, c'est dans les endroits isolés, loin d'un réseau électrique et où les besoins en énergie sont relativement faibles (généralement moins de 10 kWc) que l'énergie photovoltaïque est la plus concurrentielle.

I.2.1.1 Système autonome sans stockage électrochimique de l'électricité (au fil du soleil)

Les systèmes au fil du soleil sont des systèmes sans stockage électrochimique de l'électricité. Ils exploitent directement l'énergie solaire sans aucune source d'appoint. Ces systèmes sont classés, selon la nature de la charge à alimenter, en deux types systèmes à courant continu et systèmes à courant alternatif.

L'application la plus connue est le pompage photovoltaïque avec ses deux types : systèmes de pompage PV à courant continu et systèmes à courant alternatif. Pour le deuxième cas on doit ajouter un onduleur. La Figure.I.2 montre un exemple d'un système de pompage PV où le conditionneur d'énergie peut être, selon la fonction exigée, un convertisseur DC/DC, un convertisseur DC/AC ou les deux en même temps. Ces systèmes sont simples mais leur inconvénient est la coupure de l'alimentation en absence du soleil. Ces systèmes utilisent, en général, un autre moyen de stockage tel que les réservoirs d'eau pour le pompage PV.

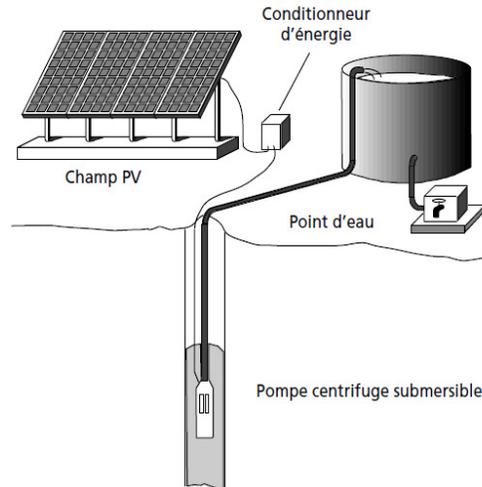


Figure I. 2 : Système de Pompage PV.

I.2.1.2 Système autonome avec stockage électrochimique de l'électricité

Les systèmes avec stockage sont des systèmes qui contiennent des moyens de stockage. Un système de stockage sert à alimenter les charges durant les périodes ayant un ensoleillement faible (passage des nuages) ou une absence totale de l'ensoleillement (les nuits).

Le système de stockage sert à emmagasiné l'énergie durant la présence de l'excès d'énergie photovoltaïque et de la restituer durant les autres périodes d'insuffisance d'énergie. Comme exemple, on peut citer l'alimentation des maisons en électricité dans des sites isolés.

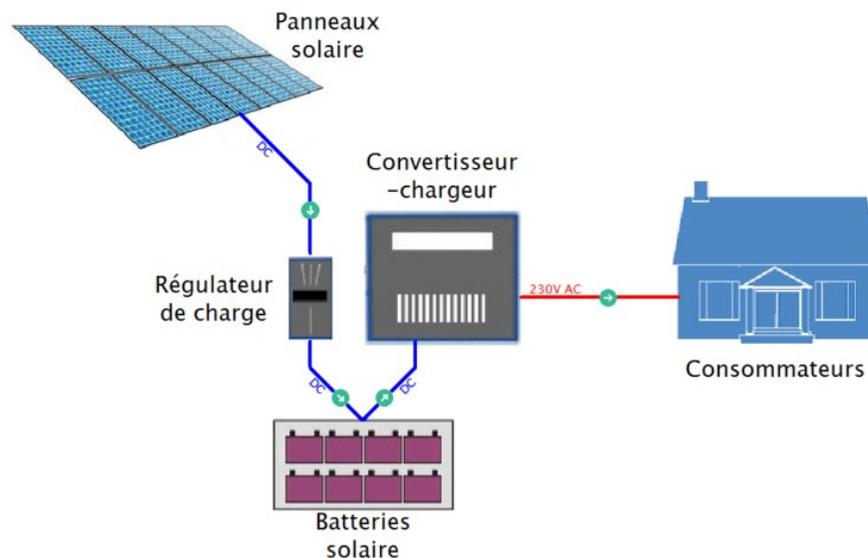


Figure I. 3 : Système autonome avec stockage en batteries.

I.2.2 Système à injection au réseau (raccordé au réseau)

Un système d'alimentation PV injecté au réseau ou un système d'alimentation PV raccordé au réseau est un système de production d'énergie PV solaire qui est connecté au réseau de distribution. Une installation PV connectée au réseau se compose de panneaux solaires, d'un ou plusieurs onduleurs, d'une unité de conditionnement de l'alimentation et d'un équipement de raccordement au réseau. Ils vont des petits systèmes de toit résidentiels et commerciaux aux grandes centrales solaires à grande échelle.

Contrairement aux systèmes d'alimentation autonomes, un système connecté au réseau inclut rarement une solution de batterie intégrée, car ils restent très coûteux. Lorsque les conditions le permettent, le système PV raccordé au réseau fournit la puissance excédentaire, au-delà de la consommation de la charge connectée, au réseau de distribution.

On distingue deux types d'installations connectées au réseau :

- Installation centralisée : génération de la puissance PV à grand - échelle centralisée dans les stations de puissance PV.
- Installation décentralisée : forme alternative de génération de puissance distribuée dans les unités situées directement dans le lieu du consommateur (chez des particuliers).

a) Système centralisé à grande puissance

Les systèmes à grandes puissances sont des systèmes PV localisés dans des endroits où l'alimentation est centralisée. Ils sont utilisés pour renforcer le réseau conventionnel durant les périodes de pic de puissances. Ces systèmes nécessitent des espaces très vastes (environ 2 hectares pour un 1MWc).

b) Système décentralisé à petite puissance

En quantité unitaire, les systèmes décentralisés de petite puissance (inférieur à 100 kWc) sont les plus courants, avec approximativement 80 % des systèmes raccordés au réseau mondial, la majorité étant posé sur des habitations individuelles.



Figure I. 4 : Système raccordé au réseau.

I.2.3 Système hybride

Le terme «Système d'Énergie Hybride» fait référence aux systèmes de génération d'énergie électrique multi-sources. Il s'agit de systèmes complexes associant différentes sources renouvelables ou bien combinées avec des sources conventionnelles (générateur diesel ...), différents éléments de stockage et différentes charges.

Les systèmes d'énergies hybrides peuvent être connectés aux réseaux électriques ou autonomes. Pour le premier cas, la production énergétique hybride est alors centralisée et mise en réseau entre plusieurs sites de production et de consommation.

Dans les sites isolés où le réseau n'existe pas, il est donc pratique et dans la majorité des cas nécessaire que le système hybride possède une autonomie totale. Il est donc impératif d'associer un élément de stockage de type accumulateur électrochimiques ou hydrogène au système dans la mesure où la consommation et la production sont fortement découplées.

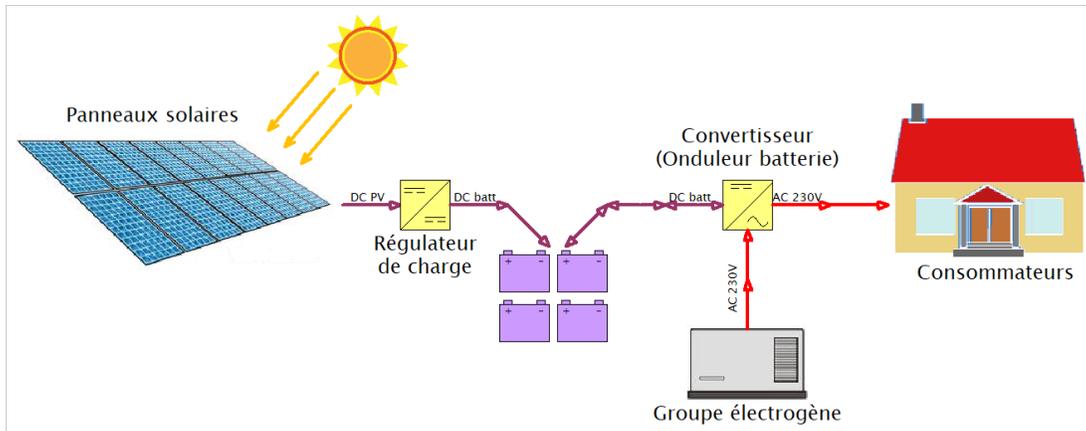


Figure I. 5 : Installation photovoltaïque hybride en site isolé.

I.3 Principe de fonctionnement d'une installation photovoltaïque

Les générateurs transforment directement l'énergie solaire en électricité (courant continu). La puissance est exprimée en Watt- crête (Wc), unité qui définit la puissance électrique disponible aux bornes du générateur dans les conditions d'ensoleillement optimales.

Un ou plusieurs onduleurs convertissent le courant continu produit en courant alternatif à 50Hz et 220 V. Selon le choix retenu, toute ou une partie de la production est injectée sur le réseau public, et le reste est consommé par le producteur. Lorsque la production photovoltaïque est insuffisante, le réseau fournit l'électricité nécessaire. [2]

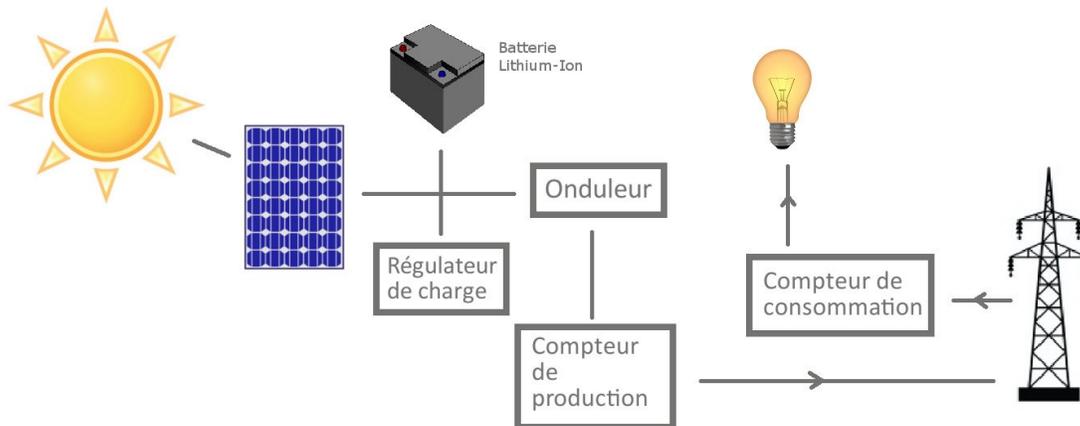


Figure I. 6 : Schéma de fonctionnement d'une installation photovoltaïque.

I.4 Panneau photovoltaïque

I.4.1 Définition d'une cellule photovoltaïque

Le principe d'une cellule photovoltaïque (CPV) est basé sur le phénomène physique appelé effet photovoltaïque (PV). Il consiste à établir une force électromotrice lorsque la surface de cette cellule est exposée au rayonnement solaire.

Donc la CPV est un composant électrique, exposé à la lumière génère de l'électricité grâce à l'effet PV. Les cellules solaires sont généralement associées en série et/ou en parallèle, cela permet d'obtenir une tension et/ou un courant élevé.

I.4.2 Types de cellules photovoltaïques

Il existe différents types de cellules solaires, qui sont réalisés à base de silicium (c'est principalement le semi-conducteur employé dans la fabrication [3]). Les cellules sont différenciables par leurs rendements et leurs coûts.

A. Cellules amorphes

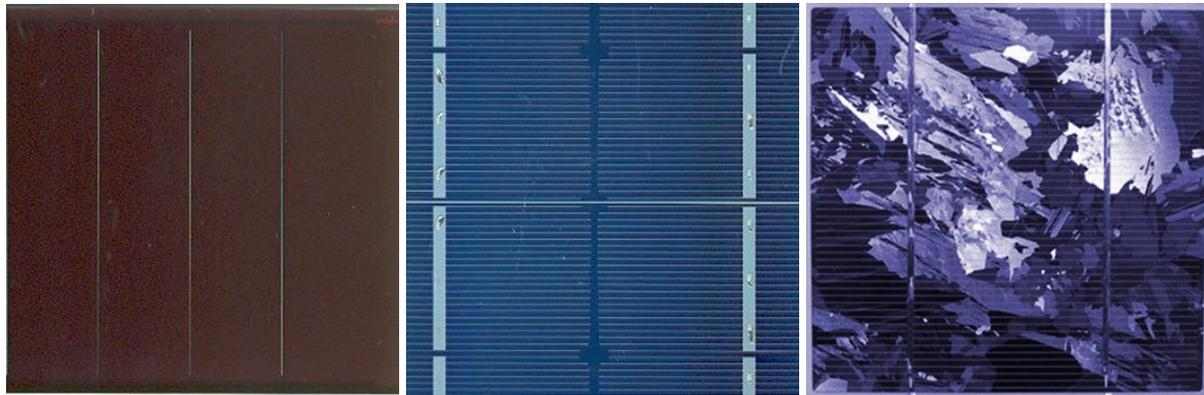
Les cellules amorphes ne possèdent pas de structure cristalline. Leur fabrication et leur efficacité sont inférieures par rapport aux autres types, cependant leur rendement est faible. Elles sont utilisées dans des petits produits de consommation (les calculatrices solaires).

B. Cellules monocristallines

Les cellules aux siliciums monocristallins, qui représentent le type avec le plus haut pouvoir de conversion, elles sont considérées parmi les cellules ayant le meilleur rendement.

C. Cellules poly-cristallines

Des cellules aux siliciums poly-cristallines. Leur conception étant plus faciles. Les composant des cristaux de silicium sont bien visibles, le cout de fabrication est moins important cependant leur rendement est plus faible [4].



Cellules amorphes

Cellules monocristallines

Cellules poly cristallines

Figure I. 7 : Les principaux types de cellules.

Tableau I. 1 : Etude comparative pour les cellules cristallines.[5]

Types de cellules cristallines	Cellules polycristallines	Cellules monocristallines
Rendement	10 à 15% ⇒110 à 150 Wc/m ² (Wc : watt-crête, puissance max du dispositif)	⇒12 à 19% 120 à 190 Wc/m ²
Avantages	Rapport performance/prix	Très bon rendement
Inconvénients	<ul style="list-style-type: none"> • Coût élevé • Rendement plus faible sous éclairage réduit • Les électrons porteurs de charge, générés par la lumière du soleil, sont partiellement perdus dans le volume du silicium à cause de la présence d'impuretés résiduelles 	

I.5 Modélisation mathématique du panneau photovoltaïque

I.5.1 Modèle et circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque

Dans la littérature, il existe plusieurs modèles de cellule photovoltaïque dont le but est l'obtention de la caractéristique courant-tension I-V pour l'analyse et l'évaluation des performances des modules photovoltaïques. Ces modèles diffèrent entre eux par la procédure et le nombre de paramètres intervenants dans le calcul de la paire courant– tension. [6]

Le circuit équivalent que nous retenons dans notre travail est le modèle à une diode. Le circuit est donné dans la Figure I.8.

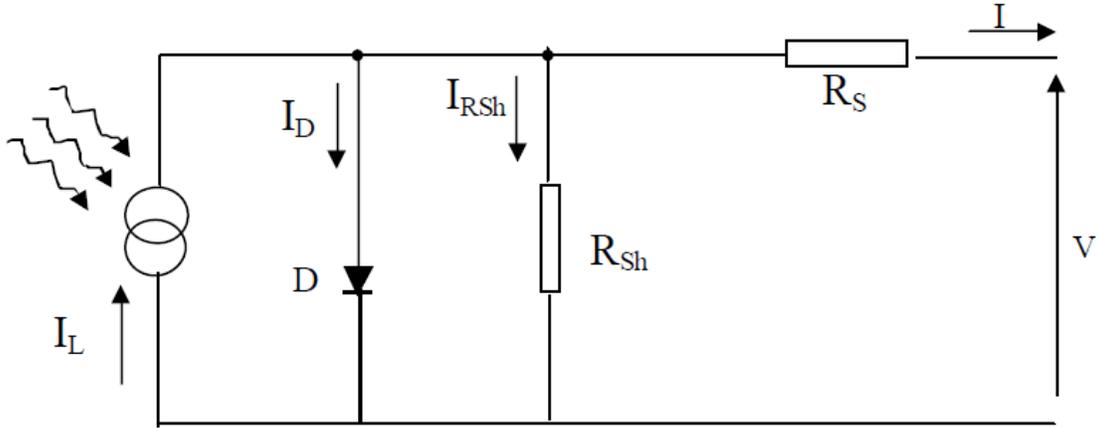


Figure I. 8 : Circuit électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque (Modèle à une diode).

La loi des nœuds nous permet d'écrire la relation suivante :

$$I_L = I_D + I_{RSH} + I \quad (\text{I.1})$$

A partir de ce circuit, nous obtenons les équations qui nous permettent d'obtenir la Caractéristique I-V de la cellule photovoltaïque.

Le courant de jonction I_D est donné par :

$$I_D = I_0 \left[\exp \left(\frac{q \times (V + I \times R_S)}{m \times k \times T} \right) - 1 \right] \quad (\text{I.2})$$

Le courant dans la résistance R_{sh} est donné par :

$$I_{RSH} = \frac{V + I \times R_S}{R_{sh}} \quad (\text{I.3})$$

A partir de l'équation (1), nous obtenons l'expression de la caractéristique I-V du modèle choisi :

$$I = I_L - I_D - I_{Rsh} = I_L - I_0 \left[\exp \left(\frac{q \times (V + I \times R_S)}{m \times k \times T} \right) - 1 \right] - \frac{V + I \times R_S}{R_{sh}} \quad (\text{I.4})$$

Avec

I_L : Courant photo-génère par la cellule photovoltaïque sous éclairément donné (A)

I_0 : Courant de saturation de la diode ou courant à l'obscurité (A)

R_S : Résistance série de la cellule photovoltaïque (Ω), qui traduit le phénomène de résistance de contact (métallisation de la grille avant et la face arrière), de la couche de base et de la zone avant de la cellule solaire. [7]

R_{Sh} : Résistance parallèle ou shunt (Ω), qui rend compte d'effets tels que le courant de fuite par les bords de la cellule [7]

m : Coefficient d'idéalité de la cellule photovoltaïque

k : Constante de Boltzmann ($1,38 \cdot 10^{-23}$ J/K)

T : Température de la cellule (K) avec

$$T = T_a + EG \times \left(\frac{Noct-20}{800} \right) \quad (I.5)$$

T_a : température ambiante.

$Noct$: Condition de température nominale de fonctionnement de la cellule qui est donnée par le constructeur (45°C).

EG : irradiation solaire.

I.5.2 Paramètre des cellules photovoltaïques

Les paramètres des cellules photovoltaïques ($I_{CC}, V_{CO}, P_{max}, \eta_c, ff$), extraits des caractéristiques courant-tension, permettent de comparer différentes cellules éclairées dans des conditions identiques. Ainsi, nous avons :

I.5.3 Courant de court-circuit I_{CC}

Il s'agit du courant obtenu en court-circuitant les bornes de la cellule ($V = 0$). Il croît linéairement avec l'intensité d'illumination de la cellule et dépend de la surface éclairée, de la longueur d'onde du rayonnement, de la mobilité des porteurs et de la température.

Ce qui nous donne $I_{CC} (V = 0) = I_L$.

I.5.4 Tension à circuit ouvert V_{CO}

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

$$V_{CO} (I = 0) = VT \ln \left(\frac{I_L}{I_0} + 1 \right) \quad (I.6)$$

I.5.5 Puissance maximale

La puissance fournie au circuit extérieur par une cellule photovoltaïque sous éclairage dépend de la résistance de charge (résistance externe placée aux bornes de la cellule). Cette puissance notée P_{max} est maximale en un point de fonctionnement $P_{max} (I_{max}, V_{max})$ de la courbe courant-tension (courants compris entre 0 et I_{CC} et tension comprise entre 0 et V_{CO}).

I.5.6 Rendement d'une cellule

Nous définissons le rendement énergétique d'une cellule par le rapport entre la puissance maximale et la puissance incidente.

$$\text{Avec :} \quad \eta_c = \frac{P_{max}}{P_s} = \frac{V_{max} \times I_{max}}{G \times S} \quad (I.7)$$

Ou :

P_{max} : Puissance maximale débitée par la cellule photovoltaïque (W).

P_s : Est la puissance maximale mesurée dans les conditions STC (Standard Test Conditions), c'est-à-dire sous un spectre du rayonnement AM, à une température de 25°C, et un éclairage de 1000W/ m².

I_{max} : Courant au point de puissance maximale de la cellule photovoltaïque (A).

V_{max} : Tension au point de puissance maximale de la cellule photovoltaïque (V).

G: Eclairage global incident sur la cellule photovoltaïque (W/m²).

S : Surface totale de la cellule photovoltaïque (m²).

I.5.7 Facteur de remplissage

Le facteur de remplissage ou facteur de forme, encore souvent appelé par sa dénomination anglaise (Fill Factor) correspond à la puissance maximale délivrée par la cellule, divisée par le produit $V_{CO} \times I_{CC}$, qui correspond à la puissance maximale idéale.

$$ff = \frac{P_{max}}{V_{CO} \times I_{CC}} = \frac{V_{max} \times I_{max}}{V_{CO} \times I_{CC}} \quad (I.8)$$

D'après les caractéristiques courant-tension et puissance-tension, nous pouvons déduire d'autres paramètres, qui sont :

- Le courant de court-circuit I_{CC} , qui est le courant débité par la cellule quand la tension à ses bornes est nulle. En pratique, ce courant est très proche du photo-courant I_L .
- La tension de circuit ouvert V_{CO} , qui est la tension qui apparaît aux bornes de la cellule quand le courant débité est nul.
- Entre ces deux extrêmes, il existe un optimum donnant la plus grande puissance P_{max} ou MPP (Maximum Power Point).

I.6 Caractéristiques électriques du panneau photovoltaïque

Le panneau PV utilisé dans notre étude du système PV autonome est de la firme BP Solar de référence BP SX150-S. Ce dernier est composé de 72 cellules PV en série. Le tableau suivant nous donne les caractéristiques de ce panneau.

Tableau I. 2: Caractéristiques électriques du panneau BP SX150-S.

Caractéristiques électriques	les Valeurs
Puissance maximale (P_{max})	150 W
Tension à P_{max} (V_{mp})	34.5 V
Courant à P_{max} (I_{mp})	4.35 A
Courant à court-circuit (I_{sc})	4.75 A
Tension à circuit ouvert (V_{OC})	43.5 V
Coefficient de température d' I_{sc}	-0,065 ± 0,015 %/°C
Coefficient de température de V_{OC}	-160 ± 20 mV%/°C
Coefficient de température de la puissance	-0,5 ± 0,05 %/°C
température nominale NOCT	47 ± 2 °C

I.7 Simulation du panneau dans les conditions STC (Standard Test Conditions)

Après simulation nous obtenons les caractéristiques de la tension en fonction du courant et les caractéristiques de la tension en fonction de la puissance pour une température de 25°C et une radiance de $1000\text{W}/\text{m}^2$.

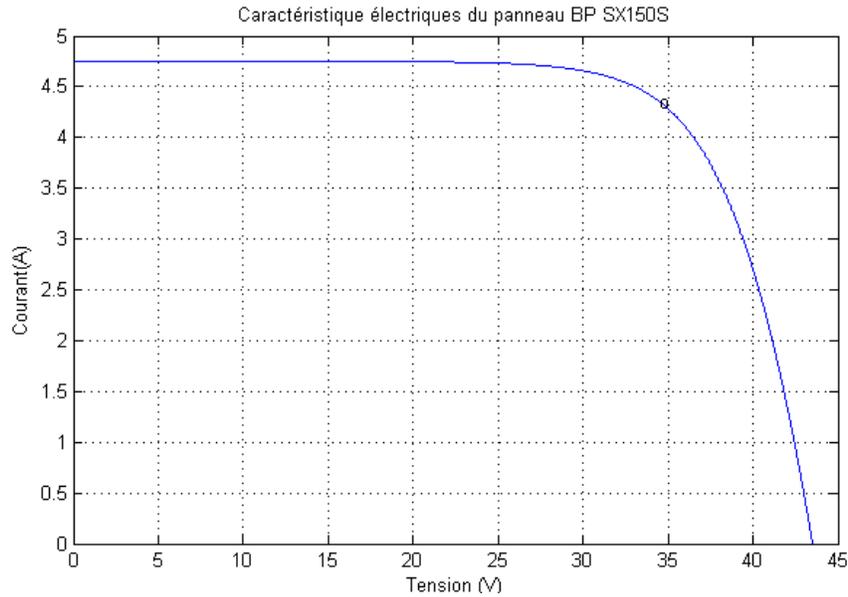


Figure I. 9 : Caractéristique de la tension en fonction du courant I(V) d'une cellule PV.

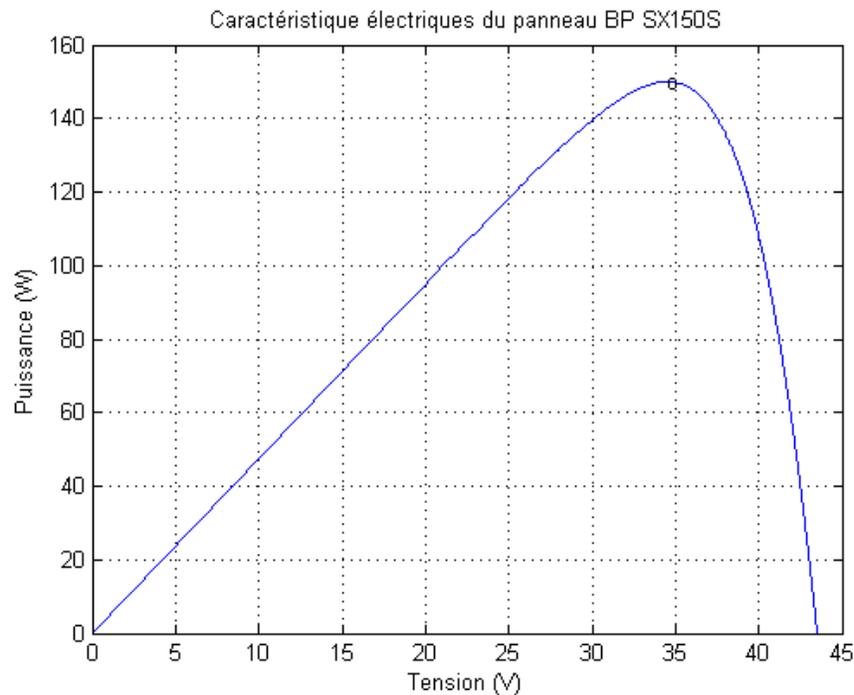


Figure I. 10 : Caractéristique de la tension en fonction de la puissance P(V) d'une cellule PV.

Ainsi, les différentes zones de la caractéristique $I=f(V)$ d'un générateur photovoltaïque est donné par la figure I.11.

Sachant que la caractéristique fondamentale du générateur photovoltaïque donnée pour un éclairement et une température donnée, n'impose ni le courant ni la tension de fonctionnement, seule la courbe $I=f(V)$ est fixée. C'est la valeur de la charge aux bornes du générateur qui va déterminer le point de fonctionnement du système photovoltaïque. La figure (I.11) représente trois zones essentielles :

- **Zone (1) :** où le courant reste constant quelle que soit la tension. Dans cette zone, le générateur PV fonctionne comme un générateur de courant.
- **Zone (2) :** correspondant au coude de la caractéristique, la région intermédiaire entre les deux zones précédentes, représente la région préférée pour le fonctionnement du générateur, où le point optimal (caractérisé par une puissance maximale) peut être déterminé.
- **Zone (3) :** qui se distingue par une variation de courant correspondant à une tension presque constante, dans ce cas le générateur est assimilable à un générateur de tension.

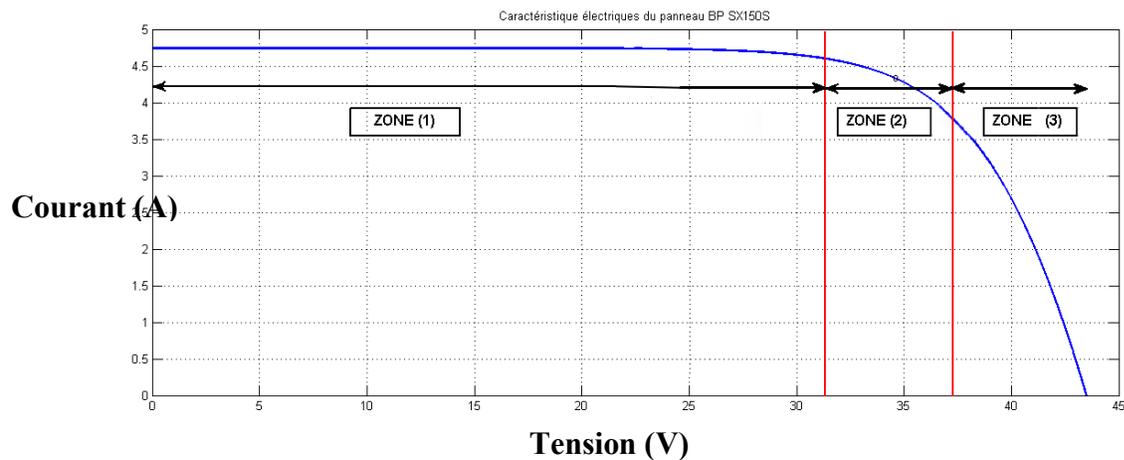


Figure I. 11 : Les différentes zones de caractéristique $I(V)$ d'un générateur photovoltaïque.

I.7.1 Etude sur l'influence de l'ensoleillement

La figure (I.12), montre l'influence de l'éclairement sur la caractéristique $I=f(V)$ à une température constante.

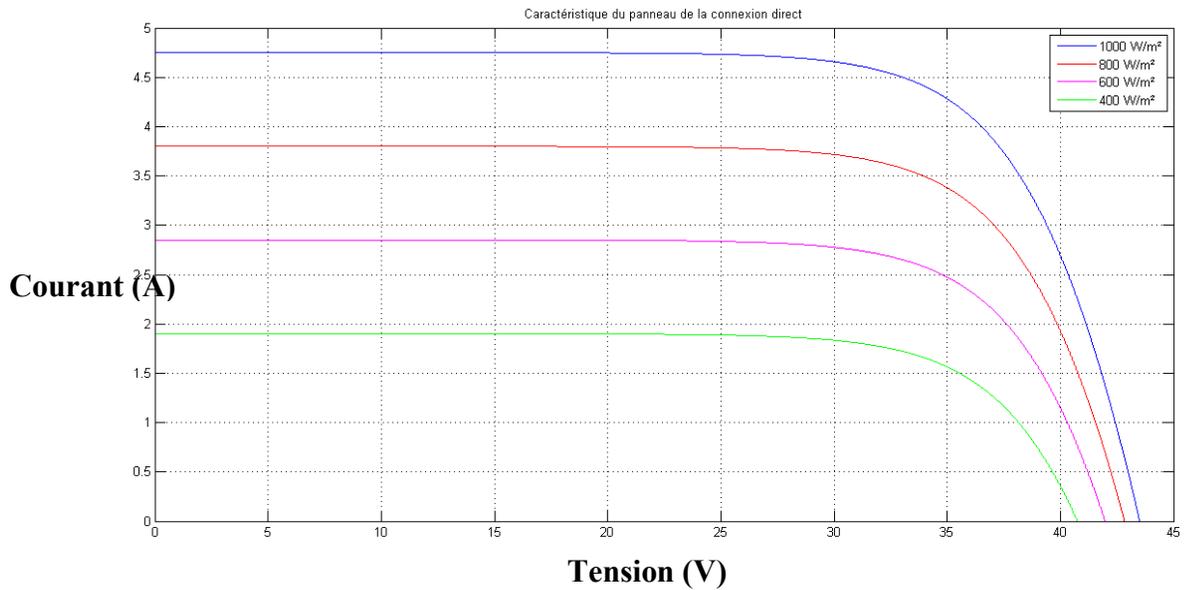


Figure I. 12 : Influence de l'éclairement sur la caractéristique $I=f(V)$.

Nous constatons que le courant subit une variation importante, par contre, la tension varie légèrement.

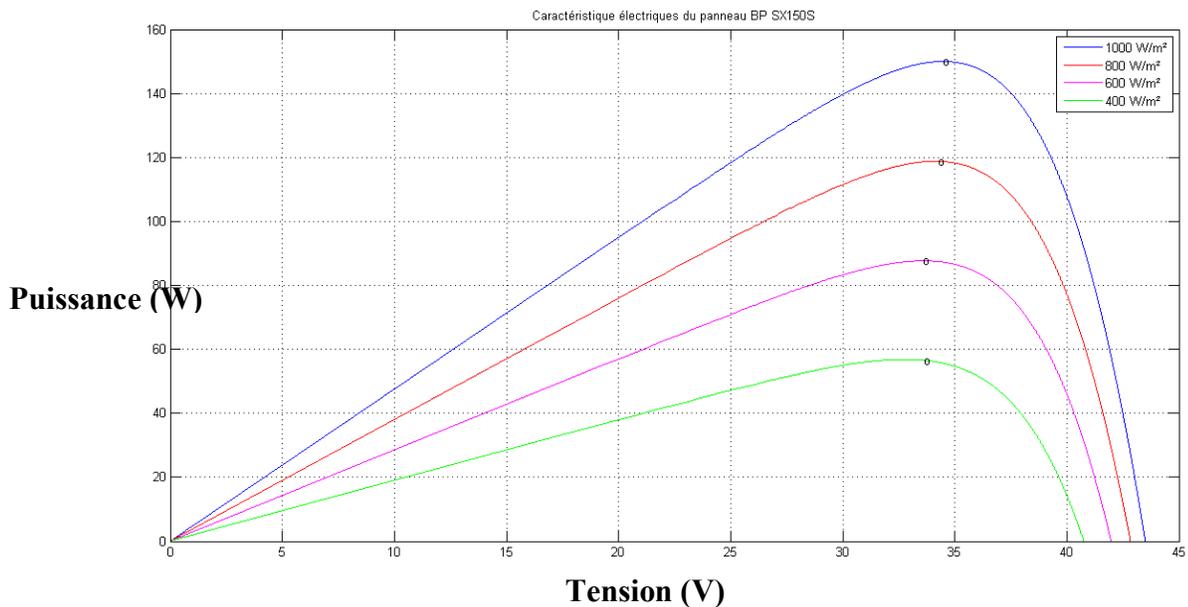


Figure I. 13 : Influence de l'éclairement sur la caractéristique $P=f(V)$.

De plus, la figure (I.13), illustre la variation de la puissance délivrée par le générateur en fonction de la tension pour différentes valeurs d'éclairement, ce qui se traduit par une augmentation de la puissance lorsque l'éclairement augmente.

I.7.2 Simulation sur l'influence de la température

Les deux figures (I.14, I.15) montrent l'influence de la température sur la caractéristique $I=f(V)$. Il est essentiel de comprendre l'effet de changement de la température d'une cellule solaire sur la caractéristique $I=f(V)$.

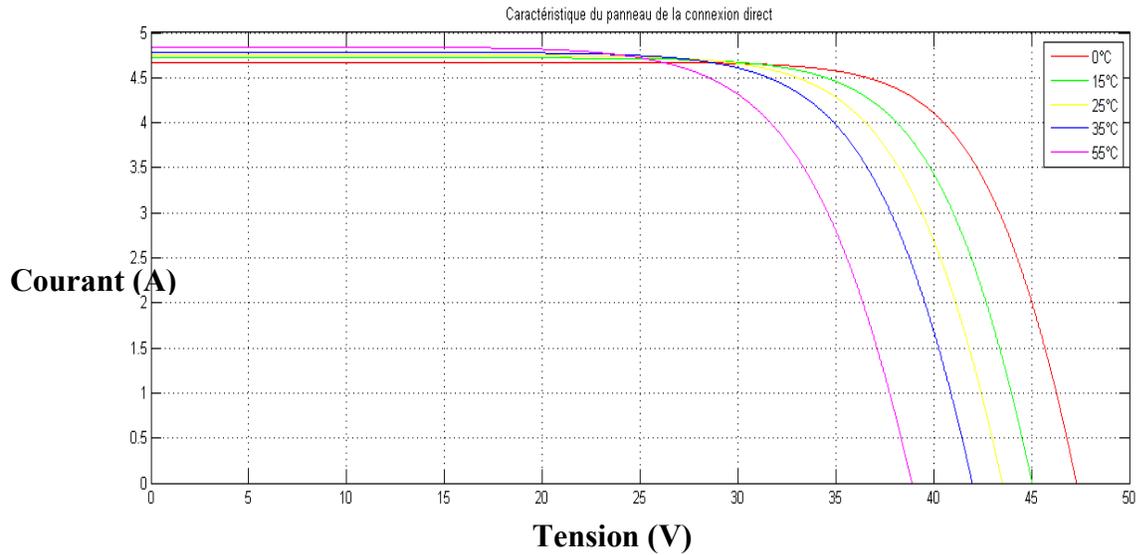


Figure I. 14 : Influence de la température sur la caractéristique $I=f(V)$.

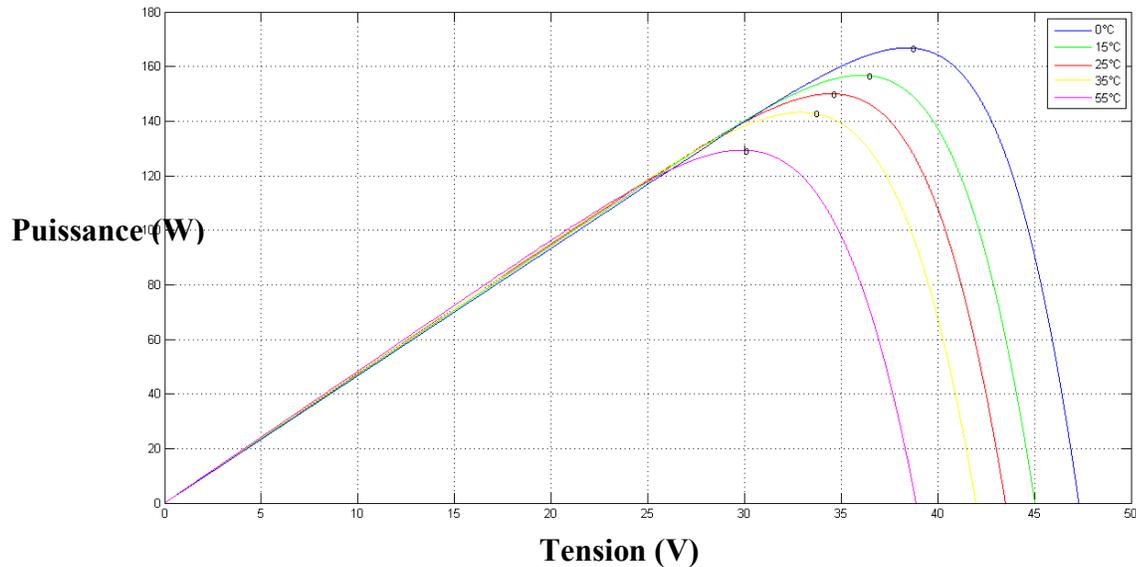


Figure I. 15 : Influence de la température sur la caractéristique $P=f(V)$.

Nous remarquons que le courant dépend de la température puisque le courant augmente légèrement à mesure que la température augmente, mais la température influe négativement sur la tension de circuit ouvert. Quand la température augmente la tension de circuit ouvert diminue. Par conséquent la puissance maximale du générateur diminue.

I.8 Convertisseur de puissance élévateur (BOOST)

Lorsqu'on souhaite augmenter la tension d'une source continue, on peut utiliser le hacheur parallèle de type BOOST, appelé également hacheur survolteur. Ce dispositif de l'électronique de puissance est un convertisseur continu-continu mettant en œuvre un ou plusieurs interrupteurs. Le découpage se fait à une fréquence très élevée ce qui a pour conséquence de créer une tension moyenne. Ce convertisseur comprend l'interrupteur (S), l'inductance (L), la diode qui protège S en empêchant le retour du courant et le condensateur C2 qui sert à lisser la tension de sortie.[8]

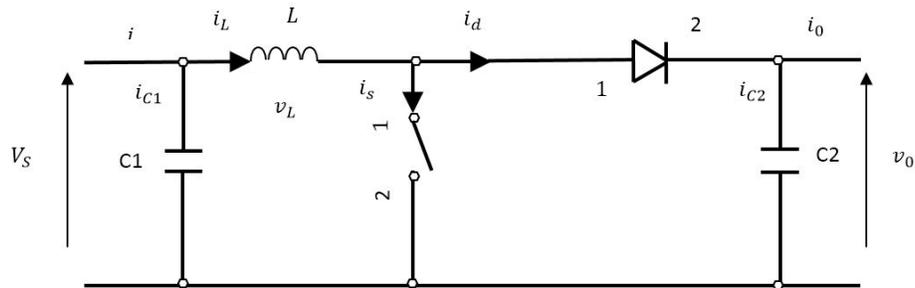


Figure I. 16 : Schéma d'un convertisseur élévateur (BOOST).

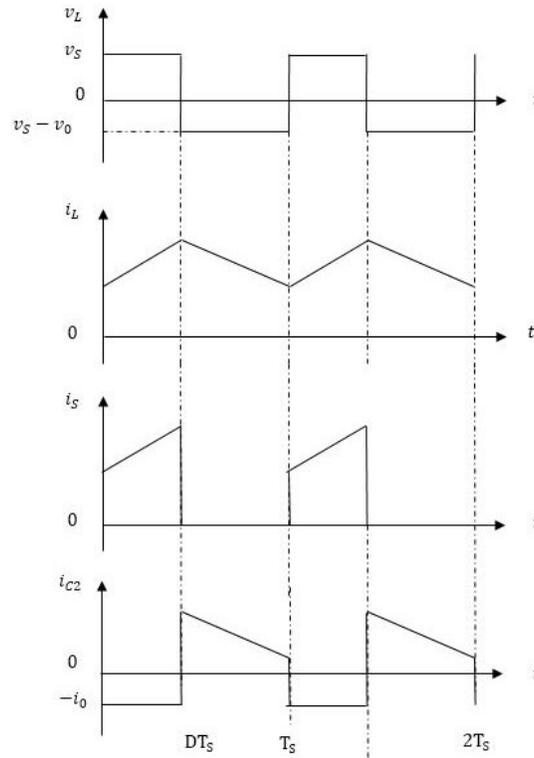


Figure I. 17 : Tensions et courants d'entrée et de sortie en D et T_S pour un Boost.

Selon la Figure I.17, S se ferme et la diode est polarisée en inverse pour $t \in [0, D.T_s]$. L se charge et le courant délivré par la source commence à augmenter progressivement. Pendant cet intervalle de temps on a :

$$\begin{cases} i_{C1}(t) = C1 \frac{dV_L(t)}{dt} = i(t) - i_L(t), \\ i_{C2}(t) = C2 \frac{dV_0(t)}{dt} = -i_0(t), \\ V_L(t) = L \frac{di_L(t)}{dt} = V_S(t). \end{cases} \quad (I.9)$$

Pour $t \in [DT_s, T_s]$, S est ouvert et L libère la tension emmagasinée qui s'ajoute à elle de la source pour alimenter la charge. On obtient l'ensemble suivant d'équations :

$$\begin{cases} i_{C1}(t) = C1 \frac{dV_S(t)}{dt} = i(t) - i_L(t), \\ i_{C2}(t) = C2 \frac{dV_0(t)}{dt} = i_L(t) - i_0(t), \\ V_L(t) = L \frac{di_L(t)}{dt} = V_S(t) - V_0(t). \end{cases} \quad (I.10)$$

A partir des équations (9) et (10), on peut écrire l'équation suivante :

$$(V_S)DT_s = (V_0 - V_S) \times (1-D) \times T_s \quad (I.11)$$

Le rapport de conversion M(D) s'écrit sous la forme suivante :

$$M(D) = \frac{V_0}{V_S} = \frac{1}{1-D} \quad (I.12)$$

I.9 Principe de la MPPT

L'algorithme MPPT peut être plus ou moins compliqué pour rechercher du maximum de puissance PPM. En général, il est basé sur la variation du rapport cyclique du convertisseur statique (CS) en fonction de l'évolution des paramètres d'entrée de ce dernier (I et V et par conséquent de la puissance du GPV) jusqu'à se placer sur le PPM.

La figure suivante montre le schéma de principe du convertisseur MPPT relié à un panneau photovoltaïque coté source.

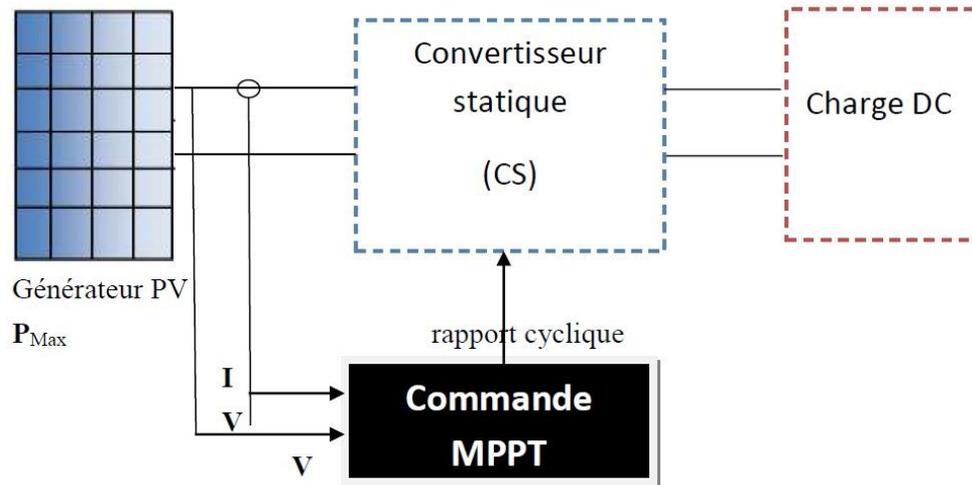


Figure I. 18 : Schéma de principe du convertisseur MPPT

On compte actuellement un nombre important de technique de commande MPPT, commençant par des techniques simple comme les contrôleurs MPPT basée sur le courant de court-circuit et de la tension en circuit-ouvert, aux contrôleurs plus performants utilisant un algorithme pour atteindre le PPM. Parmi ces techniques, on peut citer :

Les commandes MPPT à différents algorithmes [9].

- A. Principe des commandes “Perturb and Observe” (P&O).
- B. Principe des commandes “Hill Climbing”.
- C. Principe des commandes “Incrément de conductance” (IncCond).

Les commandes MPPT basées sur des relations de proportionnalité [9].

- A. Mesure de Voc (Fraction de Voc).
- B. Mesure de Icc (Fraction de Icc).

Les commandes MPPT basées sur le principe de la logique floue [9].

- A. Méthode de la logique floue.
- B. Méthode de la logique floue optimisée par le PSO (PSO-FL).

Les commandes MPPT de réseaux de neurones artificiels [9].

I.10 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté des généralités sur les systèmes PVs. Nous avons brièvement décrit le principe de fonctionnement d'une cellule PV ainsi que les différentes caractéristiques de celle-ci, qui ont été détaillées. Ensuite nous avons abordé une spécification des différentes zones de fonctionnement de la CPV.

Ensuite la modélisation mathématique de la cellule est abordée. Nous nous sommes basés sur le modèle électrique équivalent à une seule diode pour montrer l'influence des conditions climatique sur ses caractéristiques électriques.

Enfin nous avons présenté le convertisseur de puissance élévateur (Boost) et les différentes techniques pour la poursuite du point de fonctionnement à puissance maximale MPPT.

CHAPITRE II
NOTIONS DE BASE SUR LA COMMANDE MPPT FLOUE
TYPE TSK

II.1 Introduction

La conception et la mise en œuvre de systèmes d'informations avancées, de logiciels d'aide à la décision, de postes de supervisions de procédés industriels avec les problèmes de communications homme- machine qui les accompagnent se caractérisent par la constante manipulation d'informations dont beaucoup sont subjectives, imprécises, vagues et incertaines.

L'intégration de l'homme dans son environnement informatique pour exploiter correctement les savoirs ou automatiser certaines tâches, tout cela requiert la formalisation et la mécanisation des méthodes humaines pour des raisonnements empiriques ou naturels et la rationalisation de procédures de choix.

L'intelligence artificielle a eu un impact limité, jusqu'à une date récente, sur les applications industrielles, parce qu'elle a mis l'accent, de façon exclusive, sur le traitement symbolique de la connaissance, par opposition à la modélisation numérique utilisée traditionnellement dans les sciences de l'ingénieur. Néanmoins, la logique floue permet de faire le lien entre modélisation numérique et modélisation symbolique, ce qui a permis des développements industriels à partir d'algorithmes très simples de traduction de connaissances symboliques en entité numérique et inversement.

Plus récemment, on a assisté à un retour du numérique dans ces problèmes d'intelligence artificielle, avec la logique floue. Cette dernière est plus conforme à l'intelligence artificielle symbolique, qui met en avant la notion de raisonnement, et où les connaissances sont codées explicitement.

II.2 Définition de la logique floue

La logique floue est une extension de la logique classique qui permet la modélisation des imperfections des données et se rapproche dans une certaine mesure de la flexibilité du raisonnement humain, et elle diffère de la logique classique parce qu'elle permet des définitions partielles ou "floues" des règles de contrôle.

Tout en sachant que la logique floue est une branche des mathématiques qui permet à un ordinateur de modéliser le monde réel de la même façon que les personnes. Elle est préoccupée par

la quantification et le raisonnement en utilisant un langage qui permet des définitions ambiguës comme, beaucoup, peu, petit, haut, dangereux, etc. Elle s'occupe de situations où la question qui est posée et la réponse obtenue contiennent des concepts vagues.

II.3 Comparaison entre la logique classique et la logique flou

En logique classique, les décisions sont binaires : soit vraies, soient fausses. C'est sur ce point que la logique floue va se distinguer de la logique classique. En logique floue, une décision peut être à la fois vraie et fausse en même temps, avec un certain degré d'appartenance à chacune de ces deux croyances.

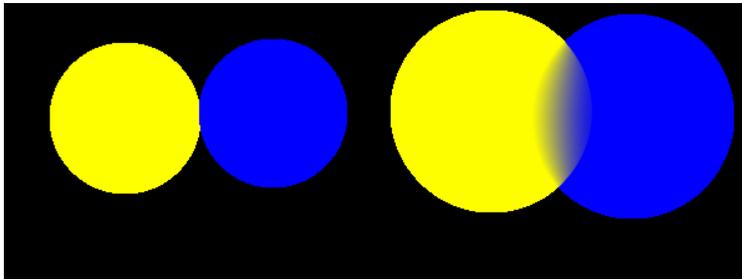


Figure II. 1 : Illustration qui démontre la différence entre la logique flou et la logique classique.

Selon la logique floue, le raisonnement exacte est un cas limite du raisonnement approximatif ; tout n'est qu'un degré. Tout système logique peut-être rendu flou. Les connaissances sont interprétées comme une collection de contraintes élastiques ou floues d'un ensemble de variables. L'inférence est un processus de propagation de contraintes élastiques. La logique booléenne est un sous-ensemble de la logique floue.

La logique floue permet d'accommoder le concept de vérité partielle : des valeurs entre complètement vrai et complètement faux sont admises. On supporte des modes de raisonnement approximatifs plutôt qu'exactes. Son importance provient du fait que le raisonnement humain est approximatif.

La définition de ZADEH :

La logique floue est déterminée comme un ensemble de principes mathématiques pour la représentation des connaissances basée sur les degrés d'appartenance plutôt que sur l'appartenance nette de la logique binaire classique.

II.4 Ensemble floue

La notion d'ensemble flou a été proposée par Zadeh (Zadeh, 1965) en introduisant un caractère graduel de l'appartenance d'un élément à un ensemble donné. Cela permet une meilleure représentation des termes et des connaissances vagues que nous, les humains, manipulons au quotidien.

Mathématiquement, un ensemble flou A d'un univers de discours U, est caractérisé par une fonction d'appartenance, notée μ_A , à valeur dans l'intervalle [0,1] et qui associe à chaque élément x de U un degré d'appartenance $\mu_A(x)$ indiquant le niveau d'appartenance de x à A. $\mu_A(x) = 1$ et $\mu_A(x) = 0$ correspondent respectivement à l'appartenance et la non-appartenance.

Exemple: Evaluation de la température d'un corps (figure II.2):

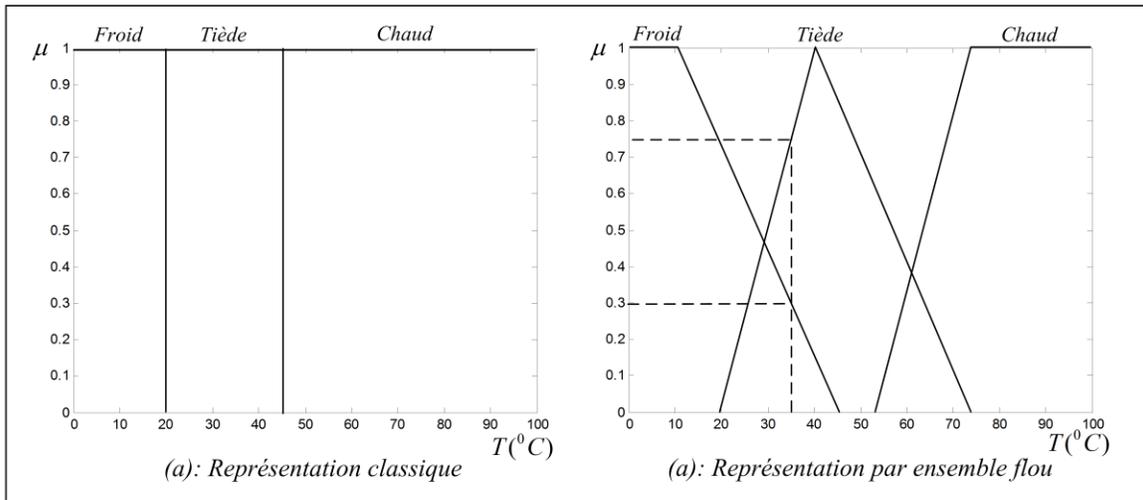


Figure II. 2: Représentation de la température d'un corps par les ensembles classiques et Flous.

- En logique booléenne, le degré d'appartenance μ ne peut prendre que deux valeurs (0 ou 1). Dans ce cas le corps peut être :

Froid : $\mu_{Froid} = 1, \mu_{Tiède} = 0, \mu_{Chaud} = 0$;

Tiède : $\mu_{Froid} = 0, \mu_{Tiède} = 1, \mu_{Chaud} = 0$;

Chaud : $\mu_{Froid} = 0, \mu_{Tiède} = 0, \mu_{Chaud} = 1$;

La température du corps ne peut pas prendre deux qualificatifs à la fois.

- En logique floue, le degré d'appartenance devient une fonction qui peut prendre une valeur réelle intermédiaire comprise entre 0 et 1 inclus. Dans ce cas, pour le qualificatif tiède, le

corps peut être considéré à la fois, comme froid avec un degré d'appartenance de 0.3 et comme tiède avec un degré d'appartenance de 0.75 (figure II.3).

Pour $T=35^{\circ}\text{C}$: $\mu_{\text{Froid}}(T)=0.3$, $\mu_{\text{Tiède}}(T)=0.75$, $\mu_{\text{Chaud}}(T)=0$.

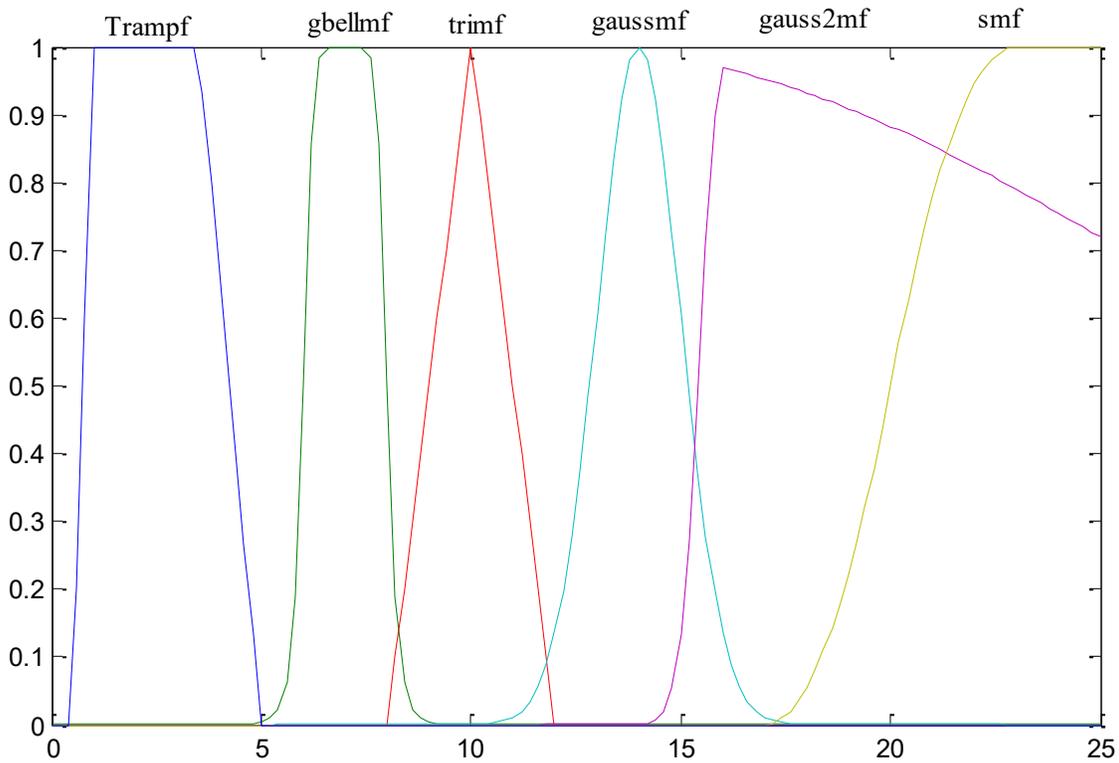


Figure II. 3: Différents types de fonctions d'appartenance utilisées.

L'allure de la fonction d'appartenance est à choisir selon l'application traitée. La figure II.3, illustre les différentes formes de fonctions d'appartenance les plus utilisées. Cependant, dans certaines applications où l'on doit dériver la fonction d'appartenance, on choisira plutôt des fonctions en S (sigmoïde) ou des fonctions de type gaussien, continument dérivables sur leur support.

II.5 Univers du discours

L'univers du discours ou domaine du discours, désigne, en logique, et plus spécialement dans le calcul des prédicats, l'ensemble (ou la classe) des entités qui est parcouru par la quantificateur. Du point de vue de la théorie des modèles (sémantique), il s'agit de l'ensemble de base d'une structure d'interprétation.

Le terme «univers du discours » se réfère généralement à tout ensemble de termes utilisés dans un discours spécifique, c'est à dire une famille de termes linguistiques ou sémantique spécifiques au domaine concerné.

Une base de données est un modèle de certains des aspects de la réalité d'une organisation. Il est conventionnel d'appeler cette réalité « l'univers du discours » ou le « domaine du discours ».

II.6 Variables linguistiques

Une variable linguistique appelée aussi attribut linguistique peut être définie à partir du triplet (x, U, T_x) où x est une variable définie sur l'univers de discours U et, $T_x = A_1, A_2 \dots$ est un ensemble composé de sous-ensembles flous de U qui caractérise x . On associe souvent à chaque sous ensemble flou de T_x une valeur ou un terme linguistique (étiquette).

La figure II.4 illustre un exemple de la variable linguistique 'vitesse' avec trois termes linguistiques: *petite, moyenne et grande*.

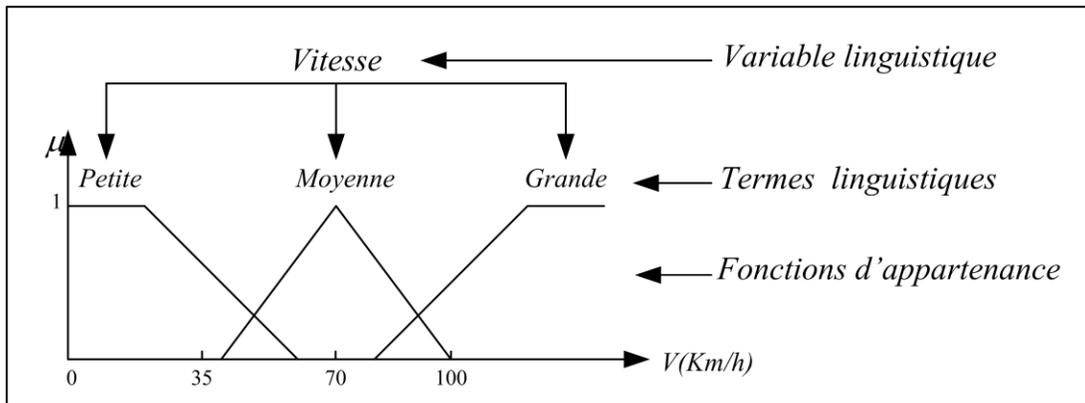


Figure II. 4: Variables linguistiques.

II.7 Opérateurs flous

Les opérateurs flous décrivent comment des ensembles flous interagissent ensemble. On regardera certaines opérations communes, comme le complément, l'intersection et l'union.

- Le complément permet de vérifier de combien un élément n'appartient pas à un ensemble. Comme exemple, si on a l'ensemble des températures élevées, le complément est l'ensemble des températures qui ne sont pas élevées. Si A est l'ensemble flou, son complément $\neg A$ est :

$$\mu_{\neg A}(x) = 1 - \mu_A(x) \quad (\text{II. 1})$$

- L'intersection de deux ensembles, en logique floue, est un peu différente des méthodes classiques. On cherche à savoir de combien un élément est-il dans les deux ensembles. On utilise alors la valeur minimale d'appartenance pour calculer l'intersection.

$$\mu_{A \cap B}(x) = \min[\mu_A(x); \mu_B(x)] \quad (\text{II. 2})$$

- En logique floue, l'union est le contraire de l'intersection. On cherche à savoir de combien un est-il dans l'un des deux ensembles. On utilise la valeur maximale d'appartenance.

$$\mu_{A \cup B}(x) = \max[\mu_A(x); \mu_B(x)] \quad (\text{II. 3})$$

La figure II.5 résume ces opérations, de façon graphique.

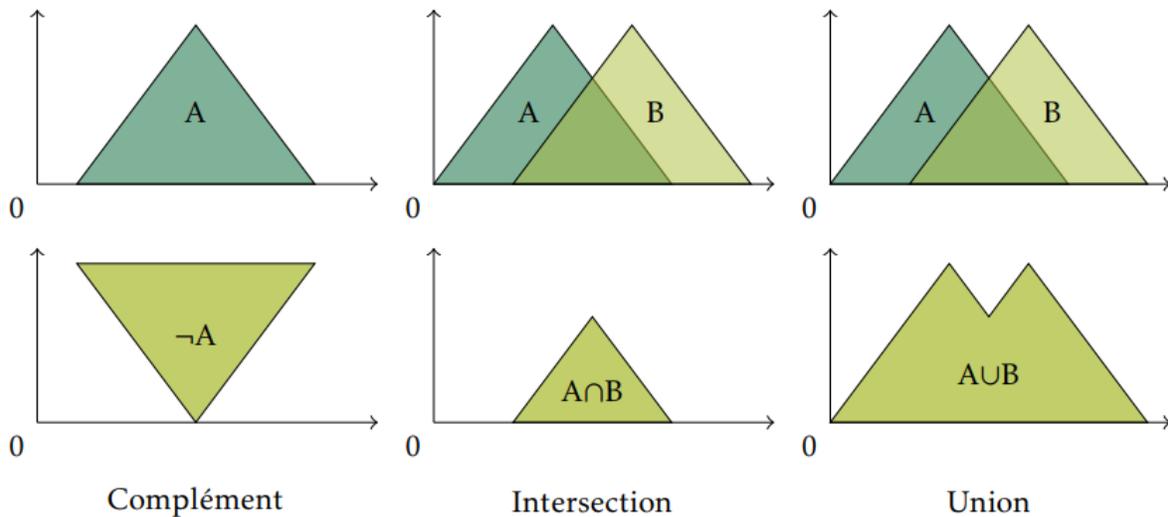


Figure II. 5 :Exemples d'opérations sur des ensembles flous.

II.8 Règles floues

Une règle floue est une déclaration de la forme suivante :

$$SI x \text{ est } A \text{ ALORS } y \text{ est } B \quad (\text{II. 4})$$

Où x et y sont des variables linguistiques, et A et B sont des valeurs linguistiques, déterminées par les ensembles flous sur les ensembles X et Y . Une variable linguistique est une variable floue. Par exemple : La tension est haute. La variable linguistique tension prend la valeur linguistique élevée. La plage de valeurs linguistiques possibles d'une règle représente l'univers de cette variable. Un exemple de règle floue est :

$$SI \text{ vitesse est lente ALORS arrêt est court}$$

La variable vitesse peut avoir une plage de valeurs entre 0 et 220 km/h. On peut inclure des sous-ensembles flous (très lent, lent, moyenne, rapide, très rapide) pour modifier cette règle. Chaque sous-ensemble flou représente une valeur linguistique pour la variable.

La logique classique (SI – ALORS) utilise la logique binaire. La logique floue permet d'associer une plage de valeurs (un ensemble flou) a des variables linguistiques. On peut réduire le nombre de règles jusqu'à 90% en utilisant la logique floue.

II.9 Modèle flou TSK

Le modèle flou proposé par Takagi-Sugeno [10] est décrit par des règles floues : "si prémisse alors conséquence" [11]. Sa caractéristique principale est qu'il représente localement les relations entrées-sorties d'un système en exprimant chaque conclusion par un système linéaire.

La $i^{\text{ème}}$ règle du modèle flou s'écrit :

$$Si \xi_1 \text{ est } F_i^1 \text{ et...et } \xi_j \text{ est } F_i^j \text{ alors : } \begin{cases} \dot{x}(t) = A_i x(t) + B_i u(t) \\ y(t) = C x(t) \end{cases}, i = 1, \dots, r \quad (\text{II. 5})$$

Où : F_i^j est l'ensemble flou et r est le nombre de règles 'Si-Alors', $x(t) \in R^n$ représente le vecteur d'états, $u(t) \in R^m$ est le vecteur de commande, $y(t) \in R^q$ est le vecteur de sortie du système

$A_i \in R^{n \times n}$, est la matrice d'état, $B_i \in R^{m \times n}$, est la matrice d'entrée du système, $C_i \in R^{q \times n}$ est la matrice de sortie et ξ_j sont les prémisses, fonction des états ou des sorties. [12]

Pour une paire $(y(t), u(t))$ donnée, l'inférence du système flou est donnée par :

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = \frac{\sum_{i=1}^r w_i(\xi(t)) \{A_i x(t) + B_i u(t)\}}{\sum_{i=1}^r w_i(\xi(t))} \\ y(t) = \frac{\sum_{i=1}^r w_i(\xi(t)) C_i x(t)}{\sum_{i=1}^r w_i(\xi(t))} \end{cases} \quad (\text{II. 6})$$

Où :

$$\xi(t) = [\xi_1(t), \xi_2(t) \dots \xi_j(t)], w_i(\xi(t)) = \prod_{i=1}^r F_i^j(\xi_j(t)) \text{ avec } : i = 1, 2, \dots, r$$

$F_i^j(\xi_j(t))$ est la valeur de la fonction d'appartenance $\xi_j(t)$ dans l'ensemble flou.

Avec :

$$\begin{cases} \sum_i^r w_i(\xi(t)) > 0 \\ w_i(\xi(t)) \geq 0 \end{cases} \quad (\text{II. 7})$$

En-posant :

$$h_i(\xi(t)) = \frac{w_i(\xi(t))}{\sum_i^r w_i(\xi(t))} \quad (\text{II. 8})$$

Le modèle flou TSK s'écrit :

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = \sum_{i=1}^r h_i(\xi(t)) \{A_i x(t) + B_i u(t)\} \\ y(t) = \sum_{i=1}^r h_i(\xi(t)) C_i x(t) \end{cases} \quad (\text{II. 9})$$

Les $h_i(\xi(t)) \geq 0$ possèdent la propriété de somme convexe :

$$\forall t \geq 0, \sum_{i=1}^r h_i(\xi(t)) = 1 \quad (\text{II. 10})$$

II.10 Construction d'un modèle flou TSK

Pour obtenir un modèle flou TS, trois méthodes distinctes peuvent être utilisées :

- La première, dite par identification, le problème d'identification des systèmes non linéaires est réduit à l'identification des sous-systèmes définis par des modèles locaux linéaires et des fonctions d'activation. [13]
- La seconde, consiste à linéariser le modèle autour d'un ensemble de points de fonctionnement judicieusement choisis. Dans ce cas, il s'agit de modèles locaux affines pour lesquels le modèle flou est obtenu par interpolation des modèles locaux avec des fonctions d'activation conçues de manière judicieuse en fonction des spécifications souhaitées. [12]
- La troisième, est adaptée pour les systèmes non-linéaires de complexité modérée [12]. Cette méthode garantit la construction d'un modèle T-S représentant exactement un modèle non linéaire sur un espace compact des variables d'état. Notons que l'approche par secteur non linéaire permet d'associer une infinité de modèles TS pour un système non linéaire suivant le découpage des non-linéarités réalisé. Une approche systématique de découpage en secteurs non linéaires repose sur le lemme suivant: [14]

Dans les deux dernières approches, on suppose la disponibilité d'un modèle mathématique non-linéaire. On doit noter aussi que pour un système donné, l'obtention d'un modèle flou TSK n'est pas unique. [12]

Pour obtenir à partir d'une non linéarité les fonctions d'appartenance associée à un modèle flou [12], on utilise le lemme suivant [15]:

Théorème

Si $\forall x \in [-b, a]$, $a, b \in \mathbb{R}^+$, $f(x) : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ une fonction bornée sur $[-b, a]$ alors il existe deux fonctions $W_1(x)$ et $W_2(x)$ ainsi que deux réels α et β tels que

$$f(x) = \alpha \cdot W_1(x) + \beta \cdot W_2(x) \quad (\text{II. 11})$$

$$W_1(x) + W_2(x) = 1, W_1(x) \geq 0, W_2(x) \geq 0$$

Preuve : Considérons la fonction $f(x)$ bornée tel que $f_{min} \leq f(x) \leq f_{max}$, on peut alors toujours écrire:

$$f(x) = \alpha \cdot W_1(x) + \beta \cdot W_2(x) \quad (\text{II. 12})$$

avec :

$$\alpha = f_{max}, \beta = f_{min}, W_1 = \frac{f(x) - f_{min}}{f_{max} - f_{min}}, \quad W_2 = \frac{f_{min} - f(x)}{f_{max} - f_{min}}$$

Dans ce cas, le modèle TSK (II.12) obtenu représente de façon exacte le modèle non linéaire pour $x \in R^n$ et comporte 2^{nl} règles floues. nl correspond au nombre de non linéarités du système non linéaire réel. [14]

II.11 Structure interne d'un système flou

De manière classique, le fonctionnement interne d'un système flou repose sur la structure présentée par la figure II.6 qui inclut quatre blocs:

- La base de connaissances
- La fuzzification des variables d'entrée, avec éventuellement un prétraitement de l'information.
- L'inférence à partir d'une base de connaissance
- La défuzzification, avec éventuellement un post-traitement de l'information.

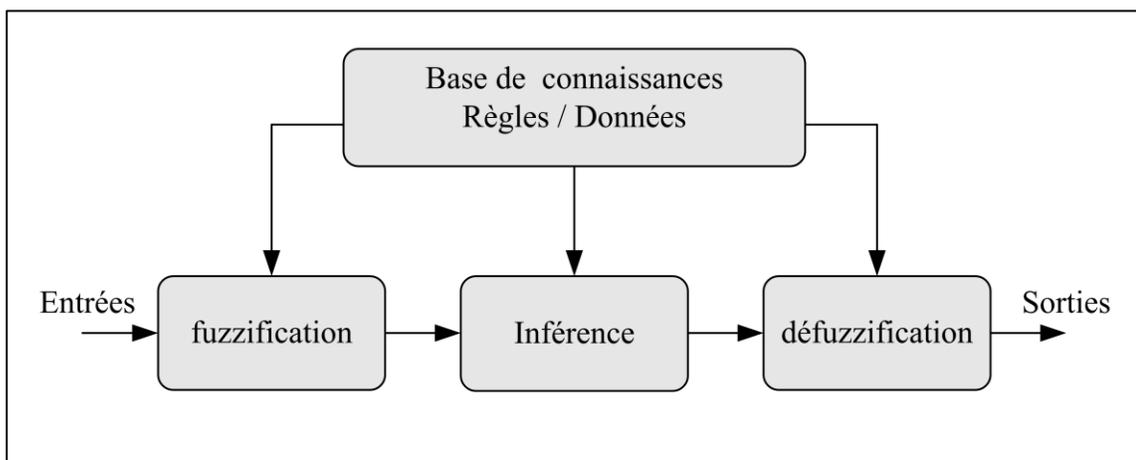


Figure II. 6 : Structure interne d'un système flou

II.11.1 La base de connaissance

Elle contient les définitions des fonctions d'appartenance (Formes et paramètres) associées aux variables d'entrée/sortie ainsi que l'ensemble des règles floues.

II.11.2 La fuzzification

La fuzzification consiste à caractériser les variables linguistiques utilisées dans le système. Il s'agit donc d'une transformation des entrées réelles en une partie floue définie sur un espace de représentation lié à l'entrée. Cet espace de représentation est normalement un sous-ensemble flou. Autrement, cette étape consiste à définir les fonctions d'appartenance pour les différentes variables d'entrée pour établir le passage des grandeurs déterminées en variables linguistiques pour être traitées par les inférences.

Comment fuzzifier ?

- ✓ Donner l'univers du discours : plage de variations possibles de l'entrée considérée.
- ✓ Une partition en classe floue de cet univers.
- ✓ Les fonctions d'appartenances de chacune de ces classes.

II.11.3 Moteur d'inférence

C'est l'étape dans laquelle on va paramétrer nos règles de décision «Si..., alors...». Grâce à ce moteur, on va pouvoir appliquer les règles que l'on a fixées à nos variables d'entrée floues. Consiste à utiliser le moteur d'inférence, qui est un mécanisme permettant de condenser l'information d'un système à travers d'un ensemble de règles définies pour la représentation d'un problème quelconque. Chaque règle délivre une conclusion partielle qui est ensuite agrégée aux autres règles pour fournir une conclusion (agrégation). Les règles constituent le système d'inférence floue.

II.11.4 Les fonctions d'appartenances

Un ensemble flou est défini par sa fonction d'appartenance, qui correspond à la notion de la fonction caractéristique en logique classique. Supposons que nous voulions définir l'ensemble des personnes de taille moyenne. En logique classique, nous conviendrons par exemple que les personnes de taille moyenne sont celles dont la taille est comprise entre 1.60m et 1.80m. la fonction caractéristique de l'ensemble donne « 0 » pour les tailles hors de l'intervalle [1.6m;1.8m] et « 1 » dans cet intervalle. L'ensemble flou des personnes de taille moyenne sera défini par une fonction d'appartenance qui diffère d'une fonction caractéristique par le fait qu'elle peut prendre n'importe

quelle valeur dans l'intervalle [0,1] à chaque taille possible correspondra un degré d'appartenance à l'ensemble des tailles moyennes compris entre 0 et 1.

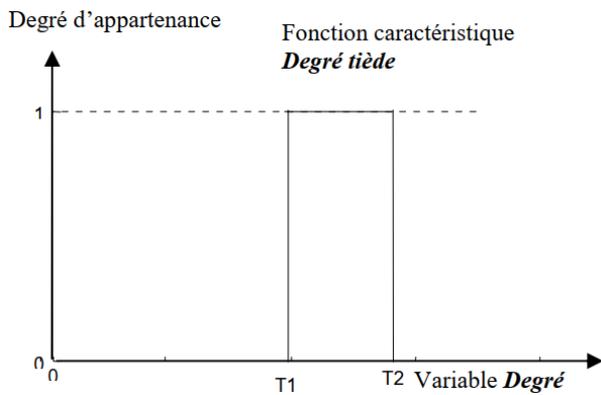


Figure II. 8 : Fonction caractéristique.

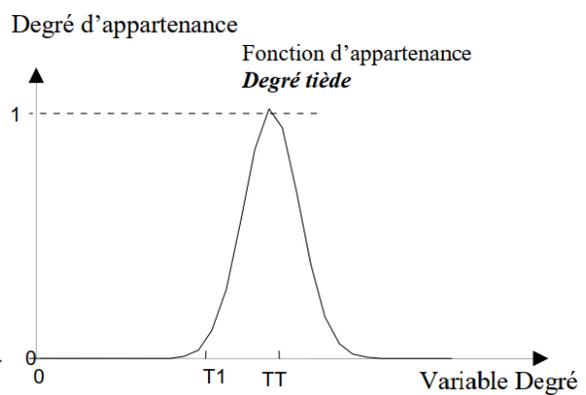


Figure II. 7 : Fonction d'appartenance

Plusieurs ensembles flous peuvent être définis sur le même variable, par exemple les ensembles *taille petite, taille moyenne, taille grande*

Cet exemple montre la gradualité que permet d'introduire la logique floue. Une personne de 1.60m appartient à m'ensemble taille moyenne avec un degré de 0.7 et à l'ensemble taille petite avec un degré de 0.3. En logique classique le passage de petite à moyenne serait brusque.

Le variable (par exemple introductif) ainsi que les termes « **tiède** », « **chaud** » et « **froid** ». définis par les fonctions d'appartenance portent les noms de variable linguistique et de termes linguistiques.

Définition : Un ensemble flou A dans X est défini par une fonction d'appartenance qui associe à chaque élément x de X , le degré $\mu_A(x)$, compris entre 0 et 1 avec lequel x appartient à A . Donc un ensemble flou peut être représenté par un ensemble de paires ordonnées :

$$A = \{ (x, \mu_A(x)) / x \in X \} \quad (\text{II. 13})$$

Tel que : $\mu_A(x)$ La fonction d'appartenance d'une variable x .

X : est appelé l'univers de discours il peut contenir des valeurs continues ou discrètes.

Notation :

Si X est discret : $A = \sum \mu_A(x)/x$ (II. 14)

Si X est continu : $A = \int \mu_A(x)/x$ (II. 15)

Tel que : X est L'univers de discours ou l'intervalle de variation de variable x.

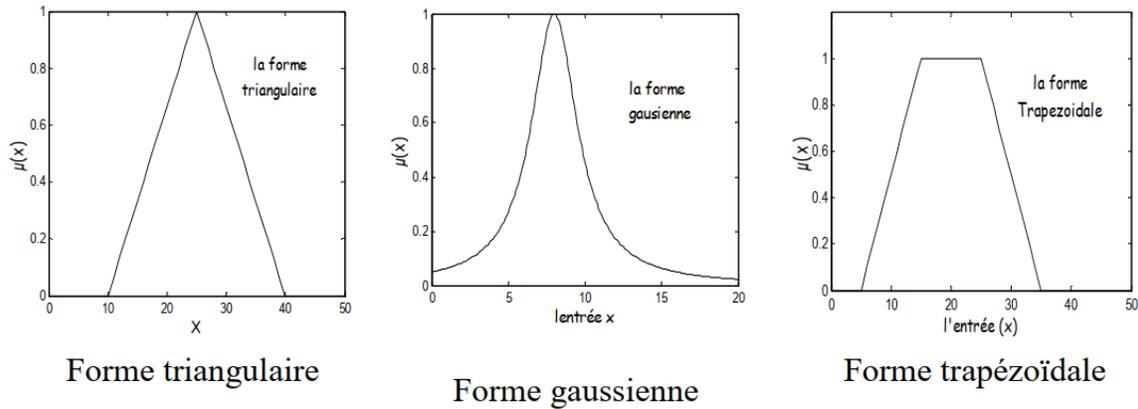


Figure II. 9 : Les différentes formes des fonctions d'appartenances.

II.11.5 Les opérateurs de la logique flous

Il est important de savoir composer entre les divers prédicats et leurs fonctions d'appartenance comme dans l'exemple «l'air est froid et le vent est fort» ou dans «si l'air est froid ou si le vent est fort» il faut fermer la porte. Il apparaît deux types de composition ET et OU auxquels il faut ajouter la négation. Notons x et y les variables linguistiques caractérisant la température de l'air et la force du vent et $\mu_A(x), \mu_B(y), \mu_E(z), \mu_O(z), \mu_C(z)$ avec $z=\{x,y\}$, les fonctions d'appartenance associées aux propriétés respectives «l'air est froid», «le vent est fort», «l'air est froid et le vent est fort», «l'air est froid ou le vent est fort», «l'air n'est pas froid».

A) Opérateur NON :

La propriété «l'air n'est pas froid» peut être caractérisée de façon évidente par la fonction d'appartenance.

$$\mu_C(z) = 1 - \mu_A(x) \tag{II. 16}$$

La figure suivante met en évidence cette relation:

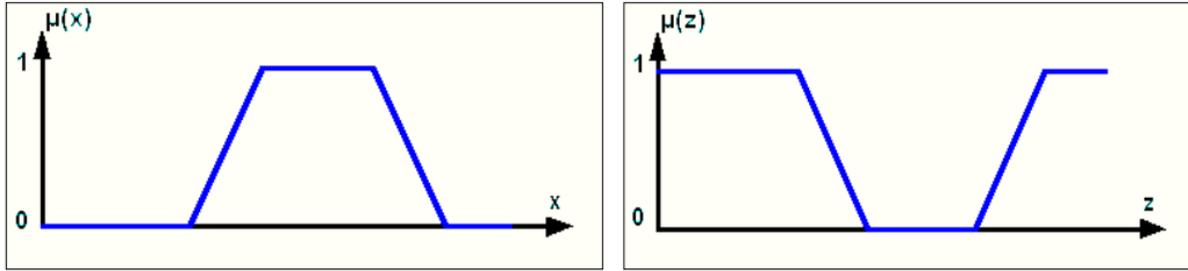


Figure II. 10 Opérateur NON

A noter qu'il s'agit de l'opérateur NON, appelée aussi «complément», «négation» ou «inverse».

B) Opérateur ET:

La solution la plus simple et la plus utilisée pour caractériser la satisfaction simultanée de deux propriétés est de poser

$$\mu_E(z) = \mu_A \text{ et } B(z) = \min \{ \mu_A(x), \mu_B(y) \}. \quad (\text{II. 17})$$

On parle alors d'opérateur minimum.

Cette opération est représentée à suivante Comme on le voit, il est possible que la fonction d'appartenance résultante $\mu_E(z)$ n'atteigne pas la valeur 1.

On peut facilement vérifier que l'opérateur minimum est commutatif, c'est à dire qu'il est possible d'invertir $\mu_A(x)$ et $\mu_B(y)$ sans que la résultat change.

Cet opérateur peut être appliqué à plus de deux ensembles. Dans ce cas s'applique le théorème d'associativité.

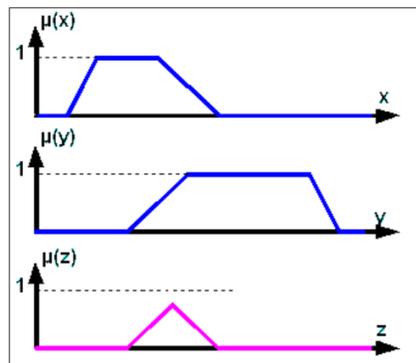


Figure II. 11 Opérateur ET.

A noter qu'il s'agit de l'opérateur ET, appelée aussi «intersection».

C) Opérateur OU:

La réalisation de l'opérateur ou au niveau de la logique floue se fait en général par la formation du maximum, appliquée aux fonctions d'appartenance $\mu_A(x)$ et $\mu_B(y)$ des deux ensembles A et B. On a donc l'opérateur maximum.

$$\mu_O(z) = \mu_A \text{ ou } B(z) = \max\{\mu_A(x), \mu_B(y)\} \quad (\text{II. 18})$$

La **figure II.10** montre cette opération. A noter qu'il est possible que la fonction d'appartenance résultante $\mu_O(z)$ atteigne deux fois la valeur 1.

Evidemment, l'opérateur maximum est aussi commutatif et associatif.

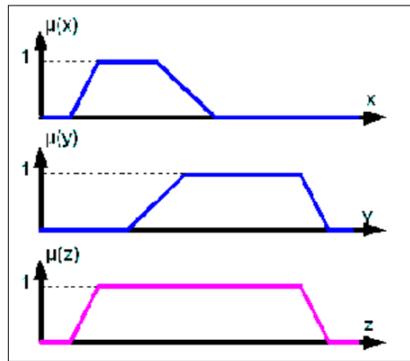


Figure II. 12 : Opérateur OU.

Dans ce paragraphe, on a introduit la formation du minimum et du maximum pour réaliser les opérateurs ET et OU. Dans la plupart des cas, ces opérateurs donnent des résultats convenables, surtout pour le réglage et la commande par logique floue. Cependant, dans certaines circonstances, il peut être judicieux d'utiliser d'autres opérateurs, soit pour simplifier le traitement numérique, soit pour mieux tenir compte des opérations floues.

D) Opérateurs ET et OU, réalisés par opérateurs arithmétiques

Souvent, l'opérateur ET est réalisé par la formation du produit appliqué aux fonctions d'appartenance, selon la relation

$$\mu_E(z) = \mu_A \text{ et } B(z) = \mu_A(x) \cdot \mu_B(y) \quad (\text{II. 19})$$

Il s'agit de l'opérateur produit.

Le résultat de cette opération est représentée à la figure II.12. La fonction d'appartenance résultante est toujours inférieure ou égale à 1. Elle reste donc à l'intérieur de l'intervalle défini par $\mu \in [0,1]$. La règle de calcul (**Equation II.19**) peut être étendue à plus de deux termes dans le produit lorsqu'il faut combiner trois ou plusieurs ensembles. L'opérateur produit est souvent utilisé dans le domaine de réglage et de commande par logique floue comme alternative à l'opérateur minimum.

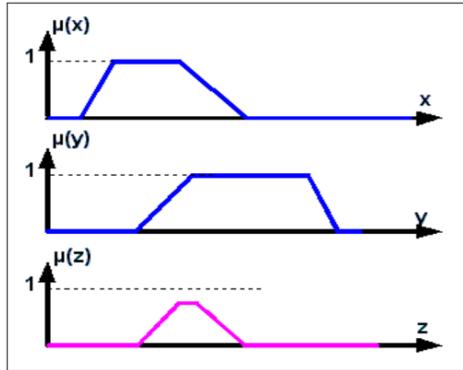


Figure II. 13 : Opérateur ET réalisé par la fonction produit.

Par analogie, on peut réaliser l'opérateur OU par la formation de la somme des fonctions d'appartenances ou plus précisément par la valeur moyenne, à savoir:

$$\mu_o(z) = \mu_a \text{ ou } B(z) = 1/2 [\mu_A(x) + \mu_B(y)] \quad (\text{II. 20})$$

On parle alors de l'opérateur somme.

La figure II.13 montre l'effet de cet opérateur. La somme est divisé par 2. En effet, il est fort possible que la somme $[\mu_A(x) + \mu_B(y)]$ dépasse le domaine admissible $[0,1]$. Afin que cette somme reste dans le domaine défini, on peut l'écrêter ou la normaliser. Dans ce cas aussi, il est possible d'étendre la règle de calcul (Equation II.20) à plusieurs termes. il faut alors diviser la somme par le nombre de termes, afin d'obtenir une normalisation simple.

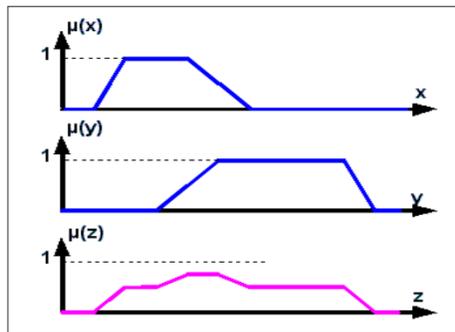


Figure II. 14 :Opérateur OU réalisé par la fonction de la somme.

E) Opérateurs ET flou et Ou flou

Les opérateurs Et flou et OU flou sont des opérateurs combinés entre l'opérateur minimum et la moyenne arithmétique.

L'opérateur Et flou est défini par:

$$\mu_E(z) = \mu_A \text{ et } B(z) = \beta \min [\mu_A(x), \mu_B(y)] + [(1 - \beta)/2] [\mu_A(x) + \mu_B(y)] \quad (\text{II. 21})$$

et l'opérateur Ou flou par:

$$\mu_O(z) = \mu_A \text{ ou } B(z) = \beta \max [\mu_A(x), \mu_B(y)] + [(1 - \beta)/2] [\mu_A(x) + \mu_B(y)] \quad (\text{II. 22})$$

Avec le facteur $\beta \in [0, 1]$, il est possible de pondérer l'influence des deux termes.

Pour $\beta=1$, on aboutit respectivement à l'opérateur minimal ou maximal. Par contre, pour $\beta=0$, on obtient pour les deux opérateurs la moyenne arithmétique correspondant à l'opérateur somme selon (Equation 11.20). Dans ce cas, le ET flou et le OU flou se confondent. On peut étendre les deux opérateurs ET flou et le OU flou à trois ou à plusieurs termes. La somme qui apparaît entre crochets doit alors être divisé par le nombre de termes de la somme. La figure 2.15 représente l'opérateur ET flou et montre l'influence du facteur β sur l'allure de la fonction d'appartenance $\mu_E(z)$.

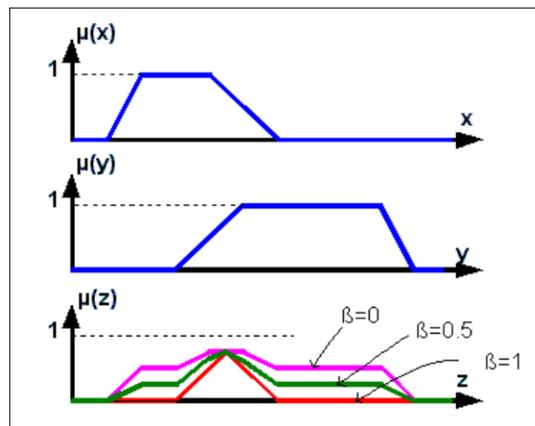


Figure II. 15 Opérateur ET flou réaliser par la relation II.21

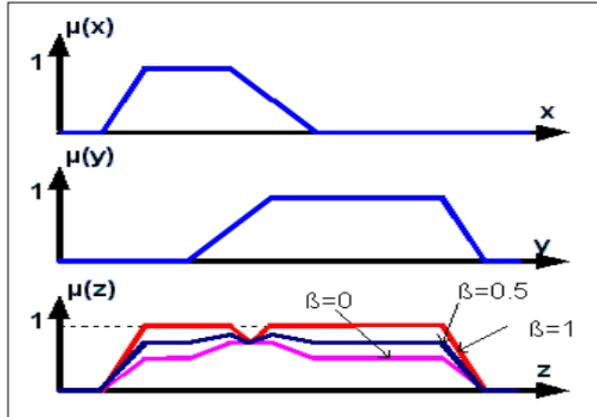


Figure II. 16 Opérateur OU flou réalisé par la relation II.22

F) Opérateurs min-max et opérateur β

L'opérateur min-max est défini par la combinaison des opérateurs minimum et maximum, selon

$$\mu(z) = \beta \min [\mu_A(x), \mu_B(y)] + (1 - \beta) \max [\mu_A(x), \mu_B(y)] \quad (II. 23)$$

Le facteur $\beta \in [0,1]$, permet de pondérer les deux opérateurs. Pour $\beta=1$, on obtient l'opérateur ET, réalisé par la formation du minimum, tandis que pour $\beta=0$, on aboutit à l'opérateur OU, réalisé par la formation du maximum. Par contre, $\beta=0,5$ conduit à l'opérateur Ou, réalisé par la formation de la somme. **La figure II.16** montre de l'effet de l'opérateur min-max en fonction du facteur β . On constate bien la grande variation de l'allure de la fonction d'appartenance résultante.

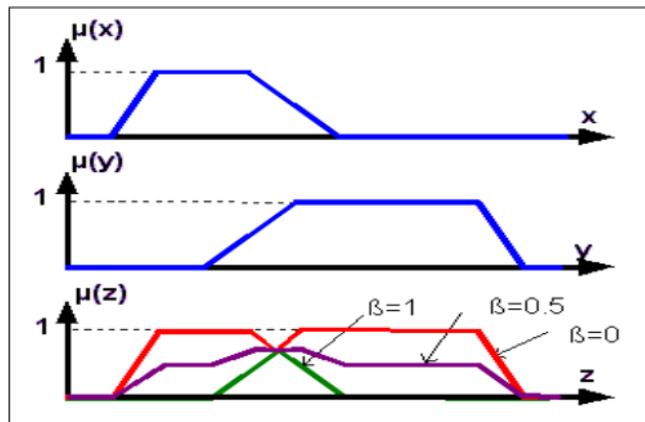


Figure II. 17 : Opérateur min-max réalisé par la relation II.23.

II.11.6 Défuzzification

Elle consiste à transformer l'ensemble flou en une valeur finale nette. C'est l'opération qui, inversement à la fuzzification, consiste à transformer une information floue en une information précise (valeur réelle), Transformation d'un nombre flou de l'ensemble flou en une grandeur numérique.

Parmi les méthodes de défuzzification, nous allons présenter les deux principales et les plus utilisées :

- la méthode du Centre de Gravité (COG= Center Of Gravity).
- la méthode Moyenne des Maxima (MM= Mean of Maxima)

⇒ Méthode du Centre de Gravité

C'est la méthode la plus utilisée dans les systèmes flous. Elle donne comme valeur le centre de gravité de l'ensemble flou. La sortie est calculée comme l'abscisse du centre de gravité de la surface.

Ainsi, la sortie défuzzifiée y est définie par

$$Y = \frac{\sum_{j=1}^n \mu_y(y_j)y_j}{\sum_{j=1}^n \mu_y(y_j)} \quad (\text{II. 24})$$

⇒ Méthode de la Moyenne des Maxima

Elle donne comme valeur la moyenne des valeurs dont le degré d'appartenance est maximum.

$$Décision = \frac{\int_s y dy}{\int_s dy} \quad (\text{II. 25})$$

Avec

$$S = \{y_m \in R, \mu(y_m) = SUP_{y \in R} (\mu(y))\}$$

R : l'ensemble flou issu de l'agrégation des conclusions.

Dans cette méthode, la sortie est calculée comme la moyenne des abscisses pour lesquels le degré d'appartenance est maximal.

II.12 Conclusion

La logique floue ouvre des possibilités remarquables de codification des connaissances des experts. Cependant, les applications utilisant la logique floue ne sont pas fondamentalement plus performantes. Elles sont tout simplement plus faciles à réaliser et à utiliser : l'utilisation faite par la logique floue d'expressions du langage courant permet au système flou de rester compréhensible pour les personnes non expertes. C'est ainsi que des machines complexes peuvent devenir plus conviviales cause à l'utilisation de la logique floue.

Cependant, dans ce chapitre nous avons parlé sur les ensembles flous, et les différents types de fonctions d'appartenance qui peuvent être utilisé dans ce domaine. Ensuite nous avons présenté le model TSK (Takagi-Sugeno-Kang) qui est le modèle utilisé dans notre étude.

CHAPITRE III
TESTS ET SIMULATIONS

III.1 Introduction

La simulation est un outil puissant pour l'évaluation des performances théoriques d'un système. En effet, ce dernier peut être testé sous des conditions facilement contrôlables et ses performances peuvent être aisément surveillées. La procédure de simulation lie les deux principales parties de la conception d'un système, à savoir, l'étude théorique et la réalisation d'un prototype. Vu que des changements dans la conception peuvent facilement être faits à l'étape de la simulation, il est possible d'expérimenter avec un large ensemble de variations des conditions de fonctionnement afin d'aboutir à une solution optimale.

Matlab/Simulink est un logiciel de simulation, qui fournit une interface graphique permettant de construire des modèles sous forme de diagrammes blocs. Il offre l'avantage de construire des modèles hiérarchisés qui offrent la possibilité de voir le système à différents niveaux. Simulink offre également la possibilité de construire des modèles modulaires, qui ont l'avantage d'être facilement reliés entre eux afin de simuler un certain système.

III.2 Schéma bloc du système PV autonome

Pour simuler le comportement du SPV, nous avons utilisé le logiciel Matlab/Simulink en se basant sur le modèle mathématique décrit dans le chapitre I.

La Figure III.1 illustre le schéma bloc de Matlab/Simulink du système PV autonome.

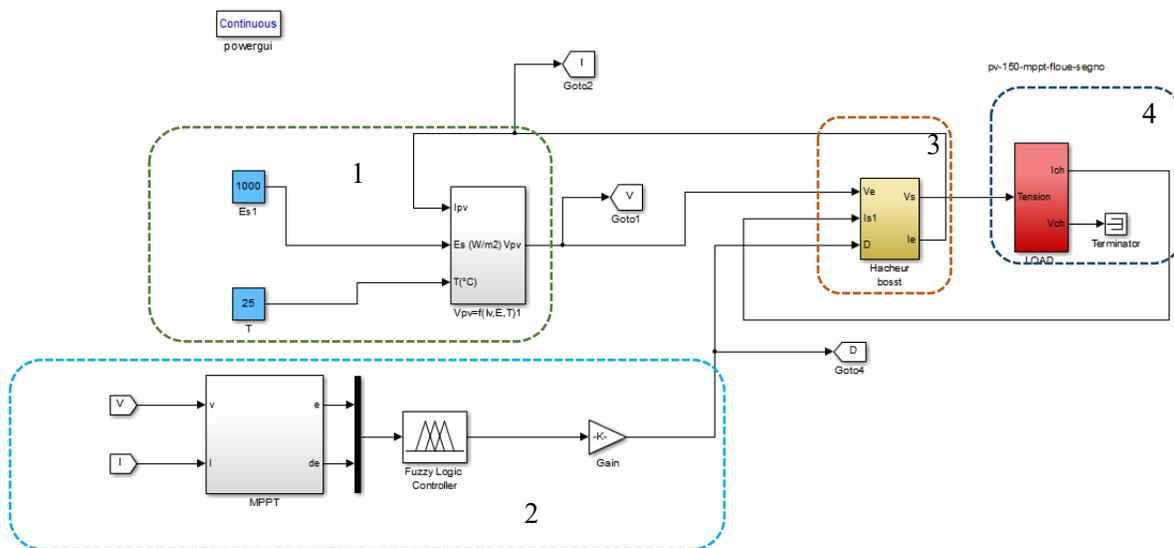


Figure III. 1 : Schéma bloc du système globale sous Simulink.

Les blocs principaux de ce système sont :

Bloc1 : représente le panneau PV du constructeur BP Solar de référence BP SX150S. Les entrées du panneau sont le rayonnement et la température. Tout en sachant que ses deux dernières peuvent être constante ou variable.

Bloc2 : représente le contrôleur MPPT flou de type TSK (FLC-TSK), les entrées de la commande sont le courant et la tension du panneau et la sortie représente le rapport cyclique.

Bloc3 : montre le convertisseur de puissance de type élévateur (Boost) de tension primaire continu et en tension secondaire continu (DC-DC), il a la capacité de fournir une tension plus élevée que celle appliquée à son entrée, il est composé de :

- Une bobine L : permet de lisser le courant appelé sur la source.
- Un condensateur C : permet de limiter l'ondulation de tension en sortie.
- Une diode D : protège l'interrupteur K en empêchant le retour du courant.
- Un interrupteur à semi-conducteur contrôlable K.

Bloc4 : montre la charge résistive connectée au convertisseur.

III.3 Dimensionnement du contrôleur MPPT-TSK

III.3.1 Variables du contrôleur flou MPPT-TSK

Dans le système proposé, les variables d'entrées du contrôleur MPPT flou sont l'erreur E et la variation de l'erreur DE alors que la sortie du contrôleur est la variation du rapport cyclique D .[16]

Les deux entrées (l'erreur et la variation de l'erreur) sont déterminées à partir de la puissance et de la tension de sortie du panneau PV et elles sont données par les équations suivantes : [16]

$$E = \frac{\Delta P}{\Delta V} = \frac{P(K) - P(K-1)}{V(K) - V(K-1)} \quad (\text{III.1})$$

$$\Delta E(K) = E(K) - E(K - 1) \quad (III.2)$$

Où

$$P(K) = V(K) \times I(K) \quad (III.3)$$

III.3.2 Univers de discours

Afin de déterminer les univers de discours adéquats des variables du contrôleur flou. Nous avons fait une série de tests et en se basant sur la caractéristique $P - V$ du panneau photovoltaïque, nous avons opté pour les univers de discours suivants :

- Pour l'erreur E : [-4 8]
- Pour la variation de l'erreur DE :[-5 10]
- Pour le rapport cyclique D :[0 1]

III.3.3 La fuzzification

La fuzzification est l'opération de rendre une entrée classique en valeur linguistique. Dans notre cas les variables d'entrées E et DE et la variable de sortie D, sont traduites en concepts linguistique représentées comme des ensembles flous par ce processus. Les fonctions d'appartenance sont appliquées aux mesures et des degrés de vérités sont établis pour chaque proposition. Les fonctions d'appartenance E, DE sont présentés dans les deux figures (III.2 & III.3) .

Remarque : nous avons affecter des valeurs à la sortie D car c'est un contrôleur flou de type Sugeno et dans ce cas les sorties sont des constantes ou des fonctions linéaire des valeurs d'entrées E et DE.

Pour l'entrée E, les valeurs sont :

$$\begin{aligned} NG &= [-4 -4 -3.2 -1] & NP &= [-3.2 -1 -0.3] & ZE &= [-1 -0.3 1.1] \\ PP &= [-0.3 1.1 3] & PG &= [1.1 3 8 8]. \end{aligned}$$

Pour l'entrée DE, les valeurs sont :

$$NG = [-5 -5 -2 0.2] \quad ZE = [-2 0.2 6] \quad PG = [0.2 6 10 10].$$

Pour la sortie D, les valeurs sont :

NG = 0.15

NP= 0.21

ZE= 0.34

PP= 0.75

PG=1.

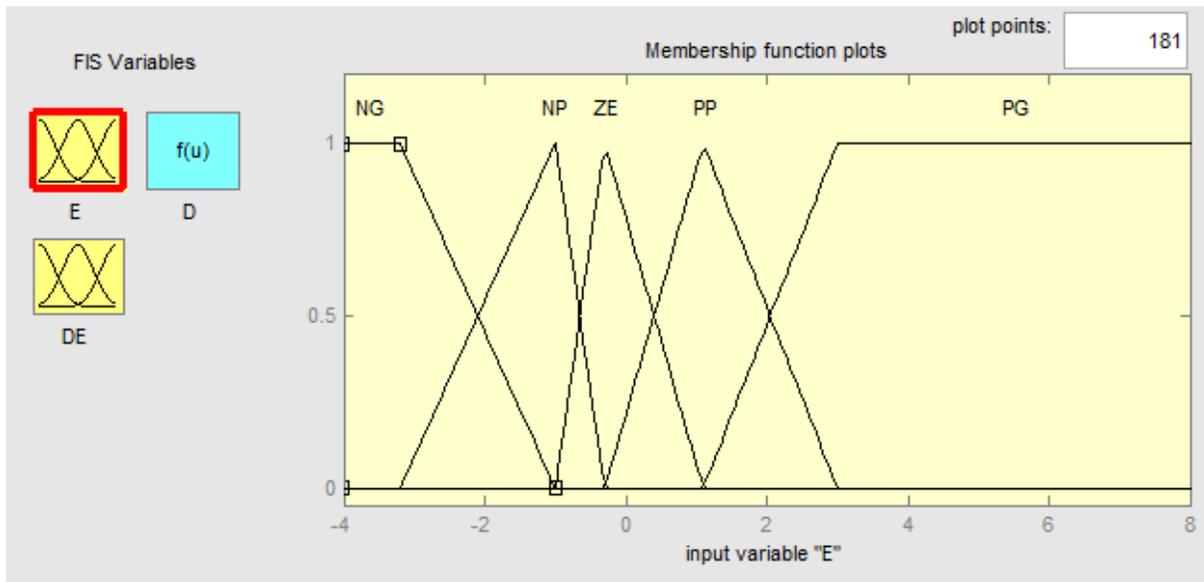


Figure III. 2 : membership functions (E).

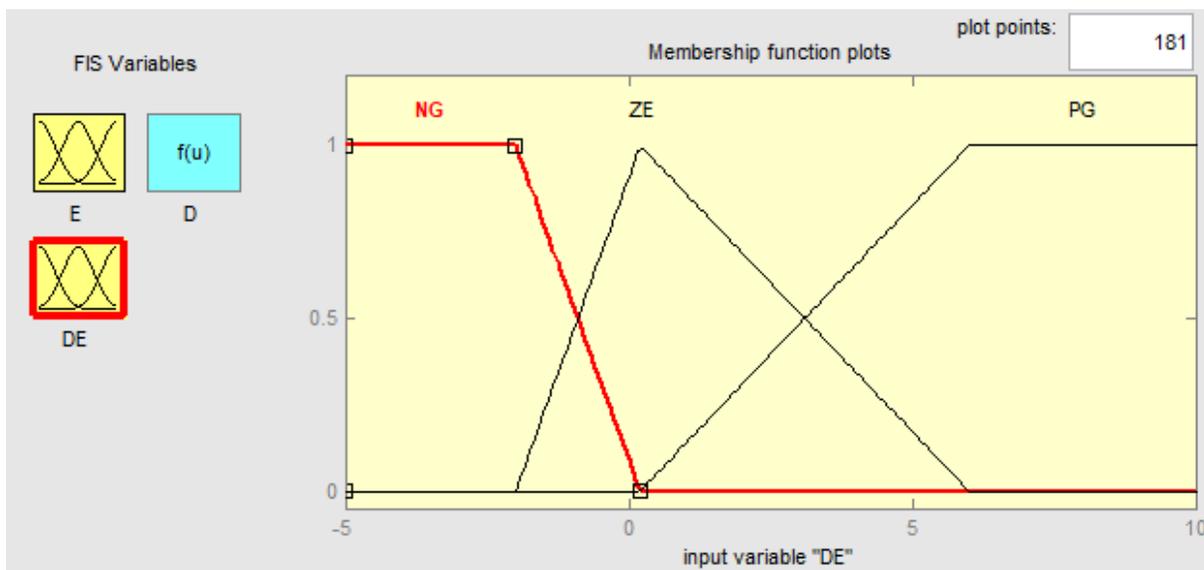


Figure III. 3 : membership functions (DE).

Les termes linguistiques utilisés sont :

NG : Négatif grand

NP : Négatif petit

ZE : Zéro

PP : Positif petit

PG : Positif grand.

III.3.4 Base de règles

Dans notre cas nous avons utilisé la table de règles de Macvicar comme présenté sur le tableau suivant.

Tableau III. 1 : table de Macvicar.

E DE	NG	NP	ZE	PP	PG
NG	NG	NG	NG	NP	ZE
ZE	NG	NP	ZE	PP	PG
PG	ZE	PP	PG	PG	PG

L'interprétation des 15 règles :

Règle n°1 : Si $E = NG \Rightarrow$ (à droite du PPM), et $DE = NG \Rightarrow$ (décroit) alors $D = NG \Rightarrow$ changement de direction et se déplacer vers la gauche (diminuer V).

Règle n°2 : Si $E = NP \Rightarrow$ (à droite du PPM), et $DE = NG \Rightarrow$ (décroit) alors $D = NG \Rightarrow$ changement de direction et se déplacer vers la gauche (diminuer V).

Règle n°3 : Si $E = ZE \Rightarrow$ (au PPM), et $DE = NG \Rightarrow$ (décroit) alors $D = NG \Rightarrow$ changement de direction et revenir au PPM (diminuer V).

Règle n°4 : Si $E = PP \Rightarrow$ (à gauche du PPM), et $DE = NG \Rightarrow$ (décroit) alors $D = NP \Rightarrow$ changement de direction et se déplacer vers la droite (augmenter V).

Règle n°5 : Si $E = PG \Rightarrow$ (à gauche du PPM), et $DE = NG \Rightarrow$ (décroit) alors $D = ZE \Rightarrow$ changement de direction et se déplacer vers la droite (augmenter V).

Règle n°6 : Si $E = NG \Rightarrow$ (à droite du PPM), et $DE = ZE \Rightarrow$ (stable) alors $D = NG \Rightarrow$ pas de changement de direction et se déplacer vers la gauche (diminuer V).

Règle n°7 : Si $E = NP \Rightarrow$ (à droite du PPM), et $DE = ZE \Rightarrow$ (stable) alors $D = NP \Rightarrow$ pas de changement de direction et se déplacer vers la gauche (diminuer V).

Règle n°8 : Si $E = ZE \Rightarrow$ (au PPM), et $DE = ZE \Rightarrow$ (stable) alors $D = ZE \Rightarrow$ pas de changement de direction et pas de déplacement.

Règle n°9 : Si $E = PP \Rightarrow$ (à gauche du PPM), et $DE = ZE \Rightarrow$ (stable) alors $D = PP \Rightarrow$ pas de changement de direction et se déplacer vers la droite (augmenter V).

Règle n°10: Si $E = PG \Rightarrow$ (à gauche du PPM), et $DE = ZE \Rightarrow$ (stable) alors $D = PG \Rightarrow$ pas de changement de direction et se déplacer vers la droite (augmenter V).

Règle n°11: Si $E = NG \Rightarrow$ (à droite du PPM), et $DE = PG \Rightarrow$ (croît) alors $D = ZE \Rightarrow$ pas de changement de direction et se déplacer vers la gauche (continuer à diminuer V).

Règle n°12: Si $E = NP \Rightarrow$ (à droite du PPM), et $DE = PG \Rightarrow$ (croît) alors $D = PP \Rightarrow$ pas de changement de direction et se déplacer vers la gauche (continuer à diminuer V).

Règle n°13: Si $E = ZE \Rightarrow$ (au PPM), et $DE = PG \Rightarrow$ (croît) alors $D = PG \Rightarrow$ revenir au PPM et se déplacer vers la droite (augmenter V).

Règle n°14: Si $E = PP \Rightarrow$ (à gauche du PPM), et $DE = PG \Rightarrow$ (croît) alors $D = PG \Rightarrow$ changement de direction et revenir au PPM (augmenter V).

Règle n°15: Si $E = PG \Rightarrow$ (à gauche du PPM), et $DE = PG \Rightarrow$ (croît) alors $D = PG \Rightarrow$ changement de direction et revenir au PPM (augmenter V).

III.3.5 Déffuzification

A la fin de l'inférence, l'ensemble flou de sortie est déterminé mais il n'est pas directement utilisable pour donner une information précise à l'opérateur ou commander un actionneur.

Il est nécessaire de passer du « monde flou » au « monde réel », c'est la défuzzification. Il existe plusieurs méthodes de défuzzification : centre de gravité de la surface, bissecteur de la surface, moyenne des maximas, plus petits des maximas en valeurs absolue, plus grand des maximas en valeur absolue.

Dans notre étude, nous avons choisi d'utiliser un système (FIS) de type sugeno et les méthode de défuzzification de Sugeno sont wtsum et wtaver (celui utilisé dans notre cas)

```
[System]
Name='TSK'
Type='sugeno'
Version=2.0
NumInputs=2
NumOutputs=1
NumRules=15
AndMethod='prod'
OrMethod='probor'
ImpMethod='prod'
AggMethod='sum'
DefuzzMethod='wtaver'
```

III.4 Test et simulation

III.4.1 Simulation sous les conditions STC

Dans ce cas nous avons effectué une simulation sous les conditions STC c'est-à-dire l'éclairement est fixé à 1000 W/m² et la température à 25°C.

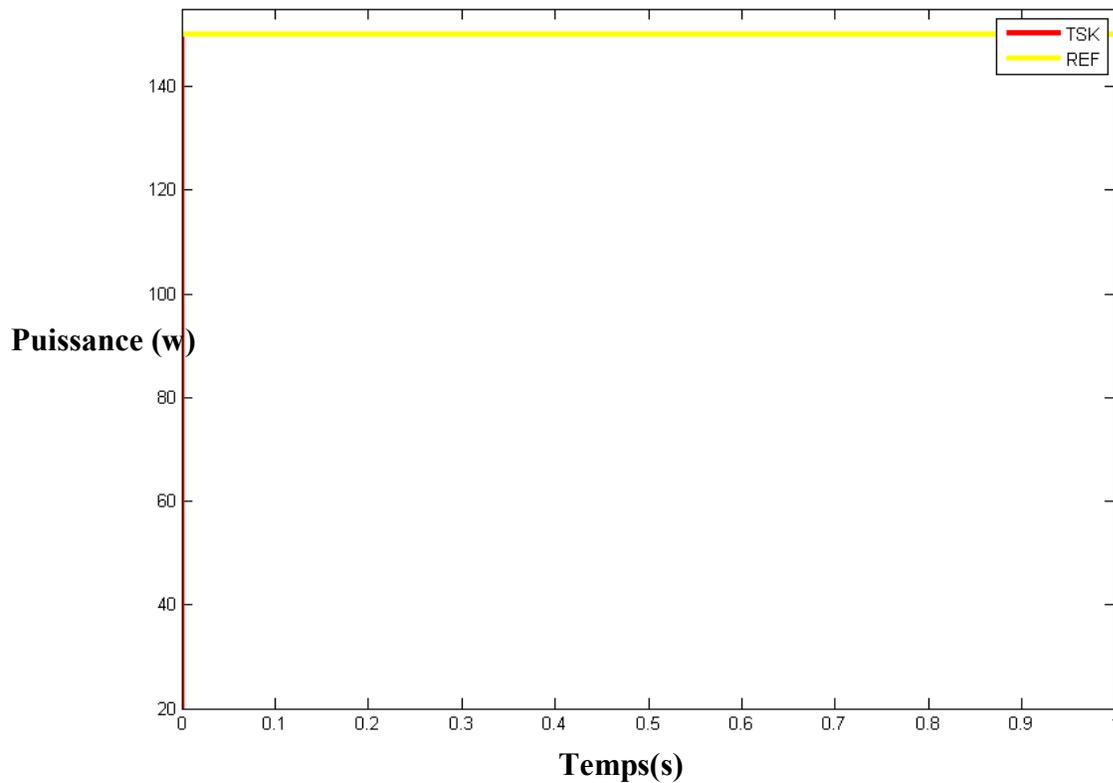


Figure III. 4 : évolution de la puissance sous les conditions STC.

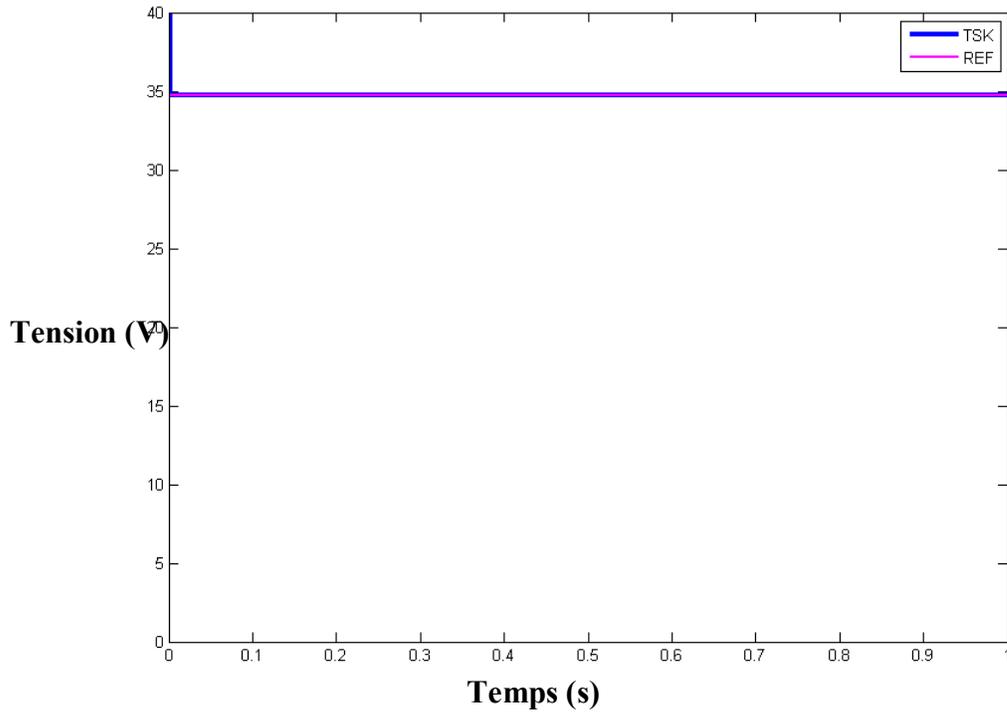


Figure III. 5 : évolution de la tension sous les conditions STC.

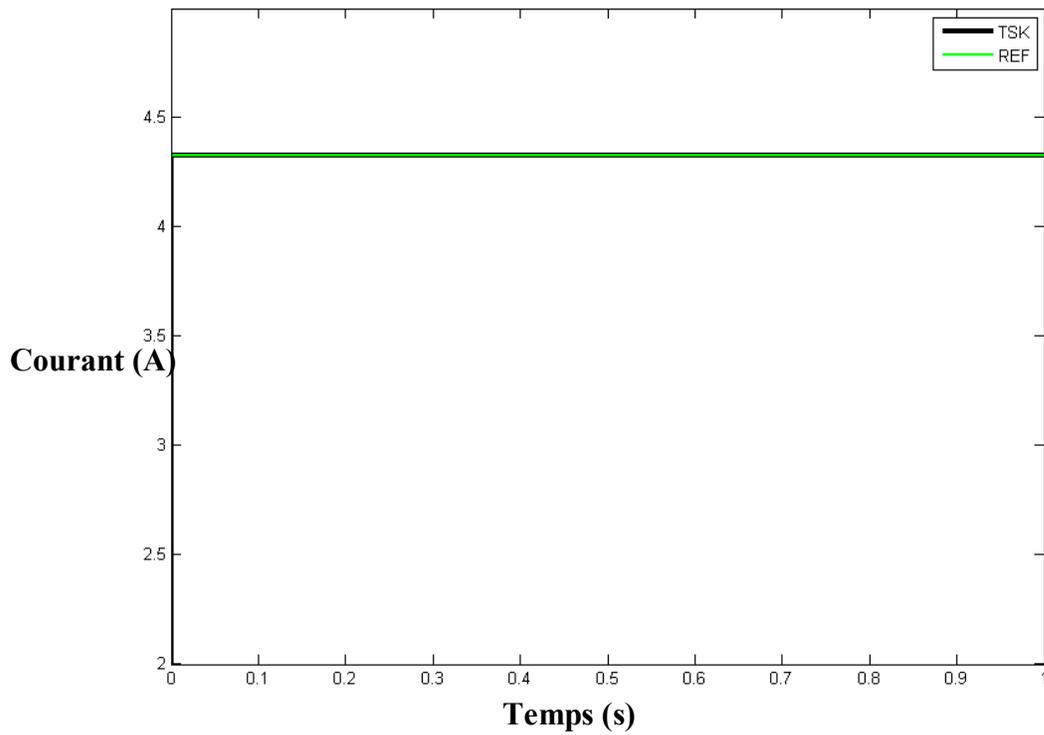


Figure III. 6 : évolution du courant sous les conditions STC.

On remarque sur la figure III.4 que la puissance converge vers le PPM ≈ 150 W, ce qui montre l'efficacité et la robustesse de l'algorithme du signal de la logique floue de type TSK.

Cet algorithme fonctionne au point optimal sans oscillations, en outre, il est caractérisé par un bon comportement au régime transitoire. Cependant l'implémentation de ce type d'algorithmes est plus complexe que les algorithmes classiques, de plus, cette technique dépend du tableau d'inférences.

En ce qui concerne les signaux de tension et du courant, nous constatons la superposition de ces deux derniers aux signaux de références. Ce qui implique le bon fonctionnement du système.

III.4.2 Simulation du fonctionnement sous des conditions atmosphériques variables

Nous avons effectué des simulations avec différentes conditions atmosphérique, on a d'abord varié l'éclairement ensuite la température.

III.4.2.1 Simulation sous des ensoleillements variables

Profile d'ensoleillement variable choisi : ($E=600$ W/m², $E=1000$ W/m², $E=800$ W/m²) et $T=25^{\circ}\text{C}$.

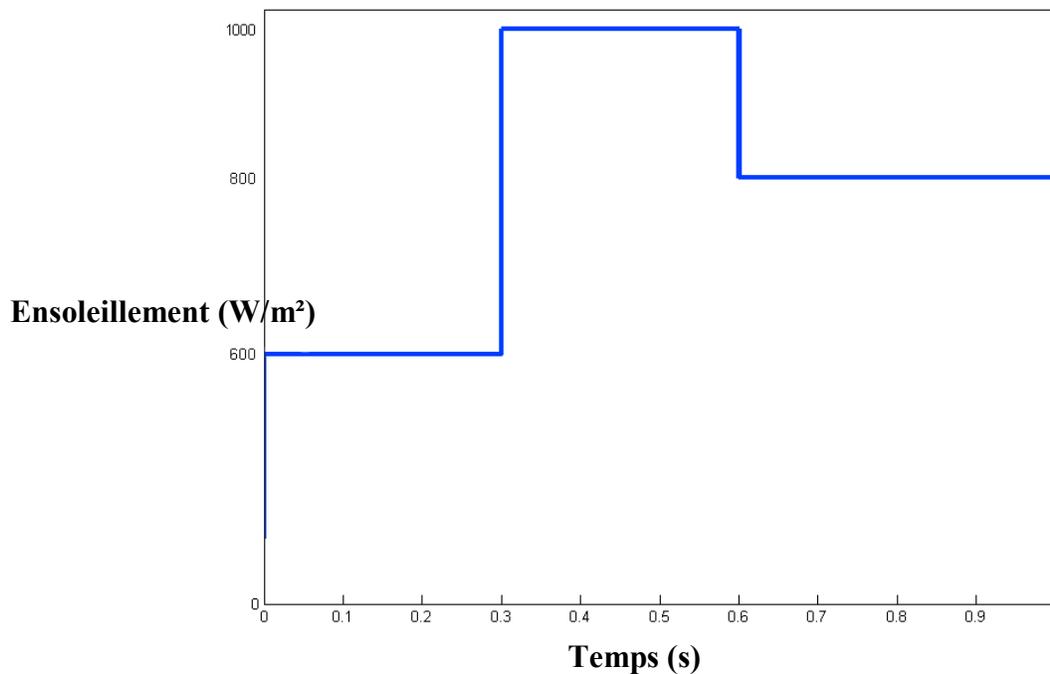


Figure III. 7 : Profile d'ensoleillement variable.

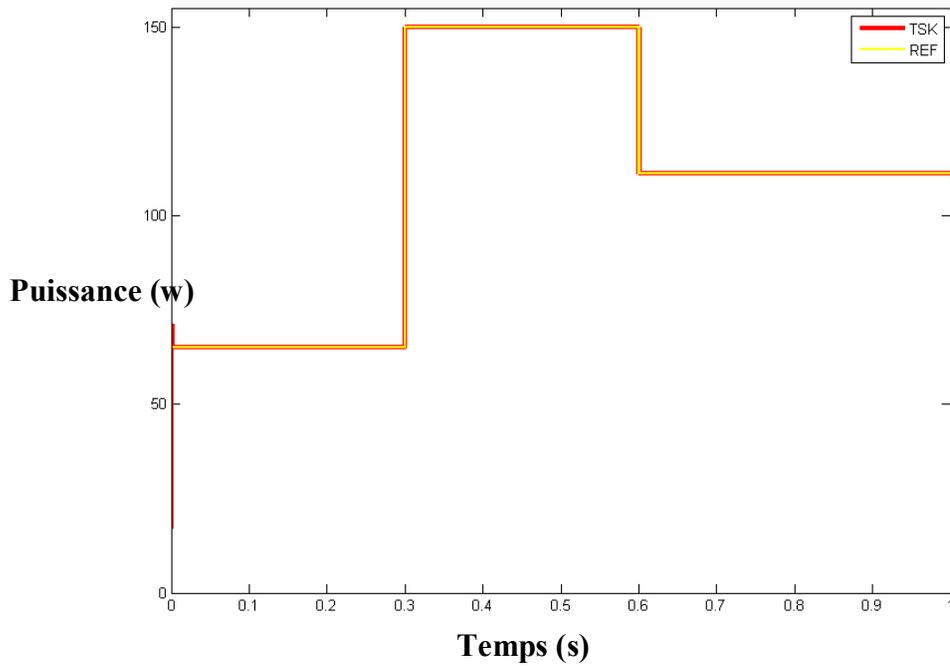


Figure III. 8 : évolution de la puissance sous des ensoleillements variables.

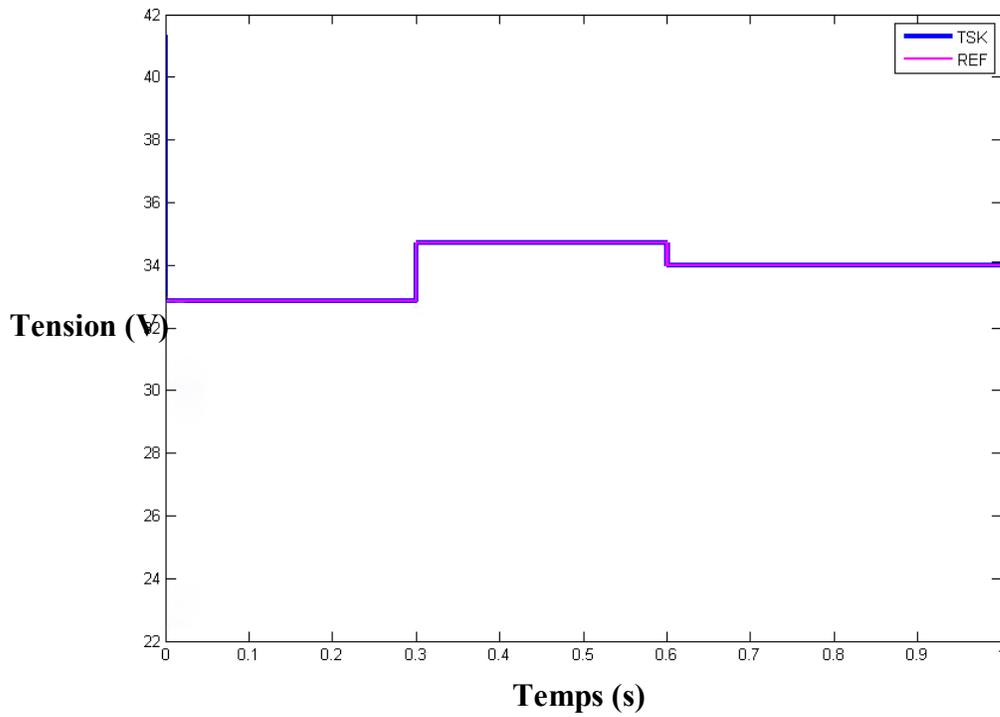


Figure III. 9 : évolution de la tension sous des ensoleillements variables.

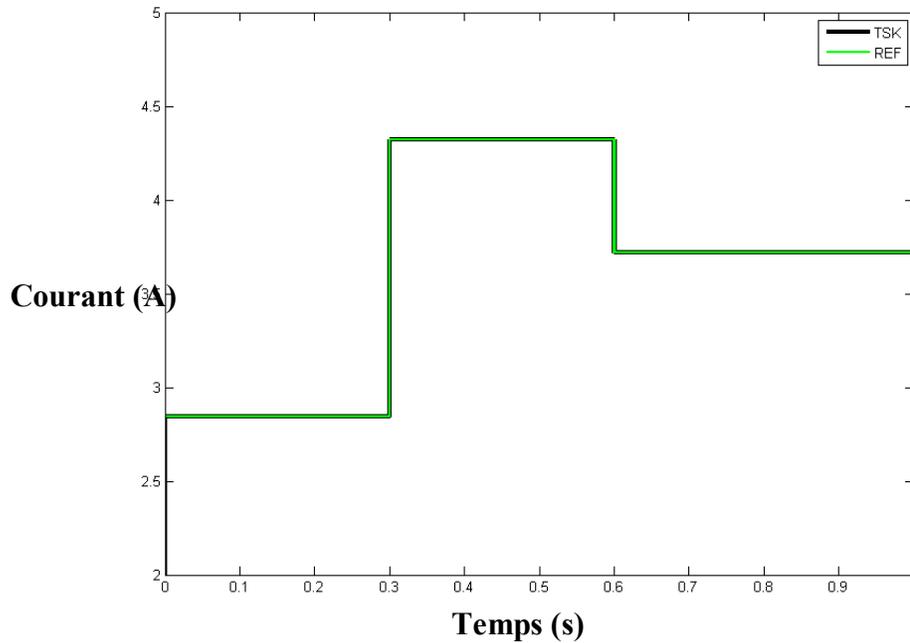


Figure III. 10 : évolution du courant sous des ensoleillements variables.

Pour les séries de tests effectués, nous constatons que le signal du contrôleur floue de type TSK varie le rapport cyclique dans le but de poursuivre le PPM, ce dernier suit la variation de l'ensoleillement et du signal de référence associé.

III.4.2.2 Simulation sous des températures variables

Profil de températures variable choisi : ($T=0^{\circ}\text{C}$, $T=15^{\circ}\text{C}$, $T=40^{\circ}\text{C}$) et $E=1000\text{W}/\text{m}^2$.

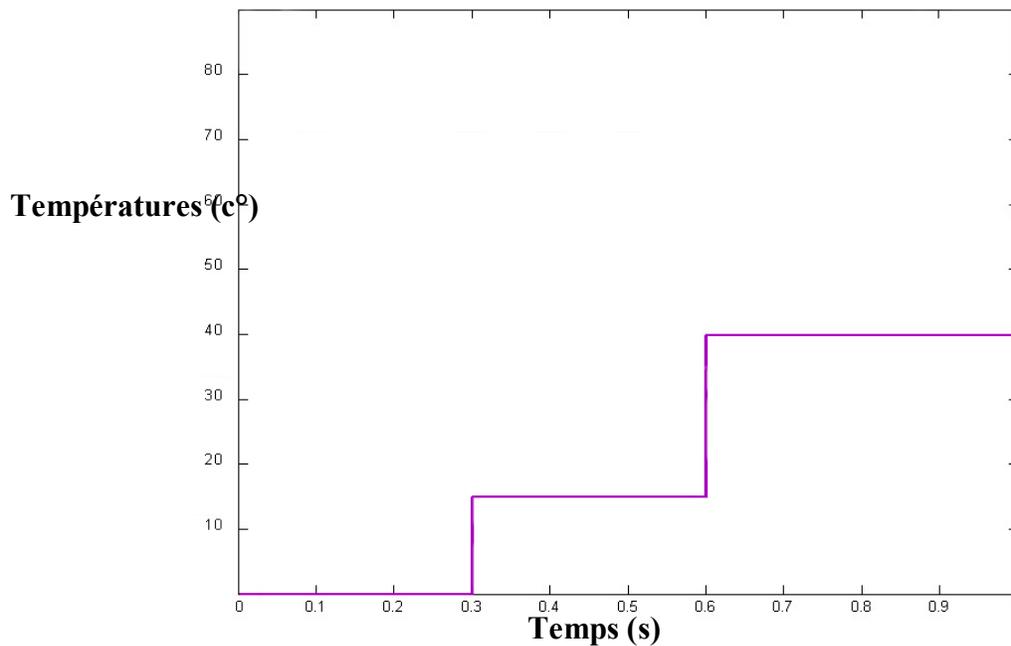


Figure III. 11 : Profil de températures variables.

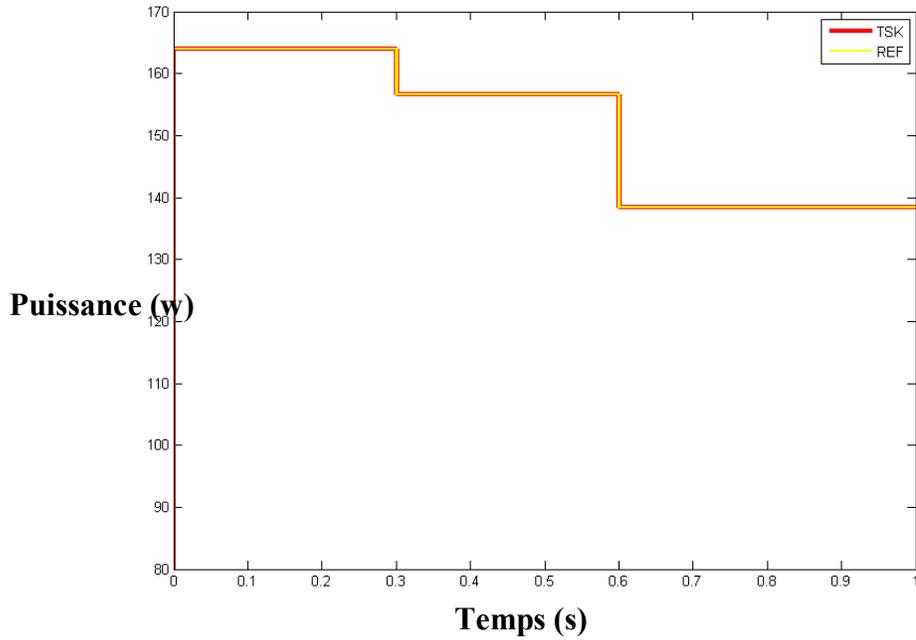


Figure III. 12 : évolution de la puissance sous des températures variables.

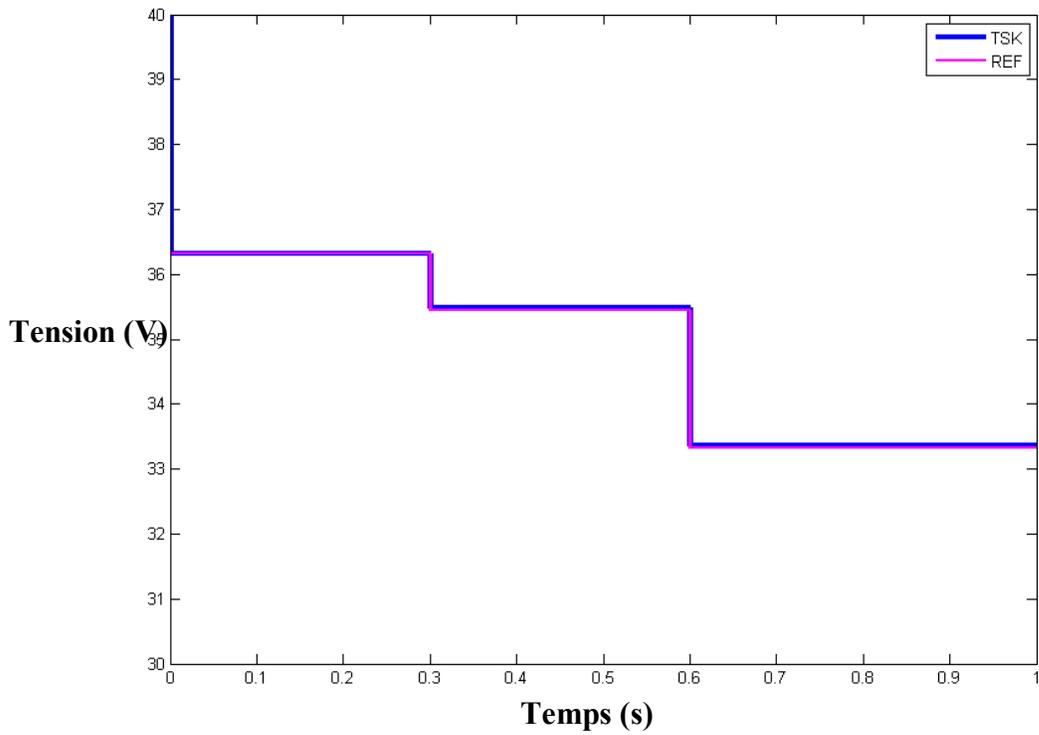


Figure III. 13 : évolution de la tension sous des températures variables.

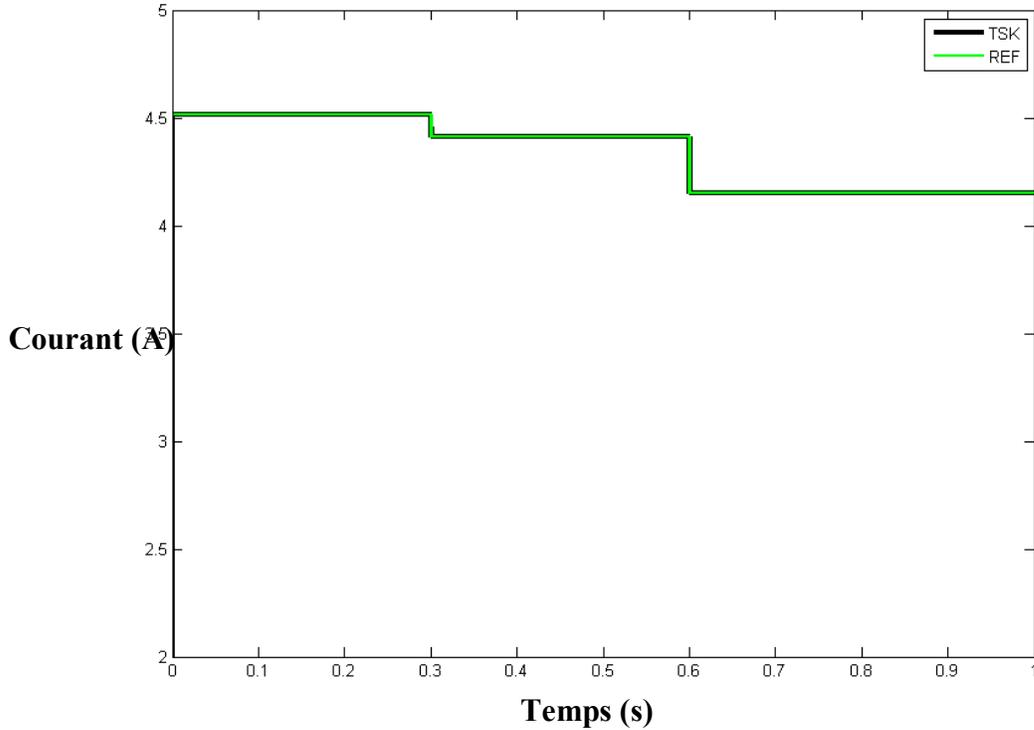


Figure III. 14 : évolution du courant sous des températures variables.

On remarque que la variation de la température n'a pas d'effet sur le courant et la tension, ainsi on observe la stabilité du PPM qui est en superposition avec le signal de référence correspondant à la variation de la température .

III.5 Conclusion

Ce chapitre présente les résultats obtenus lors de la simulation du système PV en utilisant la commande MPPT adapté à un contrôleur flou de type TSK. Le travail a été réalisé sous des conditions standards STC ($T=25^{\circ}\text{C}$ et $G=1000 \text{ w}/m^2$) et variable.

Nous avons effectué une étude comparative entre les résultats obtenus lors de la simulation du système PV_TSK et les signaux de références sous des conditions atmosphériques standards et variables.

Les conditions atmosphériques variables dans cette étude représentent un changement brusque d'ensoleillement et de température. D'après les résultats de simulation obtenus, on remarque que le contrôleur flou de type TSK conduit à d'excellentes performances ce qui implique l'absence de l'erreur. Les résultats obtenus lors de cette étude montrent que la méthode FLC donne de meilleures performances.

CONCLUSION GENERALE

Conclusion générale

Afin d'améliorer l'efficacité des systèmes photovoltaïques, on peut utiliser différents algorithmes de commandes MPPT pour la poursuite du point maximum de puissance. Dans notre travail nous avons opté pour une commande MPPT Flou de type TSK. Ce travail est une contribution pour la compréhension et la mise en place de cette dernière qui nous permet de traquer la puissance maximale à tout moment et sous différentes conditions atmosphériques.

Pour ce faire, nous avons commencé par introduire notre commande au domaine des systèmes photovoltaïque en rappelant quelques notions sur les systèmes de conversion d'énergie photovoltaïque autonome. Nous avons ensuite cité les caractéristiques principales du modèle utilisé. Ainsi nous avons attaqué la modélisation du système photovoltaïque en commençant par le générateur photovoltaïque en observant les caractéristiques du générateur photovoltaïque GPV ainsi que ses performances sous l'influence de quelques paramètres atmosphériques (température et ensoleillement). Puis nous avons détaillé le modèle du convertisseur Boost qui représente l'étage d'adaptation entre le générateur PV et la charge.

L'algorithme basé sur la logique floue est un algorithme robuste et efficace. En effet, cet algorithme fonctionne au point optimal sans oscillations. En outre, il est caractérisé par un bon comportement en état transitoire. Cependant, l'implémentation de ce type d'algorithme est plus complexe que les algorithmes classiques. De plus, l'efficacité de cet algorithme dépend énormément du tableau d'inférence.

La mise en place des simulations, la présentation des résultats obtenus, les discussions et la comparaison ont fait l'objet du dernier chapitre. Ce dernier englobe l'ensemble des simulations développées sous l'environnement Matlab/Simulink d'une part pour la mise en place du système photovoltaïque et d'autre part pour tester l'efficacité et la robustesse de la commande MPPT flou de type TSK faisant l'objet de cette étude.

BIBLIOGRAPHIE

BIBLIOGRAPHIE

- [1] : **Jean jacques, Beziane** (18 Nov.2012) – L'énergie solaire.
- [2] : **V. Boitier, C. Alonso**, (2013) Mémoire Pour l'obtention du titre de MAGISTER Option : Physique énergétique
- [3] : **M. Bouafia, & L. Deblaoui**, Modélisation et simulation d'une cellule solaire en couche mince à base de diséléniure de Cuivre, d'Indium et de Gallium (CIGS), Université Kasdi Merbah. Ouargla.
- [4] : **Hua, C., Lin, J., & Shen, C. (1998)**. Implementation of a DSP-controlled photovoltaic system with peak power tracking. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 45(1), 99-107.
- [5] : **Rébecca Bou; Anna Brochier ; Diane Pavat ; Mylène Robin**. Les différentes générations de cellules photovoltaïques.
- [6] : **I. HADJ MAHAMMED “ Modélisation du Générateur Photovoltaïque “** Mémoire de Magister en électricité solaire. Ecole Nationale Polytechnique - El-Harrach 2002
- [7] : **M. ORGERET “ Les piles solaires, le composant et ses applications “** édition MASSON 1985.
- [8] : **J.David I,Muhammad H.Rashid**: Power electronics Handbook. University of West Florida Joint Program and Computer Engineering, Copyright 2001By ACADEMIC & Sons Ltd.2003
- [9] : **Cabal, C. (2008)**. Optimisation énergétique de l'étage d'adaptation électronique dédié à la conversion photovoltaïque (Doctoral dissertation, Université de Toulouse)
- [10] : **T. Takagi et M. Sugeno**, « Fuzzy identification of systems and its application to modelling and control », IEEE Trans. on Systems Man and cybernetics, vol. 15 no. 1, pp. 116-132, 1985.
- [11] : **Habib Hamdi** « Approche Multi-Modèle pour l'Observation d'état et le Diagnostic des Systèmes Singuliers Non Linéaires ». Automatique / Robotique. Ecole Polytechnique de Tunis, 2012. Français.
- [12] : **Djamel OUNNAS** « Commande d'une machine synchrone à aimants permanents via des modèles flous de Takagi-Sugeno » Mémoire de Master Université de Biskra, 2011.

[13] : **Mohamed Yacine HAMMOUDI** « Contribution à la commande et à l'observation dans l'association convertisseurs machine » Thèse de Doctorat ; Université de Biskra, 2015.

[14] : **Abrar ALLAG** « Commande et synthèse des observateurs non linéaires dédiés aux entraînements électriques avec défauts » Thèse de Doctorat Université de Biskra , 2018.

[15]: **Y.Morère** « Mise en œuvre de loi de commandes pour les modèles flous de type Takagi-Sugeno » Thèse de doctorat, Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis, Valenciennes, France, 2001.

[16] :**Panigrahi, A., Bhuyan, K. C.** (2017). Fuzzy Logic Based Maximum Power Point Tracking Algorithm for Photovoltaic Power Generation System. Journal of Green Engineering. Vol. 6, N. 4, pp. 403–426.