

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Abderrahmane Mira
Faculté de Technologie



Département d'Automatique, de Télécommunication et d'Electronique

Projet de Fin d'étude

Pour l'obtention du diplôme de Master

Filière : Automatique

Spécialité : Automatique et Informatique Industrielle

Thème

Commande MPPT basée sur le contrôleur flou de type 2 sur un système de conversion d'énergie photovoltaïque autonome

Préparé par :

M. RAMDANI Iles
M. SADOK Yanis

Examiné par :

Mr MENDIL
Mr KACIMI

Dirigé par :

Mr F. YAHIAOUI

Année universitaire : 2021/2022

Remerciements

Nous tenons tout d'abord à remercier ALLAH le tout puissant et miséricordieux, qui nous a donné la force et la patience d'accomplir ce modeste travail.

Nous exprimons notre profonde gratitude et nos sincères remerciements à notre encadrant « Mr. F. YAHIAOUI », pour ses précieux conseils, ses orientations et ses remarques constructives durant toute la période du travail.

Nos vifs remerciements vont également aux membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre recherche en acceptant d'examiner notre travail, et de l'enrichir par leurs propositions.

Enfin, nous tenons également à remercier toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Dédicaces

Nous dédions ce travail à :

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

RAMDANI Iles

SADOK Yanis

Table des matières

Chapitre 1 : Système de conversion d'énergie photovoltaïque autonome.

I.1	Introduction.....	3
I.2	Système de conversion d'énergie photovoltaïque.....	3
I.2.1	Système autonome [9].....	3
I.2.2	Système connecté au réseau.....	5
I.2.3	Système hybride.....	5
I.3	Système de conversion d'énergie PV autonome [10].....	6
I.4	Cellule photovoltaïque.....	8
I.4.1	Technologie des cellules solaires.....	8
I.5	Panneau PV.....	10
I.5.1	Types de configuration des cellules PV.....	11
I.5.2	Caractéristiques électriques du panneau.....	12
I.5.3	Simulation du panneau PV aux condition STC.....	13
I.5.4	Simulation de l'influence du l'éclairement.....	14
I.5.5	Simulation de l'influence de la température.....	15
I.6	Convertisseur de puissance élévateur (boost).....	17
I.6.1	Principe de fonctionnement.....	17
I.7	Commande MPPT.....	20
I.7.1	Principe de la commande MPPT.....	20
I.7.2	Méthodes de la commande MPPT.....	21
I.8	Conclusion.....	24

Chapitre II : La logique Floue Type-2-

1.1	Introduction.....	25
1.2	Logique floue.....	25
1.2.1	Définition de la logique floue.....	25
1.3	Contrôleur flou type-2.....	26
1.3.1	Contrôleur à la logique floue type 02.....	26
1.3.2	Structure d'un contrôleur flou de type-2.....	29
1.3.3	Fuzzification.....	30
1.3.4	Base de règles.....	32
1.3.5	Inférence.....	33
1.3.6	Le module de traitement de la sortie.....	35
1.3.6.1	Réducteur de type.....	35
1.3.6.2	Défuzzification.....	38

Table des matières

1.4 Conclusion.....	39
Chapitre 3 : Test et simulation.	
III.1 Introduction	39
III.2 Description du système PV autonome	39
III.2.1 Description du contrôleur MPPT flou type 02 basé sur la commande MPPT	40
III.2.1.1 Variables du contrôleur flou.....	40
III.2.1.2 Univers de discours des variables du contrôleur	40
III.3 Fuzzification.....	41
III.4 Inférence.....	42
III.5 Réduction de type défuzzification.....	45
III.6 Testsimulation.....	45
III.6.1 Simulation sous des conditions STC.....	45
III.6.2 Tests de fonctionnement sous des conditions atmosphériques variables	49
III.6.2.1 Variation de l'éclairement.....	49
III.6.2.2 Variation de la température	53
III.7 Conclusion.....	56

Liste de figures

Figure I. 1: Pompage au fil du soleil	4
Figure I. 2 : Systèmes autonomes avec stockage	4
Figure I. 3: Systèmes photovoltaïque connectés au réseau.	5
Figure I. 4: Système photovoltaïque hybride.....	6
Figure I. 5: Les différents types de systèmes photovoltaïques autonomes.....	7
Figure I. 6: cellule photovoltaïque.....	8
Figure I. 7: types de cellules photovoltaïques	10
Figure I. 8: Exemple de panneau photovoltaïque	10
Figure I. 9: Un schéma d'un groupement en série de N_s cellules identiques.....	11
Figure I. 10: Un schéma d'un groupement en parallèle de N_p cellules identiques	12
Figure I. 11: Caractéristiques $P=f(V)$	13
Figure I. 12: Caractéristiques $I=f(V)$	13
Figure I. 13: Influence de l'irradiation sur les Caractéristiques $P=f(V)$	14
Figure I. 14: Influence de l'irradiation sur les Caractéristiques $I=f(V)$	15
Figure I. 15: Influence de la température sur les caractéristiques $P=f(V)$	16
Figure I. 16: Influence de la température sur les caractéristiques $I=f(V)$	16
Figure I. 17: Circuit électrique de base d'un hacheur élévateur	17
Figure I. 18: Schéma du Boost pour le cas de l'interrupteur S fermé	18
Figure I. 19: Schéma du Boost pour le cas de l'interrupteur K ouvert.....	19
Figure I. 20: Chaîne de conversion d'énergie solaire comprenant une commande MPPT	20
Figure I. 21: Principe de la commande MPPT	21
Figure I. 22: Algorithme MPPT P&O.	22
Figure I. 23: Principe de la MPPT avec la méthode IC.....	23
Figure I. 24: Algorithme Conductance Incrémentale	23
Figure II. 1: Représentation schématique d'un ensemble flou type-2 gaussien.....	28
Figure II. 2: Représentation schématique d'un ensemble flou type-2 intervalle.....	29
Figure II. 3: Structure de base d'un contrôleur à la logique floue de type-2.....	30
Figure II. 4: Fonction d'appartenance triangulaire type 2.	32
Figure II. 5: Fonction d'appartenance à fuzzifier.....	33
Figure II. 6: Deux fonctions d'appartenance à fuzzifier.....	34
Figure II. 7: Ensemble flou de sortie pour chaque règle.....	35
Figure II. 8: Structure de traitement de la sortie	35
Figure II. 9: Opérations du traitement de sortie d'un système flou type-2.....	36
Figure III. 1: Modélisation d'un SPV avec MPPT sous MATLAB\SIMULINK.....	39
Figure III. 2 : Schémas des trois simulations.....	40

Liste de figures

Figure III. 3: les fonctions d'appartenance pour E_r	43
Figure III. 4: les fonctions d'appartenance pour ΔE_r	43
Figure III. 5: Evolution de la puissance du GPV	46
Figure III. 6: zoom sur l'évolution de la puissance du GPV.	47
Figure III. 7: Evolution de la tension du GPV	47
Figure III. 8: zoom sur l'évolution de la tension du GPV.	48
Figure III. 9: l'évolution du courant du GPV	48
Figure III. 10: zoom sur l'évolution de courant du GPV.	49
Figure III. 11: Profil d'ensoleillement injecté dans le GPV.	50
Figure III. 12: Evolution de la puissance en cas de changement brusque d'ensoleillement.....	51
Figure III. 13: zoom sur l'évolution de la puissance en cas de changement brusque d'ensoleillement	51
Figure III. 14: Evolution de la tension en cas de changement brusque d'ensoleillement.....	52
Figure III. 15: Zoom sur l'évolution de la tension en cas de changement brusque d'ensoleillement	53
Figure III. 16: Evolution du courant en cas de changement brusque d'ensoleillement.....	53
Figure III. 17: Zoom sur l'évolution du courant en cas de changement brusque d'ensoleillement	54
Figure III. 18: Profil de température injecté dans le GPV	55
Figure III. 19: Evolution de la puissance en cas de changement brusque de la température ...	55
Figure III. 20: Zoom sur l'évolution de la puissance en cas de changement brusque de la température	56
Figure III. 21: Evolution de la tension en cas de changement brusque de la température	56
Figure III. 22: Evolution du courant en cas de changement brusque de la température.....	57

Liste de tableaux

Tableau I. 1: Caractéristiques électriques du panneau PV BP SX3190B en conditions standards.....	12
Tableau II. 1 : Les fonctions d'appartenance triangulaires, gaussiens et trapézoïdaux de type 2.....	31
Tableau II. 2 : Méthodes de réduction de type	36
Tableau III. 1: Règles d'inférence du contrôleur MPPT flou.....	43

Liste des abréviations et des symboles

EPV	Energie photovoltaïque
CS	Convertisseur statique
CPV	Cellule photovoltaïque
DC	Courant Continu (Direct Current).
FLC	Fuzzy Logic Controller
GPV	Générateur Photovoltaïque.
G	Irradiation (w /m^2)
INC	Incrémental conductance
I_{L_on}	Courant de la bobine pendant la phase de fermeture [A]
I_{L_off}	Courant de la bobine pendant la phase d'ouverture.
I_{L_min}	Courant de la bobine au début de la phase de fermeture [A]
I_{L_max}	Courant de la bobine max.
S	Constant de Boltzmann (J/k)
L	L'inductance de la bobine [H]
MPPT	Maximum Power Point Tracking.
N_s	Nombre de cellules connectées en série.
N_p	Nombre de cellules connectées en parallèle
PV	Photovoltaïque
PPM	Point de puissance maximale
P&O	Perturbation et Observation.
Si	Silicium
Ge	Germanium
Se	Sélénium
GaAs	Arséniure de gallium
CdTe	Tellure de Cadmium
CdS	Sulfure de Cadmium
I_{cc}	Courant circulant dans chaque cellule
I	Courant circulant dans l'assemblage
VPPM	Tension au point de puissance maximale[V]
IPPM	Courant au point de puissance maximale[A]
T_{on}	Temps de la phase d'ouverture [s]
T_{of}	Temps de la phase de fermeture [s]
MF	Membership function

Liste des abréviations et des symboles

FOU	Footprint Of Uncertainty
FAS	Fonction d'appartenance supérieure
FAI	Fonction d'appartenance inférieure
FL	Fuzzy Logic
EFT_1	Ensemble flou type 1
EFT_2	Ensemble flou type 2

Introduction générale

Introduction générale

En raison de la croissance rapide de la population, la consommation mondiale d'énergie a augmenté. Cette croissance aura un impact énorme sur la demande énergétique. Avec la diminution du stock mondial d'hydrocarbures d'origine fossile (pétrole, gaz et charbon), les énergies renouvelables (éolienne, hydraulique, géothermique, solaire, biomasse...) se développent de plus en plus. Elles ont le double avantage d'utiliser des flux inépuisables d'énergie naturelle (soleil, vent) et de ne pas, ou peu, nuire à l'environnement. Avec l'apparition de nouvelles technologies d'exploitation des énergies renouvelables, le monde peut passer à la transition énergétique.

L'énergie renouvelable fait référence à l'énergie du soleil, du vent, de la chaleur de la terre, de l'eau ou même de la biomasse. Contrairement aux combustibles fossiles, les énergies renouvelables sont une source d'énergie aux ressources illimitées. L'énergie solaire photovoltaïque est l'une des sources d'énergie renouvelable les plus utilisées. Il s'agit de la conversion directe du rayonnement électromagnétique en électricité grâce à l'effet photovoltaïque. Les panneaux photovoltaïques (PV) ont la capacité de convertir les photons en électrons. L'énergie sous forme de courant continu peut donc être utilisée directement. En raison des cellules photovoltaïques et de leurs propriétés électriques hautement non linéaires associées, l'efficacité des systèmes photovoltaïques peut être augmentée par des solutions utilisant la technologie de suivi du point de puissance maximale (dite en anglais technologie MPPT).

MPPT comme son nom l'indique, traque le point de puissance maximale (PPM) dans le temps et permet de la sorte de tirer le maximum de puissance disponible dans le panneau PV. Dans la littérature, deux méthodes MPPT sont citées ; qui sont les méthodes classiques et intelligentes. Les méthodes classiques [1][2] sont des méthodes basées sur la recherche de l'extremum de la courbe de puissance obtenue directement de la caractéristique du panneau PV [3][4].

Les méthodes intelligentes les plus citées dans la littérature sont les réseaux de neurones [5] et les contrôleurs à la logique floue [6]. Les réseaux de neurones sont des réseaux fortement connectés de processeurs élémentaires fonctionnant en parallèle. Chaque processeur élémentaire calcule une sortie unique sur la base des informations qu'il reçoit. Ils infèrent des propriétés émergentes permettant de solutionner les problèmes jadis qualifiés de complexes.

La logique floue est une logique qui substitue à la logique binaire une logique fondée sur des variables pouvant prendre, outre les valeurs (vrai 1) ou (faux 0), les valeurs intermédiaires

« vrai » ou « faux » avec une certaine probabilité (un certain degré d'appartenance). Il existe deux types de logique floue type 1 et 2. L'ensemble floue type 2 peut mieux modéliser les incertitudes grâce à son grade qui est un intervalle contrairement au système floue type 1 qui est un nombre absolu. Mendel [7] a également montré que le système floue type 2 est un modèle scientifiquement correct pour modéliser les incertitudes linguistiques, alors que le système floue type 1 ne l'est pas. L'utilisation de système floue type 2 pour représenter les entrées et les sorties dans la commande floue entraînera une réduction de la base de règles par rapport à l'utilisation de système floue type 1.

L'objectif de ce travail est de concevoir un contrôleur flou de type 02 basé sur la méthode de poursuite du PPM à chaque instant de variation des conditions météorologiques (l'irradiance et la température). Le système de conversion d'énergie PV étudié est un système PV autonome sans stockage électrochimique (batterie).

Le contenu de notre travail est structuré en trois chapitres détaillés comme suit :

Le premier chapitre est consacré à la présentation brièvement des systèmes de conversion d'énergie PV, et ensuite des détails sur le système PV autonome étudiés.

Le second chapitre est consacré aux notions de base de la logique floue, et au contrôleur flou de type 02.

Le troisième chapitre est consacré aux différentes simulations telles que tester sous les conditions STC, tester sous les conditions de variation de l'irradiation en fixant la température à 25°C et tester sous les conditions de variation de la température en fixant l'irradiation à 1000W/m².

Une fois que les résultats sont discutés dans le chapitre 03, le travail est clôturé par une conclusion générale et perspective.

Chapitre I : Système de conversion d'énergie photovoltaïque autonome

Chapitre 1 : Système de conversion d'énergie photovoltaïque autonome

I.1 Introduction

Les énergies renouvelables sont des sources dont le renouvellement naturel est assez rapide pour qu'elles puissent être considérées comme inépuisables à l'échelle, largement disponibles, essentiellement gratuites, et répondant à certaines exigences environnementales à l'échelle humaine. Elles peuvent être converties, selon les besoins, en électricité.

L'énergie solaire photovoltaïque (ou énergie photovoltaïque ou EPV) est une énergie électrique produite à partir du rayonnement solaire grâce à des panneaux ou des centrales solaires photovoltaïques, basée sur l'effet photoélectrique. Cela permet de générer du courant continu à partir du rayonnement électromagnétique, qui est la conversion de la lumière en électricité (conversion photovoltaïque) au moyen de cellules solaires.

La conversion photovoltaïque est la transformation directe de l'énergie solaire en énergie électrique.

Dans ce chapitre on va décrire brièvement les systèmes de conversion d'énergie photovoltaïque, les cellules solaires les plus utilisées. Les caractéristiques, les différents paramètres et les simulations d'un panneau photovoltaïque, vers la fin nous allons vous présenter le convertisseur élévateur (boost) et la commande MPPT.

I.2 Système de conversion d'énergie photovoltaïque

Les systèmes photovoltaïques sont généralement divisés en trois types : les systèmes autonomes, les systèmes hybrides et les systèmes connectés au réseau.

I.2.1 Système autonome [9]

Les systèmes PV autonomes ou isolés se sont les installations PV destinées à alimenter des utilisateurs situés dans des zones inaccessibles ou dans le cas d'utilisateurs à très faible consommation d'énergie, ce qui rend peut rentable le raccordement au réseau électrique

national. On distingue deux types de systèmes autonomes :

- **Système autonome sans stockage**

L'installation alimentée ne fonctionnera qu'en présence de lumière, et dès que l'éclairement est suffisant pour atteindre la puissance demandée. Ce type de système est intéressant pour toutes les applications qui n'ont pas besoin de fonctionner dans l'obscurité, et pour lesquelles le besoin en énergie coïncide avec la présence de lumière.

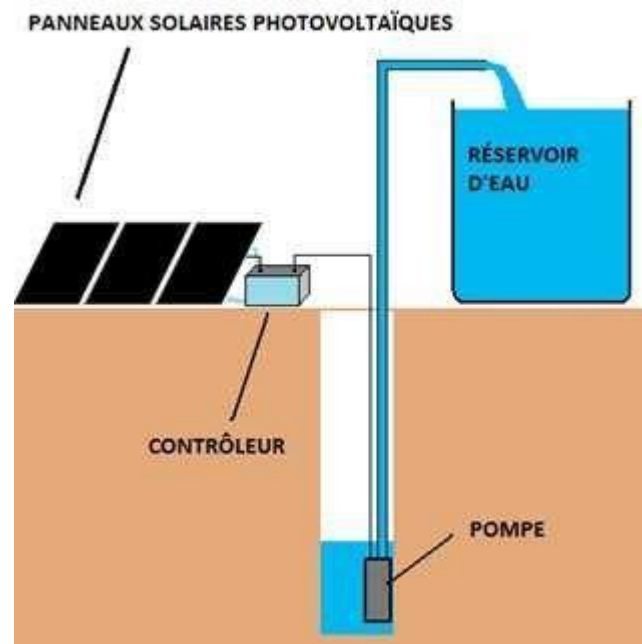


Figure I. 1: Pompage au fil du soleil.

- **Systèmes autonomes avec 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 emmagasiner l'énergie durant la présence de l'excès d'énergie photovoltaïque et de la restituer durant les autres périodes d'insuffisance d'énergie.

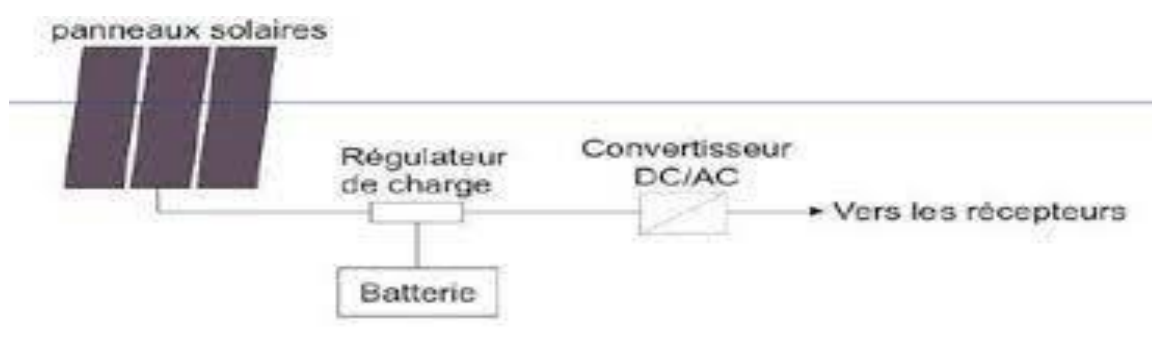


Figure I. 2 : Systèmes autonomes avec stockage

I.2.2 Système connecté au réseau

Il produit sa propre électricité et envoie l'énergie excédentaire à un réseau à proximité, il y puise au besoin ces transferts élimine les achats et entretenir une batterie. Il est toujours possible d'utiliser ces systèmes pour servir d'alimentation de secours en cas de panne de courant [11].

L'installation de ce système se compose de trois éléments essentiels qui sont :

- Les panneaux photovoltaïques
- Un onduleur synchrone qui transforme le courant pour qu'il soit compatible avec les caractéristiques du réseau. C'est "l'interface" entre l'installation et la compagnie d'électricité.
- Un compteur d'énergie (en fait, en général, deux compteurs dans le cas des installations décentralisées).

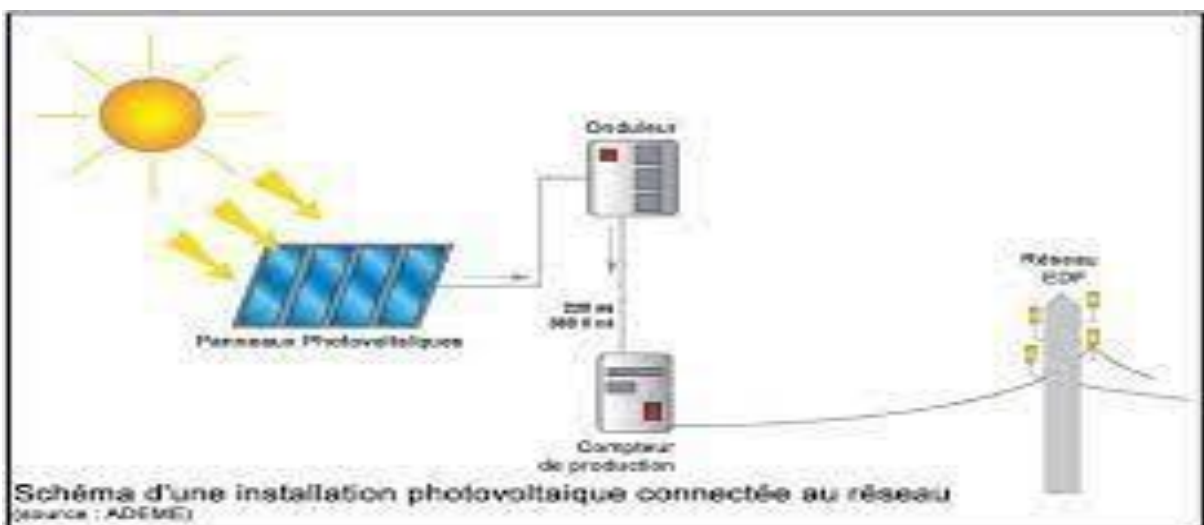


Figure I. 3: Systèmes photovoltaïque connectés au réseau.

I.2.3 Système hybride

Un système qui consiste à utiliser un générateur PV en association avec d'autres sources d'énergie, tels que le réseau électrique, groupe électrogène, et l'éolienne pour répondre au besoin électrique de la charge est un système photovoltaïque hybride [12].

Les systèmes d'énergie hybride sont généralement autonomes par rapport aux grands réseaux interconnectés et sont souvent utilisés dans les régions isolées.

Le but d'un système PV hybride est de faire fonctionner des appareils sans aucune interruption et pour cela on utilise un convertisseur hybride qui peut recevoir deux sources d'énergie différentes, et d'inverser si l'une des sources est défaillante.

Il permet également de stocker l'énergie et de la restituer autrement.

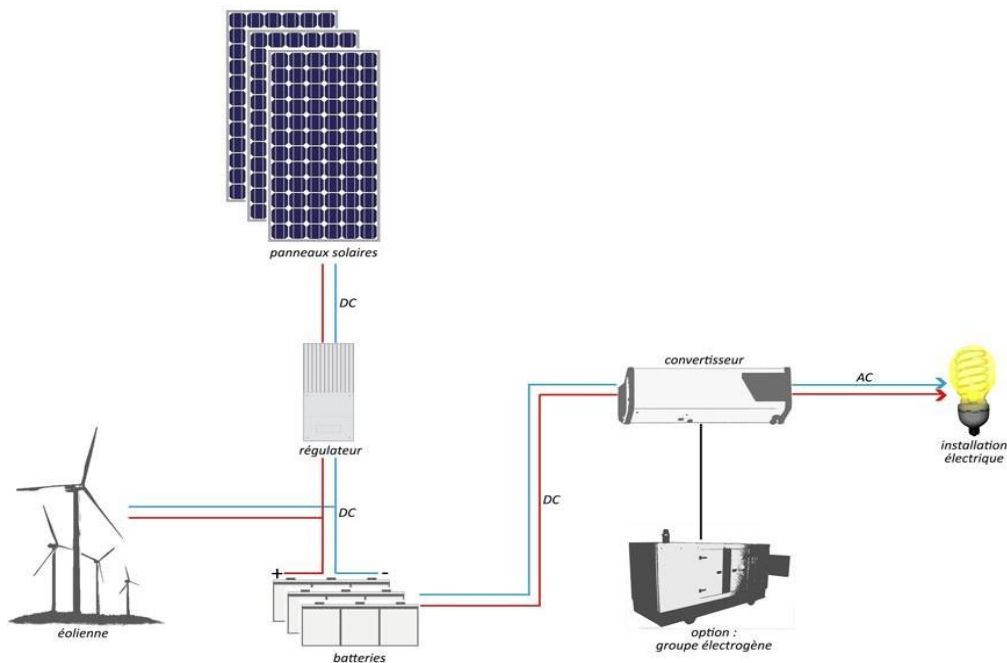


Figure I. 4: Système photovoltaïque hybride.

I.3 Système de conversion d'énergie PV autonome [10]

Ces systèmes photovoltaïques sont installés pour assurer un fonctionnement autonome sans recours à d'autres sources d'énergie. Généralement, ces systèmes sont utilisés dans les régions isolées et éloignées du réseau. Les différents types de systèmes photovoltaïques autonomes sont décrits sur la figure I.5 qui traduit les différentes possibilités offertes : couplage direct à une charge adaptée ou couplage avec adaptateur d'impédance MPPT (Maximum Power Point Tracking), fonctionnement au fil du soleil ou avec stockage d'énergie électrique.

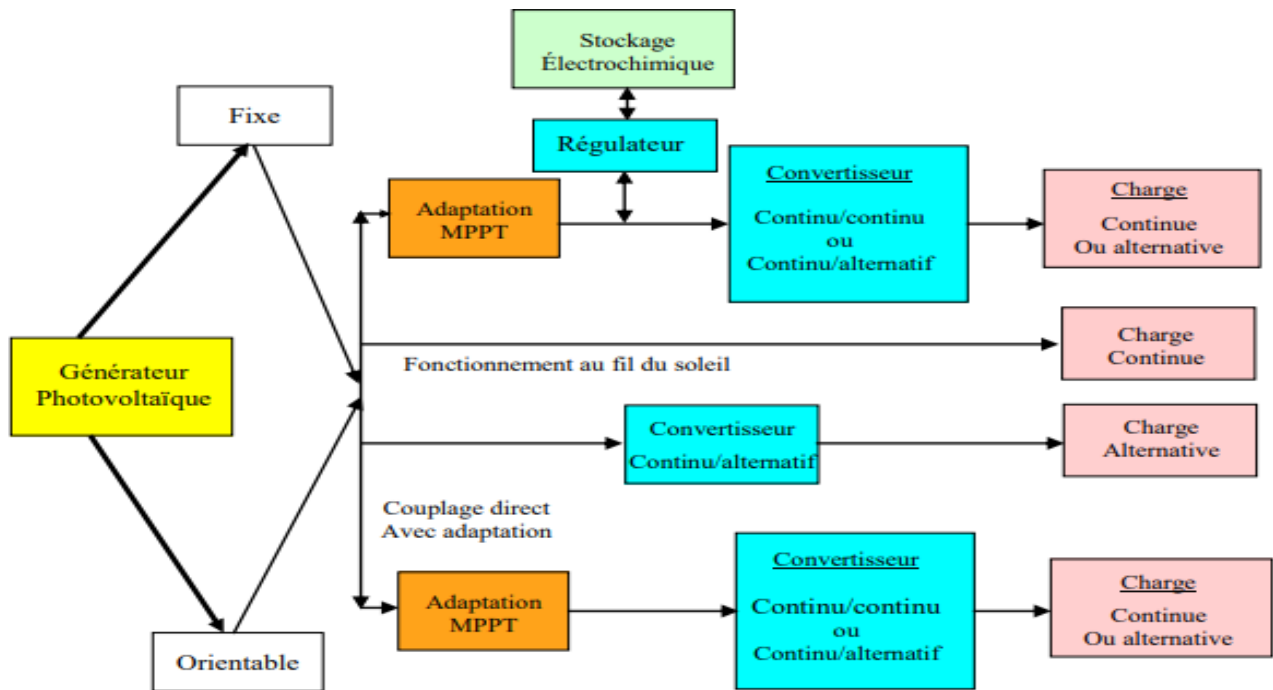


Figure I. 5: Les différents types de systèmes photovoltaïques autonomes.

Le couplage direct implique un fonctionnement au fil du soleil, donc à puissance essentiellement variable au cours de la journée. Les charges typiques à courant continu qui peuvent satisfaire le critère (tension constante à puissance variable) sont les accumulateurs électrochimiques. Les charges alternatives sont les pompes à eau, c'est le pompage au fil du soleil, le stockage est néanmoins présent sous la forme d'eau emmagasinée (dans un réservoir).

Dans la plupart des cas, une adaptation d'impédance doit être réalisée en insérant entre le générateur et sa charge électrique un dispositif électronique qui permet de forcer le système à fonctionner à sa puissance maximale.

Le pompage au fil **Figure I.1** du soleil permet d'avoir un système photovoltaïque plus simple comme nous le montre la figure ci-dessous. Le stockage se fait de manière hydraulique, l'eau étant pompée, lorsqu'il y a suffisamment d'ensoleillement, dans un réservoir au-dessus du sol. Elle est ensuite distribuée par gravité au besoin.

I.4 Cellule photovoltaïque

L'élément fondamental dans un système PV est une cellule photovoltaïque. Une cellule peut être assimilée à une photodiode en convention générateur [13].

Une cellule photovoltaïque est un composant optoélectronique qui est à la base d'un dispositif qui génère cette énergie. Il fonctionne sur le principe de l'effet photoélectrique. Plusieurs cellules sont connectées ensemble sur un module solaire photovoltaïque, et plusieurs modules sont combinés pour former une installation solaire, L'électricité produite par cette installation peut être consommée sur place ou injectée dans le réseau de distribution. Les cellules photovoltaïques les plus courantes sont constituées de semi-conducteurs, principalement à base de silicium (*Si*) et plus rarement d'autres semi-conducteurs : séléniure de cuivre et d'indium ($(\text{Se})_2\text{ouCuInGa}(\text{Se})_2$), tellure de cadmium (*CdTe*), etc.

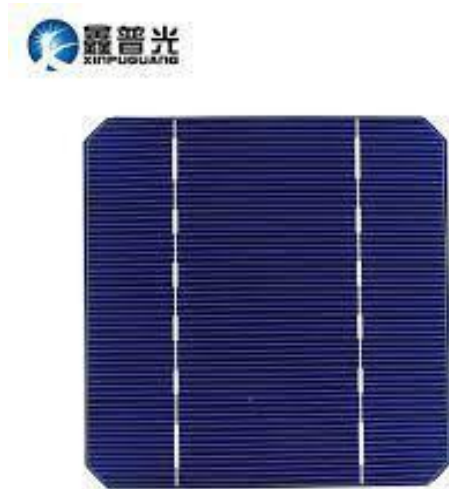


Figure I. 6: cellule photovoltaïque.

I.4.1 Technologie des cellules solaires

Les cellules photovoltaïques sont constituées de semi-conducteur à base de :

- Silicium (*Si*).
- Germanium (*Ge*).
- Sélénium (*Se*).
- Arséniure de gallium (*GaAs*).
- Tellure de cadmium (*CdTe*).
- De sulfure de cadmium (*CdS*)

Le silicium est actuellement le matériau le plus utilisé pour fabriquer les cellules photovoltaïques, car il est très abondant dans la nature.

Il existe beaucoup de types de cellules photovoltaïques pouvant être classées comme suit [14] :

- **Les cellules mono-cristallines** : Ces cellules sont constituées de cristaux très purs obtenus par un contrôle strict et progressif du refroidissement du silicium. et caractérisé par :
 - Rendement est de 17-20 % (On obtient ainsi une puissance de 170 à 200 Wc par m²).
 - Très bon rendement.
 - Coût élevé.
 - Rendement faible sous éclairage réduit.

- **Les cellules polycristallines** : caractérisées par
 - Rendement est de 16-18 % (On obtient ainsi une puissance de 160 à 180 Wc par m²)
 - Ces cellules restent les plus utilisées du fait du rapport performance/prix plus intéressant que celui de leurs homologues monocristallins.
 - Rapport performance.
 - Rendement faible sous éclairage réduit.

- **Les cellules amorphes (cellules de calculatrices par exemple)** : caractérisées par
 - Leur rendement qui est de 6 à 7 % soit 60-70 Wc/m²
 - Moins coûteuses que la première génération puisqu'elles consomment moins de matériau semi-conducteur
 - Moins polluantes à la fabrication (Ne nécessitent pas de passer par l'étape de transformation du silicium en "wafers" (moins énergivores)).
 - Fonctionnent avec éclairage faible.
 - Moins sensibles à l'ombrage et aux élévations de température.
 - Possibilité de créer des panneaux souples.
 - Panneaux légers.
 - Rendement global plus faible.
 - Rendement moindre sous éclairage direct.

C'est le silicium amorphe que l'on trouve le plus souvent dans les produits de consommation comme les calculatrices, les montres etc.

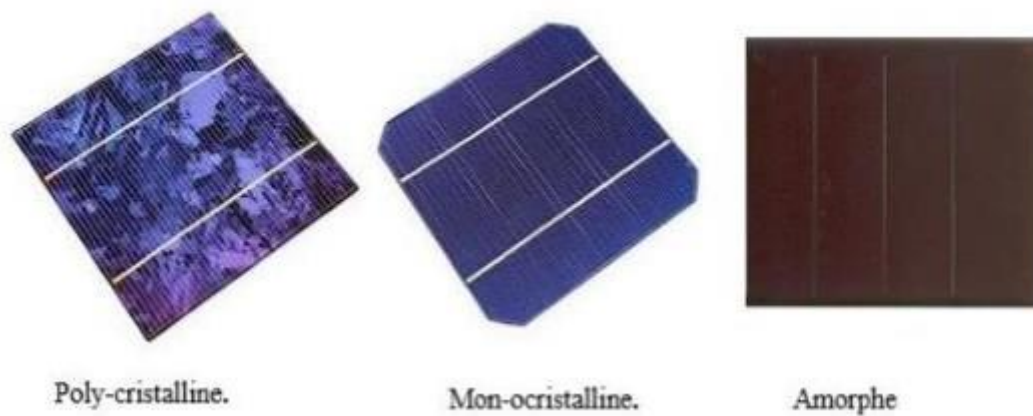


Figure I. 7: types de cellules photovoltaïques.

I.5 Panneau PV

Un panneau photovoltaïque est un générateur de courant continu composé de plusieurs cellules photovoltaïques interconnectées en série et/ou en parallèle pour augmenter la puissance. Pour une même température, éclairage uniforme, l'association de cellules photovoltaïques en série est une augmentation de tension, et la tension résultante est la somme des tensions de chaque cellule, à l'inverse, le courant augmente, à l'association en parallèle.

Les cellules solaires sont généralement connectées en série et en parallèle, puis encapsulées sous verre pour obtenir des modules photovoltaïques. Les modules interconnectés sont montés sur des supports métalliques et inclinés suivant l'angle désiré en fonction du lieu. Cet ensemble est souvent désigné par champ de modules [15].

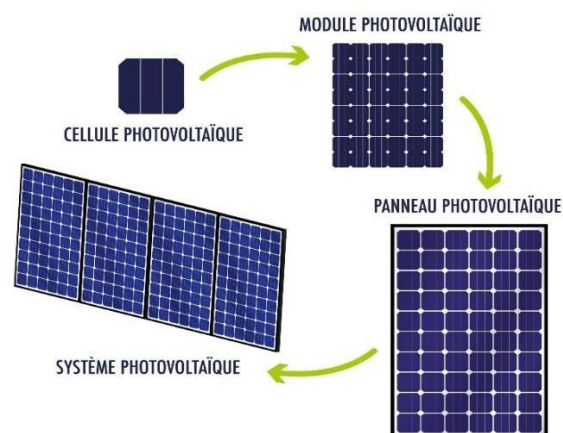


Figure I. 8: Exemple de panneau photovoltaïque.

I.5.1 Types de configuration des cellules PV

- **Association de cellules photovoltaïques en série**

Si on assemble en série N_S cellules, la tension aux bornes de l'assemblage est égale à la somme des tensions délivrées par chacune des cellules.

$$V = N_S V_{CO} \quad (I.0)$$

- $V(V)$: Tension aux bornes de l'assemblage.
- $V_{CO}(V)$: Tension aux bornes d'une cellule.
- N_S : Nombre de cellules photovoltaïques en série.

Dans le cas d'une association en série, les cellules délivrent le même courant mais elles peuvent fonctionner avec des tensions différentes.

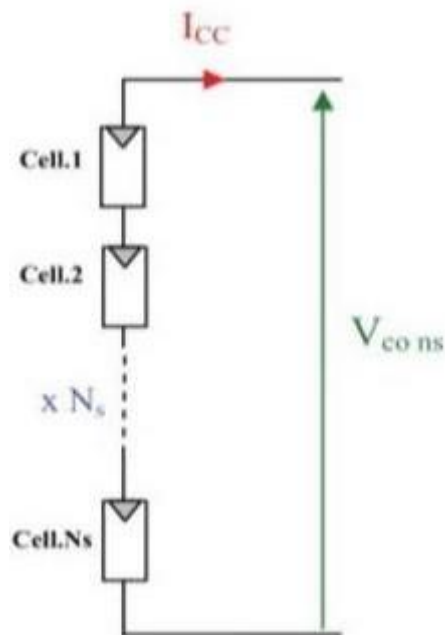


Figure I. 9: Un schéma d'un groupement en série de N_S cellules identiques.

- **Association de cellules photovoltaïques en parallèle**

Contrairement à l'association des cellules en parallèle, si on assemble en parallèle N_P cellules, le courant aux bornes de l'assemblage est égal à la somme des courants produits par chacune des cellules.

$$I = N_P I_{CC} \quad (I.0)$$

- $I(A)$: Courant circulant dans l'assemblage.
- $I_{CC}(A)$: Courant circulant dans chaque cellule.

- N_p : Nombre de cellules photovoltaïques en parallèle.

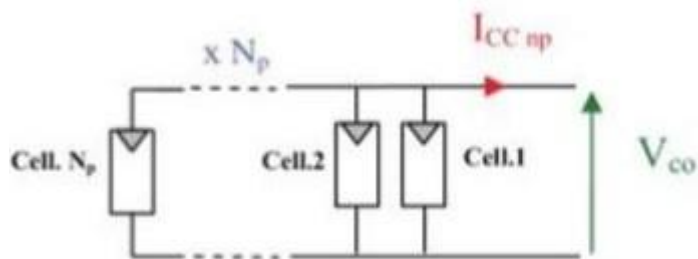


Figure I. 10: Un schéma d'un groupement en parallèle de N_p cellules identiques.

I.5.2 Caractéristiques électriques du panneau

Dans notre mémoire on va utiliser le panneau PV BP SX3190B

Le panneau PV se compose de quatre blocs en série soit 50 cellules de la technologie polycristalline.

Les conditions de tests standards en laboratoire doivent avoir un rayonnement de 1000W/m^2 et une température de 25°C . Les caractéristiques électriques de ce panneau sont résumées dans le tableau suivant :

Tableau I. 1: Caractéristiques électriques du panneau PV BP SX3190B en conditions standards.

Caractéristiques électriques	Valeurs
Puissance maximale au PPM (P_{max})	190.26W/crête
Tension à P_{max} (V_{mp})	24.3V
Courant à P_{max} (I_{mp})	7.82A
Tension de circuit ouvert (V_{oc})	30.6V
Courant de court-circuit (I_{sc})	8.6A
Coefficients de courant de température I_{sc}	0.1 %/°C
Coefficients de tension de température V_{oc}	-0.33 % /°C
Nombre de cellules	50

I.5.3 Simulation du panneau PV aux condition STC

Les caractéristiques électriques du GPV (cf. Figure I.1) sont données à partir d'une série de simulation sous les conditions atmosphériques standards STC ($G=1000\text{W/m}^2$, $T= 25^\circ \text{C}$). Les résultats obtenus sont représentés sur les figures suivantes, telles que :

- La courbe de la **Figure I.11** présente la caractéristique de la puissance-Tension du GPV.
- La courbe de la **Figure I.12** présente la caractéristique courant-Tension du GPV.

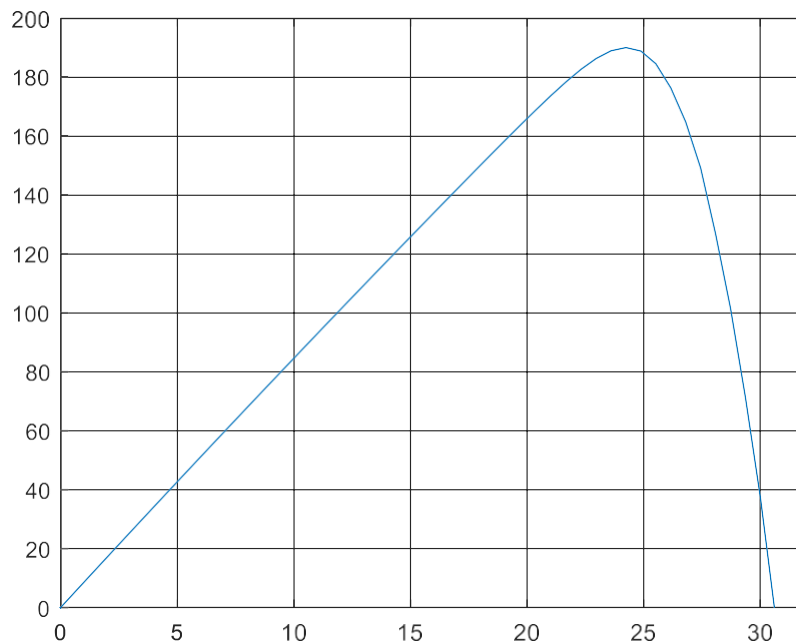


Figure I. 11: Caractéristiques $P=f(V)$.

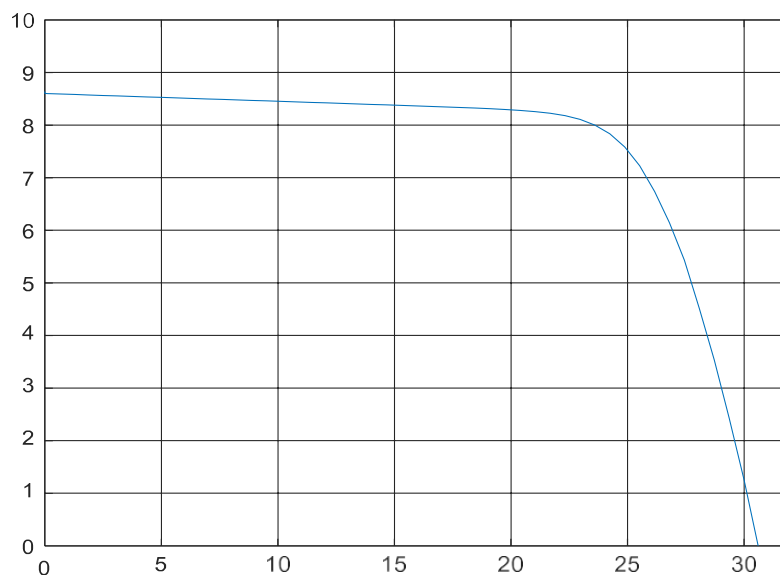


Figure I. 12: Caractéristiques $I=f(V)$.

La figure I.11 montre le point PPM et la tension V_{oc} et on remarque que les valeurs de puissance à PPM et V_{oc} correspondent aux valeurs rapportées dans le tableau I.1.

La figure 12 montre le courant de court-circuit I_{cc} et la tension V_{oc} , on remarque que les valeurs de courant et V_{oc} correspondent aux valeurs rapportées dans le tableau I.1.

Pour un fonctionnement optimal du panneau PV, le point de puissance maximale doit atteindre une puissance de 190,26W.

I.5.4 Simulation de l'influence de l'éclairement

Fondamentalement, une cellule photovoltaïque est une jonction PN qui réagit différemment selon l'énergie qu'elle reçoit. Plus elle reçoit d'énergie, plus elle en récupère, mais il y a toujours un coefficient de rendement. Les figures (I.13 et I.14) représentent les courbes $I=f(V)$ et $P=f(V)$ pour différents niveaux d'irradiation sur le module

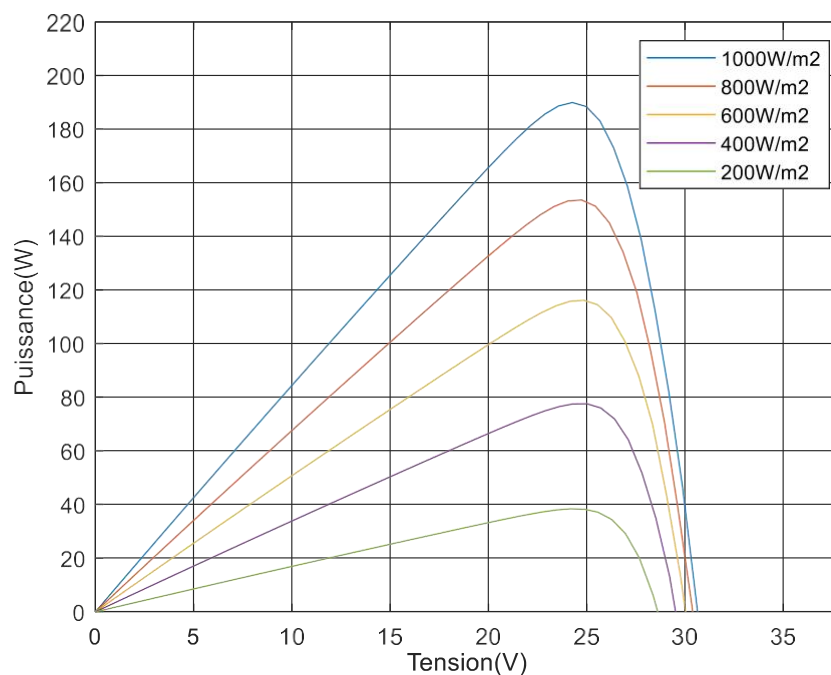


Figure I. 13: Influence de l'irradiation sur les Caractéristiques $P=f(V)$.

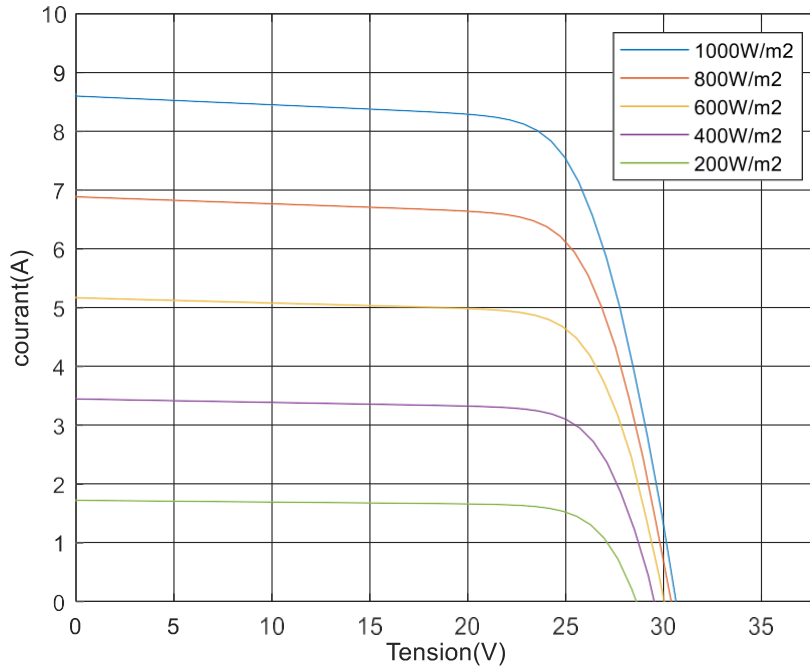


Figure I. 14: Influence de l'irradiation sur les Caractéristiques $I=f(V)$.

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

Donc la puissance et le courant augmentent avec l'augmentation de l'éclairement et diminuent avec l'augmentation de la température

I.5.5 Simulation de l'influence de la température

Les figures (15 et 16) représentent les courbes $I=f(V)$ et $P=f(V)$ pour des températures ambiantes différentes à savoir que ($T=0^{\circ}\text{C}$, $T=15^{\circ}\text{C}$, $T=25^{\circ}\text{C}$, $T=35^{\circ}\text{C}$ et $T=50^{\circ}\text{C}$) et sous un éclairement constant $G=1000 \text{ W/m}^2$

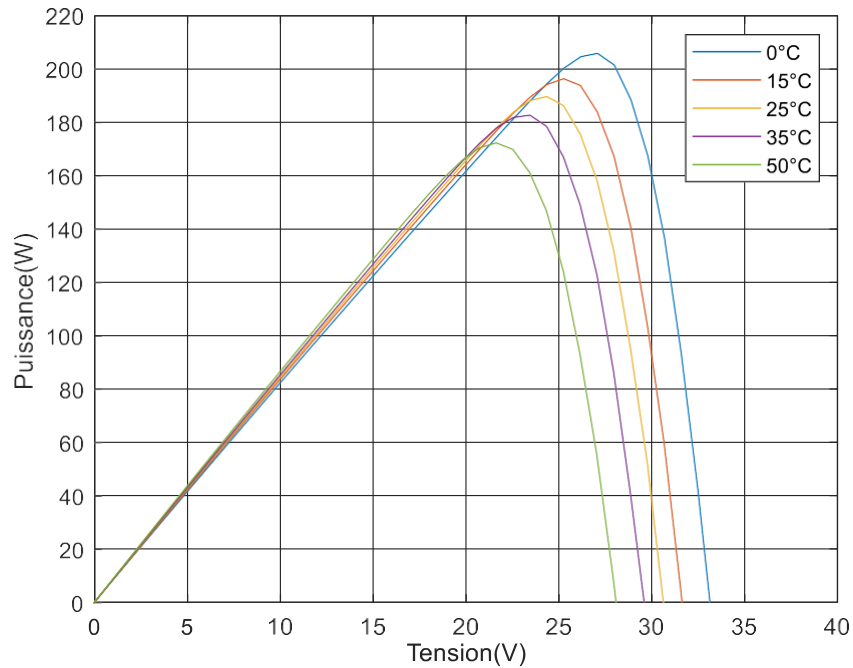


Figure I. 15: Influence de la température sur les caractéristiques $P=f(V)$.

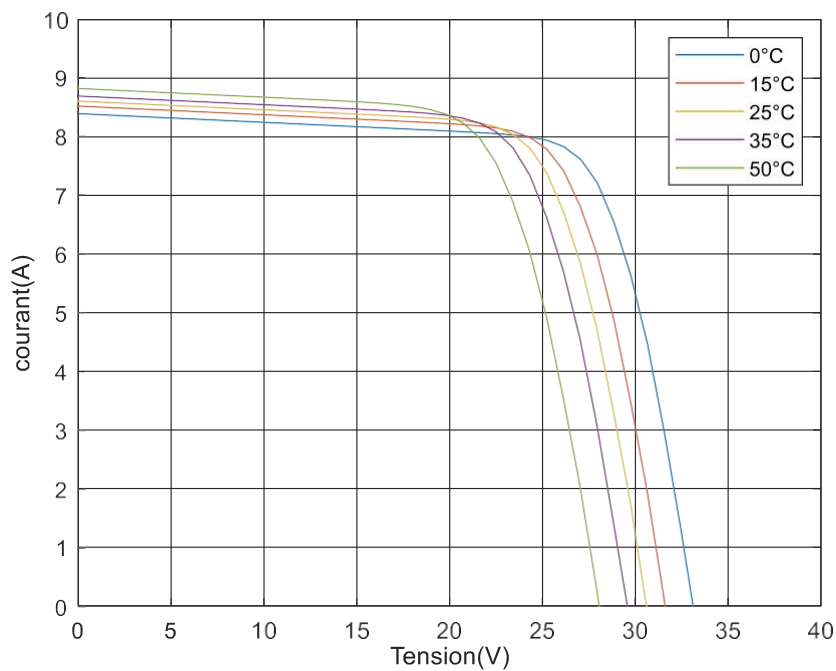


Figure I. 16: Influence de la température sur les caractéristiques $I=f(V)$.

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

I.6 Convertisseur de puissance élévateur (boost)

Le dispositif utilisé comme étage d'adaptation dans notre recherche est un convertisseur de puissance DC/DC, qui connecte une source de tension continue à une charge. Il est considéré comme un transformateur d'une grandeur électrique continue [16]. Les performances du convertisseur DC/DC lui permettent de réguler la tension de sortie DC sous les variations de charge et de ligne et de réduire les harmoniques de la tension de sortie DC en dessous des niveaux tolérables [17]. Dans ce chapitre, nous allons présenter seulement le convertisseur élévateur qui est le convertisseur de notre système à étudier [17]. Il existe plusieurs types de convertisseurs hacheurs.

I.6.1 Principe de fonctionnement

Le convertisseur généralement utilisé dans les systèmes PVs est le convertisseur élévateur de tension (Boost), connu aussi sous le nom de « convertisseur survolteur », Son rôle typique est de convertir sa tension d'entrée en une tension de sortie supérieure, son schéma de principe d'un Boost en fonctionnement est représenté par la Figure I.17 [18]. Il est composé d'une bobine L , d'une diode D , d'un condensateur C et d'un interrupteur à semi-conducteur contrôlable S [17].

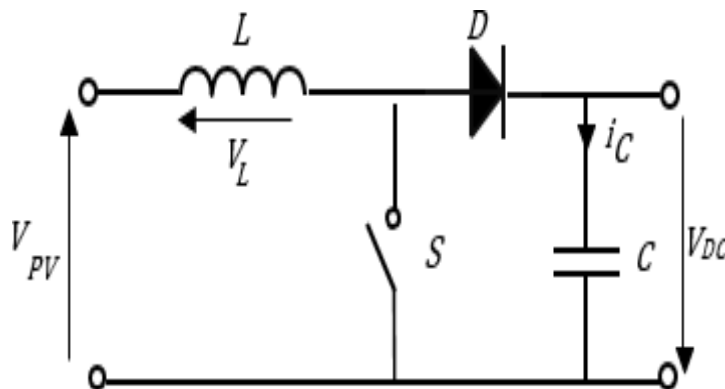


Figure I. 17: Circuit électrique de base d'un hacheur élévateur.

Il existe deux cas dans ce mode de fonctionnement : le cas où l'interrupteur S est fermé et le cas où l'interrupteur S est ouvert

Pour le cas de l'interrupteur S fermé :

Pendant le temps t_{on} l'interrupteur S est fermé (Figure I.18) le courant circule vers la charge à travers l'inductance L qui se charge au fur et à mesure que le courant augmente et une énergie est emmagasinée dans la bobine. Le condensateur assure le courant de sortie.

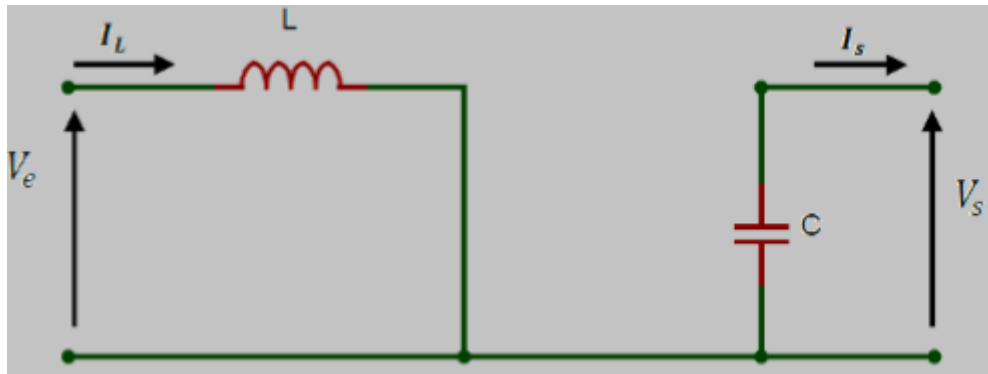


Figure I. 18: Schéma du Boost pour le cas de l'interrupteur S fermé.

Les équations qui régissent le fonctionnement du convertisseur hacheur sur cet intervalle sont [15] :

$$V_e = L \frac{dI_L}{dt} \quad (\text{I.1})$$

$$I_{L_on} = I_{L_min} + \frac{V_e}{L} t \quad (\text{I.2})$$

A la fin du cycle le courant de la bobine atteint la valeur maximale donnée par

$$I_{L_max} = I_{L_min} + \frac{V_e}{L} t_{on} \quad (\text{I.3})$$

Avec

$$- t_{on} = \alpha T$$

Où

- α : Le rapport cyclique
- t_{on} : Le temps de la phase de fermeture [s]
- L : l'inductance de la bobine [H]
- V_e : La tension d'entrée [V]
- I_{L_max} : Le courant de la bobine pendant la phase de fermeture [A]
- I_{L_min} : Le courant de la bobine au début de la phase de fermeture [A]

Pour le cas de l'interrupteur S ouvert :

Pendant le temps t_{off} , l'interrupteur S est ouvert (Figure I.19) la tension aux bornes de l'inductance va changer la polarité et l'énergie emmagasinée dans la bobine est transférée vers le condensateur qui se charge. La diode passera à l'état (passante)

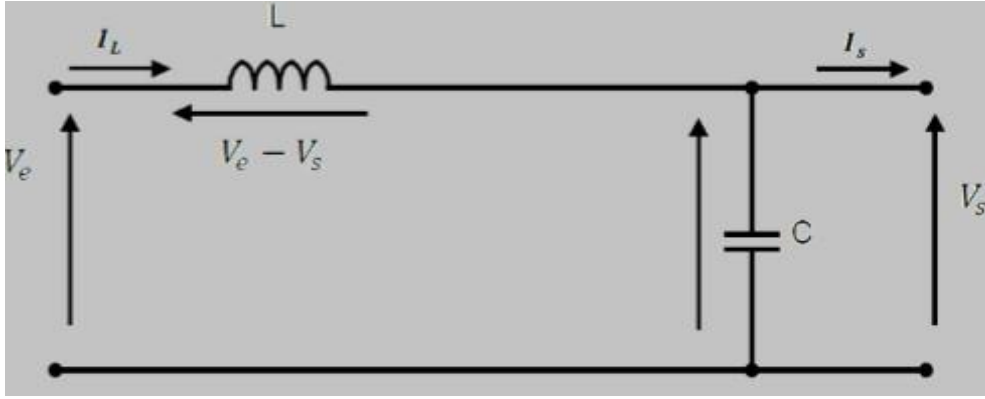


Figure I. 19: Schéma du Boost pour le cas de l'interrupteur K ouvert.

$$L \frac{dI_L}{dt} = V_e - V_S \quad (I.4)$$

$$I_{L_off} = I_{L_max} + \frac{V_e - V_S t}{L} \quad (I.5)$$

À la fin de cette période, le courant de la bobine reprend sa valeur minimale donnée par

$$I_{L_min} = I_{L_max} + \frac{V_e - V_S}{L} t_{off} \quad (I.6)$$

Où

- I_{L_off} : Le courant de la bobine pendant la phase d'ouverture [A]
- t_{off} : Le temps de la phase d'ouverture [S]

La période du signal de commande est donnée par :

$$T = t_{on} + t_{off} \quad (I.7)$$

Et le rapport cyclique α est défini par la relation :

$$\alpha = \frac{T_{on}}{T} \quad (I.8)$$

Ce qui donne :

$$t_{off} = (1 - \alpha)T \quad (I.9)$$

Les équations (I.3) et (I.6) deviennent :

$$I_{L_max} - I_{L_min} = \frac{V_e}{L} \alpha T \quad (I.10)$$

$$I_{L_max} - I_{L_min} = \frac{V_S - V_e}{L} (1 - \alpha)T \quad (I.11)$$

On obtient alors :

$$V_S = \frac{V_e}{1 - \alpha} \quad (I.12)$$

En considérant le convertisseur sans pertes, la puissance moyenne délivrée par la source est égale à la puissance moyenne disponible en sortie :

$$P_{source} = V_e I_e = P_{charge} = V_S I_S \quad (I.13)$$

Le courant de sortie I_s et le courant à l'entrée I_e sont liés par l'équation :

$$I_s = (1 - \alpha)I_e \quad (\text{I.14})$$

Pour garder les équations précédentes, il faut garantir le fonctionnement du boost en mode continu et éviter le mode discontinu, ce dernier se produit quand le courant demandé par la charge est faible ceci dit que le courant dans l'inductance s'annule avant la prochaine phase de chargement.

I.7 Commande MPPT

Le suivi du point de puissance maximale (MPPT) est une partie importante des systèmes photovoltaïques. Plusieurs technologies ont été développées depuis 1968, date à laquelle les premières lois de commande de ce type ont été publiées pour les énergies renouvelables de type PV. Ces techniques diffèrent les unes des autres en termes de complexité, de nombre de capteurs requis, de vitesse de convergence, de coût, de performances et de domaines d'application [19].

I.7.1 Principe de la commande MPPT

Le principe de ces commandes est de rechercher le point de puissance maximale (PPM) tout en assurant une parfaite adéquation entre le générateur et sa charge pour délivrer une puissance maximale. Par conséquent, le contrôle du convertisseur place le système au point de fonctionnement maximal (V_{PPM} et I_{PPM}) quelles que soient les conditions météorologiques (température et irradiance). La chaîne de conversion photovoltaïque sera optimisée avec un convertisseur statique (CS) piloté par le MPPT [20].

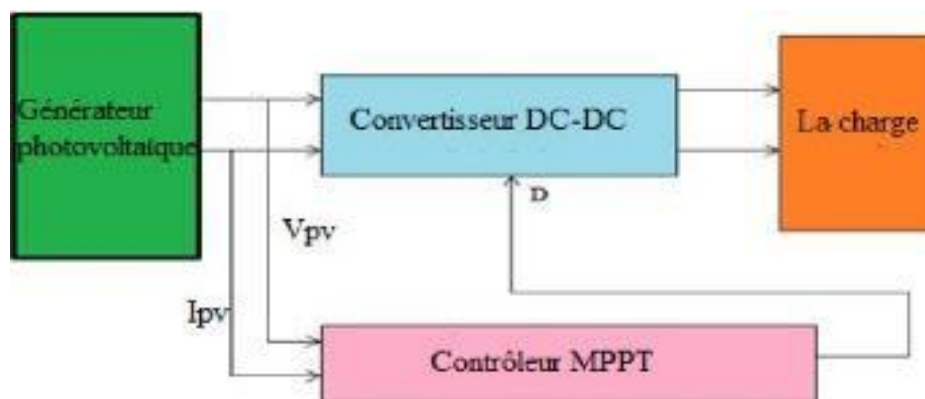


Figure I. 20: Chaîne de conversion d'énergie solaire comprenant une commande MPPT.

La commande MPPT fait varier le rapport cyclique du convertisseur statique (CS), à l'aide d'un signal électrique approprié pour tirer le maximum de puissance que le GPV peut fournir. L'algorithme MPPT peut être plus ou moins compliqué pour rechercher le MPP. En général, il est basé sur la variation du rapport cyclique du 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 MPPT [21].

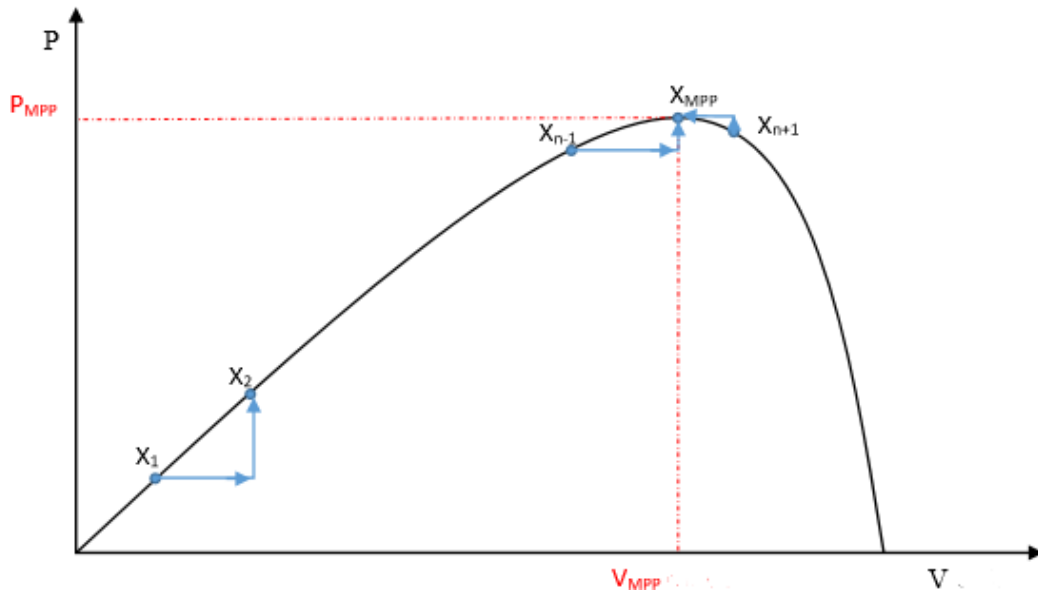


Figure I. 21: Principe de la commande MPPT.

I.7.2 Méthodes de la commande MPPT

Pour extraire le maximum de puissance d'un panneau solaire, le raisonnement peut se faire de différentes manières. Certains de ces concepts sont très robustes et simples, tandis que d'autres nécessitent des dispositifs logiques très complexes tels que des microprocesseurs associés à des circuits de puissance, des convertisseurs de commutation....

En littérature, on trouve fréquemment deux classes de techniques de maximisation de puissance à savoir :

- Méthodes MPPT classiques.
- Méthodes MPPT intelligentes.

- **Commande MPPT classique :**

- **Perturbation & Observation (P&O) :**

La P&O est l'algorithme de poursuite du PPM le plus utilisé, cet algorithme perturbe la tension de fonctionnement pour garantir une puissance maximale. Même s'il existe de nombreuses variantes avancées et plus optimisées de cet algorithme.

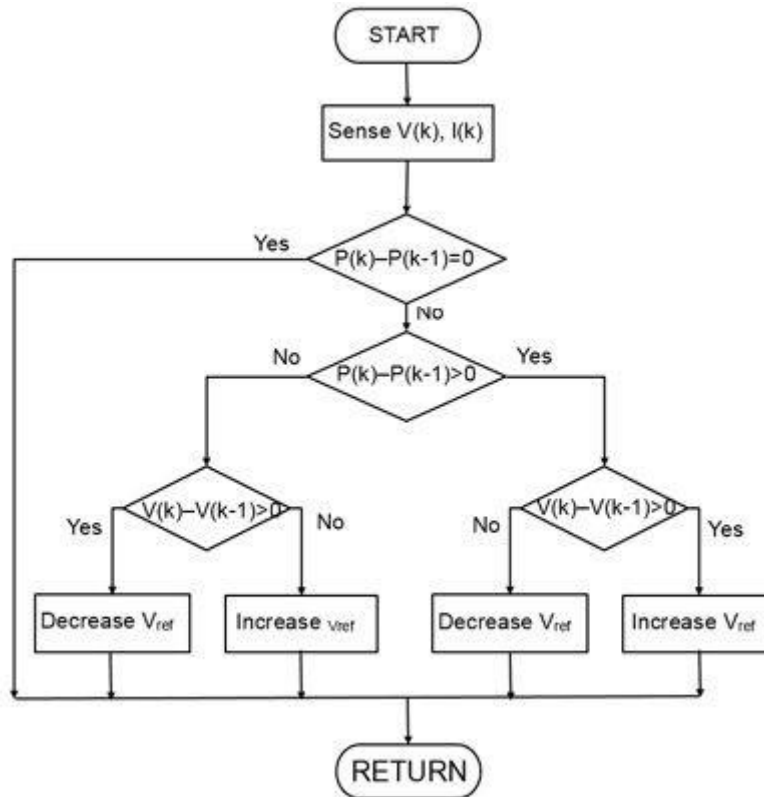


Figure I. 22: Algorithme MPPT P&O.

Si la valeur de la puissance actuelle (k) du Panneau est supérieure à la valeur précédente $P(k - 1)$, alors on garde la même direction de perturbation précédente sinon on inverse la perturbation du cycle précédent [23]. En effet, la rapidité et la précision de cette commande dépendent du choix de la valeur de perturbation $\Delta \alpha$.

- Méthode Conductance Incrémentale

C'est aussi une méthode facile à mettre en œuvre et largement appliquée pour résoudre le problème de la divergence PO sous une insolation changeant rapidement, et elle est basée sur la détermination du signe de la dérivée de la puissance qui ne change pas avec l'insolation [22].

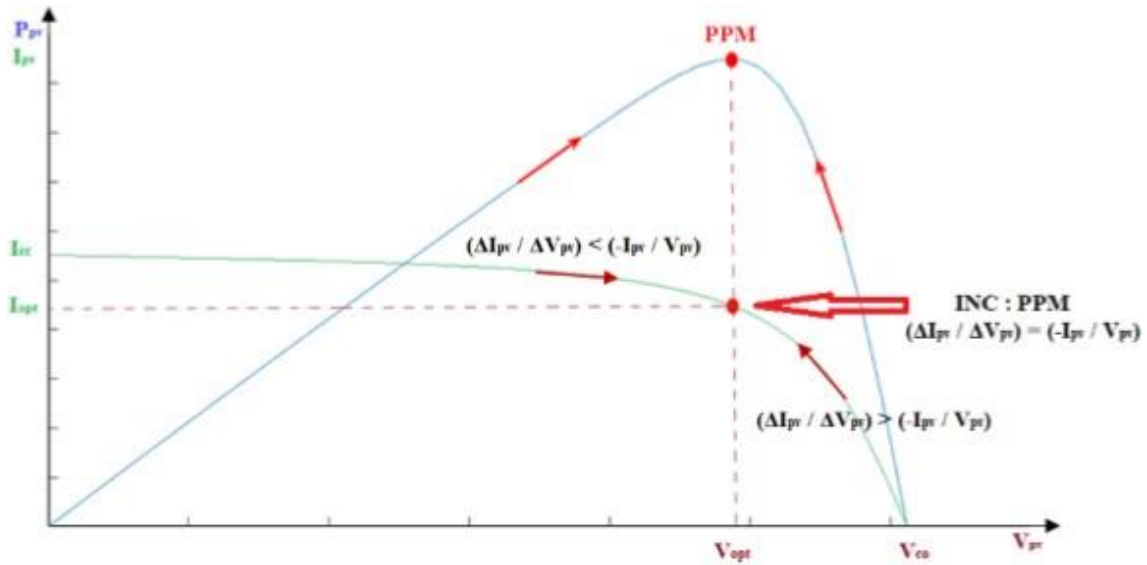


Figure I. 23: Principe de la MPPT avec la méthode IC.

L'algorithme ci-dessous (**Figure I.23**) compare l'incrément de conductance à la conductance instantanée dans un système PV. En fonction du résultat, elle augmente ou réduit la tension jusqu'à atteindre le point de puissance maximale (MPP). À la différence de l'algorithme P&O, la tension reste constante une fois le MPP atteint.

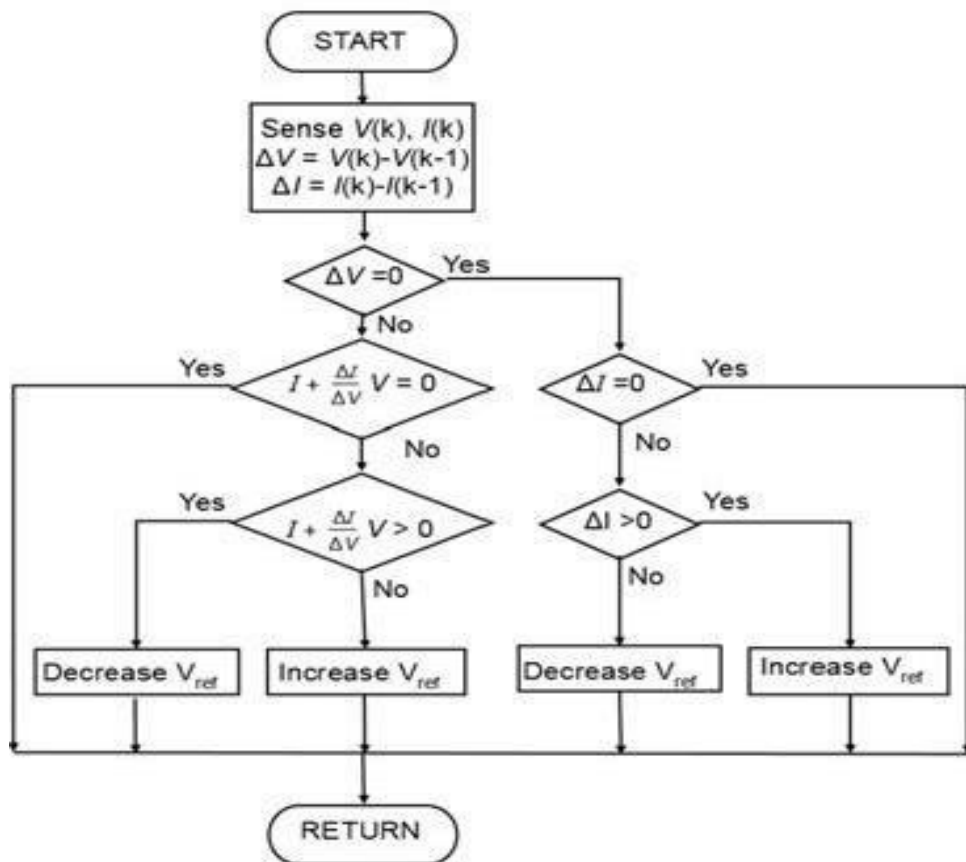


Figure I. 24: Algorithme Conductance Incrémentale.

- **Commande MPPT intelligente**

Contrôleur par la logique floue :

La logique floue est une forme de logique qui traite des approximations plutôt que des raisonnements fixes et exacts. Contrairement à la logique traditionnelle, qui définit généralement la logique binaire comme vraie ou fausse, la logique floue peut avoir des valeurs variables. Les variables de logique floue peuvent avoir différents degrés de valeurs vraies et fausses et peuvent être représentées par des variables linguistiques. Dans ces cas, la commande par logique floue peut fournir une vitesse de traitement rapide et la précision nécessaire [24]

I.8 Conclusion

Dans ce chapitre, on a vu l'importance du générateur PV dans la production de l'énergie. On a passé en revue ses caractéristiques et les différentes technologies de production de la cellule PV, passant par le principe de la conversion de l'énergie photovoltaïque en électricité. Vers la fin, nous avons présenté le convertisseur élévateur (boost) et commande MPPT et ses méthodes.

Le deuxième chapitre est réservé à la présentation de la logique floue et son type 2.

Chapitre II :

La logique Floue Type -2-

Chapitre II : La logique Floue Type-2-

1.1 Introduction

Ce chapitre présente une méthode de contrôle moderne, la logique floue. La logique floue diffère de la logique classique en ce qu'elle permet une définition partielle ou "floue" des règles de contrôle. La puissance de la logique floue vient de sa capacité à décrire un phénomène ou un processus spécifique avec des mots, puis à utiliser un petit nombre de règles pour représenter ce phénomène. La connaissance des systèmes flous est contenue dans des règles et des ensembles flous, qui contiennent des descriptions générales des propriétés du phénomène en question.

Dans ce chapitre nous allons définir la logique floue, son principe et nous allons présenter les principes de base et le fondement théorique de la théorie de la logique floue type-2.

1.2 Logique floue

L'utilisation de la logique floue dans la commande des systèmes nécessite une compréhension approfondie de la théorie et de son application dans la commande, de sorte que certaines bases générales de la logique floue doivent être introduites : théorie des ensembles flous, les relations floues, principe de réglage par logique floue et la structure de commande par logique floue des systèmes multi-variables. La logique floue, comme la logique binaire, a un support logique clair de la théorie mathématique [25]. La logique floue est apparue en 1965 lorsque lotfi A. ZADEH a publié un article intitulé « les ensembles flous » [30]. La logique floue peut manipuler des symboles et d'inférer des actions en utilisant des règles logiques à partir des prémisses imprécises ou incertaines [27]. En 1975, à partir de quelques principes de la logique floue, MAMDANI a développé une stratégie de contrôle de procédé, ses travaux et la technique utilisée ont été repris par la suite dans les réalisations récentes [28].

1.2.1 Définition de la logique floue

La logique floue est une méthode de raisonnement qui permet des définitions partielles ou « floues » des règles. La puissance de la logique floue vient de sa capacité à décrire un phénomène ou un processus particulier de façon **linguistique** et ensuite, de représenter ce phénomène par un faible nombre de règles très flexibles. Les connaissances dans un système flou sont contenues dans les règles et dans les

ensembles flous qui contiennent des descriptions générales des propriétés du phénomène en question. [29].

Lorsque les moyens classiques atteignent leurs limites (Exemples systèmes non linéaires, etc.), on utilise la logique floue pour résoudre principalement les problèmes ou les données qui ne peuvent pas être formulées de manière explicite. La logique floue est couramment utilisée par des automaticiens pour ses applications dans le contrôle et commande de procédés et son but est de traiter les problèmes de commande de processus avec une approche différente de l'automatique classique, tout comme un contrôleur (ou correcteur) classique [25].

1.3 Contrôleur flou type-2

Le concept des ensembles flous type 2 a été introduit par Zadeh [30] comme extension du concept des ensembles flous ordinaires dits ensembles flous type 1. Des ensembles flous type 2 peuvent être utilisés dans des situations où l'incertitude est présentée (par exemple, l'incertitude sur la forme de fonction d'appartenance). L'avantage principal de la logique floue type 2 par rapport à la logique floue type 1 est sa capacité de prendre en compte les incertitudes linguistiques et numériques. Si pour une certaine variable linguistique x , un opérateur OP1 a proposé 3 fonctions d'appartenance gaussiennes, un autre opérateur OP2 propose par exemple à son tour 5 fonctions d'appartenance de type triangulaire, alors on remarque que nous avons une incertitude dans la forme et dans le nombre des fonctions d'appartenance proposées. Cette problématique ne peut être résolue par la logique floue type-1. Pour remédier à ce problème, la logique floue type-2 a été proposée dans la littérature.

1.3.1 Contrôleur à la logique floue type 02

- **Définition 1**

Un ensemble flou de type-2, noté \tilde{A} caractérisé par une fonction d'appartenance tridimensionnelle, $u_{\tilde{A}}(x, u)$, c-a-d :

$$\tilde{A} = \int_{x \in X} \int_{u \in J_x} u_{\tilde{A}}(x, u) / (u, x) \quad J_x \subseteq [0,1] \quad (\text{II}, 1)$$

Avec \iint on dénote l'union de tous les éléments produits cartésiens sur x et x est appelé variable

$$0 \leq u_{\tilde{A}}(x, u) \leq 1$$

A chaque point fixe x de X , J_x est l'appartenance primaire de x , et x est appelé variable

primaire

- **Définition 2**

A chaque valeur de x , notée $x = \acute{x}$ le plan 2 dimensionnel dont les axes sont u est $u_{\acute{x}}(x, u)$ appelé tranche verticale (vertical slice) de $u_{\tilde{A}}(x, u)$ Une fonction d'appartenance secondaire est une $u_{\acute{x}}(x, u)$ tranche verticale de $u_{\tilde{A}}(x, u)$

$\forall u \in j_{\acute{x}} \subseteq [0,1]$, on a:

$$u_{\tilde{A}}(x = \acute{x}, u)u_{\acute{x}}(\acute{x}, u) = \int_{u \in j_{\acute{x}}} h_{\acute{x}}(u)/u \quad j_{\acute{x}} \subseteq [0,1] \quad (\text{II}, 2)$$

$0 \leq h_{\acute{x}}(u) \leq 1$ puisque $\forall \acute{x}$ ce, \acute{x} va appartenir a X , c.-à-d $\acute{x} \in X$, alors nous notons la fonction d'appartenance secondaire par $u_{\acute{x}}(x)$ qui est une fonction d'appartenance floue type-1.

En se basant sur le concept des ensembles secondaires, on peut réinterpréter un ensemble flou type-2 comme l'union de tous les ensembles secondaires, c.-à-d. en utilisant l'équation (III,2),

On peut écrire \tilde{A} sous la forme suivante :

$$\tilde{A} = \{(x, u_{\tilde{A}}(x)) / \forall x \in X\} \quad (\text{II}, 3)$$

Ou sous la forme

$$\tilde{A} = \int_{u \in X} h_{\tilde{A}}(x)/x = \int_{u \in X} [\int_{u \in j_{\acute{x}}} h_{\acute{x}}(u)/u]/x \quad j_{\acute{x}} \subseteq [0,1] \quad (\text{II}, 4)$$

- **Définition 3**

Le domaine de la fonction d'appartenance secondaire est appelé appartenance primaire de x note j_x telle que $j_x \subseteq [0,1] \forall x \in X$

- **Définition 4**

L'amplitude de la fonction d'appartenance secondaire est appelée degré d'appartenance Secondaire $h_{\acute{x}}(u)$

- **Définition 5**

Un ensemble flou type-2 intervalle est un ensemble flou type-2 dont toutes les fonctions d'appartenance secondaires sont des ensembles type-1 de formes intervalles C.-à-d.

$$h_x(u) = 1 \quad \forall u \in j_x \subseteq [0,1], \forall u \in X$$

Les ensembles flous type-2 intervalle reflètent l'uniformité de l'incertitude au niveau de la fonction d'appartenance primaire, ce type de fonctions d'appartenance est le plus souvent utilisé dans les systèmes flous type-2- Notons que ce type de fonctions d'appartenance est représenté seulement par ses domaines (intervalles), qui peuvent être exprimés entre des bornes de gauche et de droite $[l, r]$ ou par leurs centres et largeurs $[c - s, c + s]$ où

$$c = (l + r)/2 \text{ et } s = (r - l)/2$$

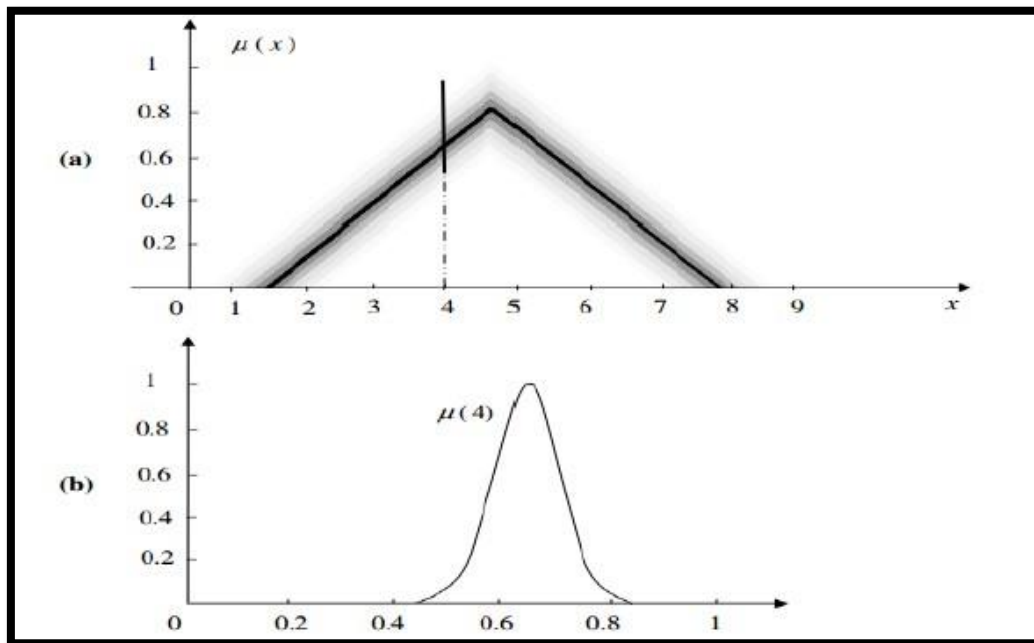


Figure II. 1: Représentation schématique d'un ensemble flou type-2 gaussien.

(a) Appartenance première.

(b) Appartenance secondaire.

- **Définition 6**

Supposons que chaque fonction d'appartenance secondaire d'un ensemble flou type-2 possède un seul degré d'appartenance unitaire. On définit alors une fonction d'appartenance principale comme l'union de tous ces points :

$$u_{principal}(x) = \int_{u \in x} u/x \text{ ou } h_x(u)=1 \quad (II,5)$$

Pour un ensemble flou type-2 intervalle, nous définissons la fonction d'appartenance principale comme étant l'union de toutes les valeurs d'appartenance moyennes de la fonction d'appartenance primaire. Notons que lorsque l'incertitude des fonctions d'appartenance disparaît, la fonction d'appartenance d'un ensemble flou type-2 se réduit à la fonction d'appartenance principale.

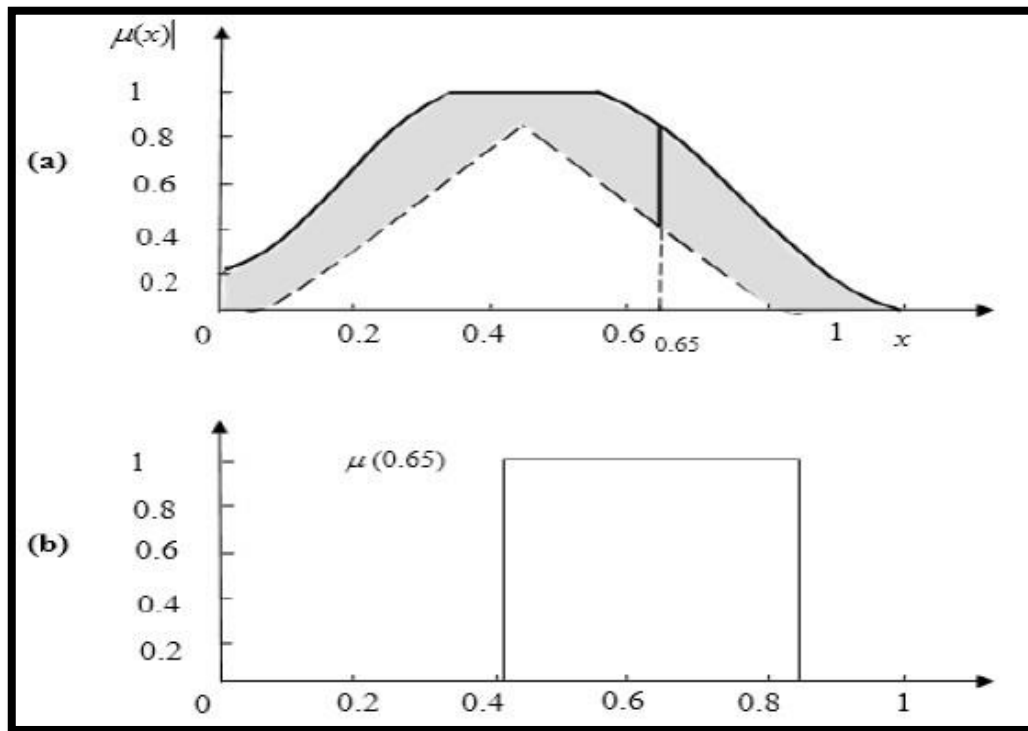


Figure II. 2: Représentation schématique d'un ensemble flou type-2 intervalle.

(a) Appartenance première.

(b) Appartenance secondaire.

- **Définition 7**

Fonction d'appartenance supérieure et fonction d'appartenance inférieure sont des fonctions d'appartenance de type -1 et sont les frontières du FOU d'un ensemble flou \tilde{A} type -2- la fonction d'appartenance supérieure notée par $\bar{\mu}(x) \forall u \in X$ alors nous avons

$$\bar{\mu}(x) = \overline{FOU}(\tilde{A}) \forall u \in X \quad (\text{II},6)$$

Et

$$\underline{\mu}(x) = \underline{FOU}(\tilde{A}) \forall u \in X \quad (\text{II},7)$$

1.3.2 Structure d'un contrôleur flou de type-2

Le contrôleur de la logique floue type 2 comporte un bloc de fuzzification, une base de règles et un mécanisme d'inférence. Ce qui signifie que les deux systèmes de types 1 et 2 respectivement sont bien similaires. La seule différence est au niveau de la sortie. Dans le cas du type 2, le bloc de défuzzification est précédé d'un bloc de réduction du type. La **Figure II.3** représente le schéma synoptique d'une structure de base d'un contrôleur à la logique floue de type 02 [30].

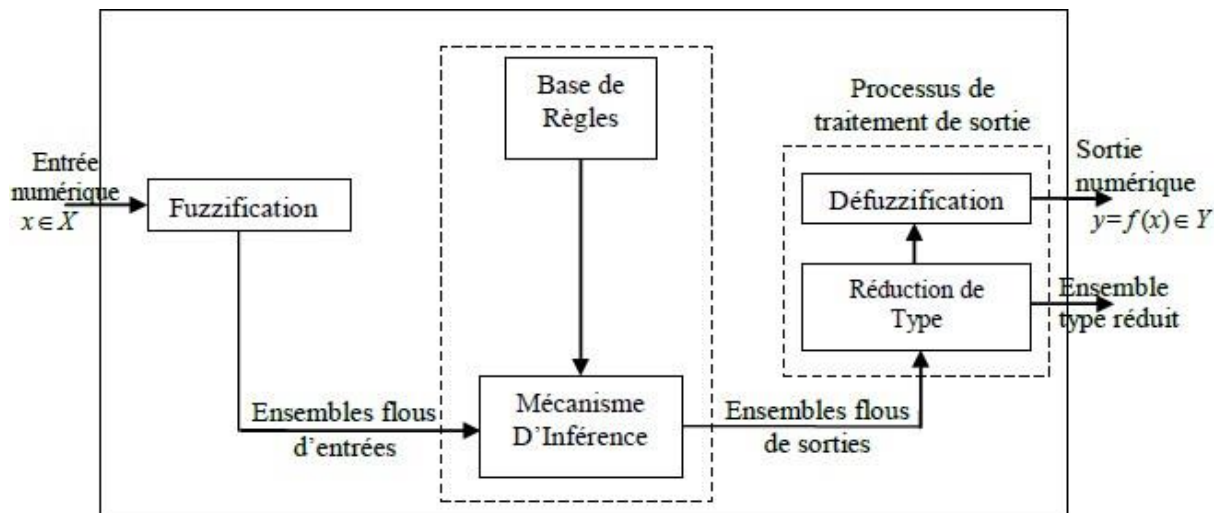


Figure II. 3: Structure de base d'un contrôleur à la logique floue de type-2.

1.3.3 Fuzzification

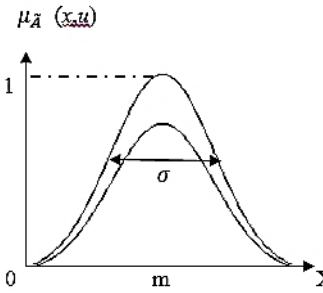
L'opération de fuzzification représente le passage des grandeurs réelles (ou physiques) aux valeurs floues. Cette étape nécessite souvent une conversion analogique/digitale, ainsi que le traitement des grandeurs mesurées et leur transformation en variables linguistiques avec la définition des fonctions d'appartenance [31]. Contrairement aux fonctions d'appartenance de type 1, les fonctions d'appartenance de type 2 fournissent plusieurs degrés d'appartenance (ou dimensions) pour chaque entrée. Par conséquent, l'incertitude sera mieux reflétée. Cette représentation nous permettra de considérer ce que le type 1 ignore. [32]

- **Les fonctions d'appartenance**

Les bases de la logique floue ne changent pas d'ensembles flous de type 1 à type 2, et en général, ne changeront pour aucun type n . Si le nombre de type est plus élevé, il modifie la nature des fonctions d'appartenance, les opérations qui dépendent des fonctions d'appartenance changent, si on appelle MF (en anglais membership function) de type 1 « primaire MF » alors on appelle MF de type 2 « secondaire MF ». Le FL (en anglais fuzzy logique) de type 2 peut également être représenté sur la base de triangulaires, gaussiens, trapézoïdaux. [32].

Tableau II. 1 : Les fonctions d'appartenance triangulaires, gaussiens et trapézoïdaux de type 2.

Fonction	Forme algébrique	Forme graphique
Fonction triangulaire	$\mu_A(x, u) = \begin{cases} 0 & x < a \\ \frac{x-a}{b-a} & a \leq x < b \\ \frac{c-x}{c-b} & b \leq x \leq c \\ 0 & x > c \end{cases}$ $\mu_{\bar{A}}(x, u) = \begin{cases} 0 & x < (a + \alpha) \\ \frac{x - (a + \alpha)}{b - (a + \alpha)} & (a + \alpha) \leq x < b \\ (1 - \alpha) \frac{(c - \alpha) - x}{(c - \alpha) - b} & b \leq x \leq (c - \alpha) \\ 0 & x > (c - \alpha) \end{cases}$	
Fonction trapézoïdale	$\mu_A(x, u) = \begin{cases} \frac{x-a}{b-a} & a \leq x < b \\ 1 & b \leq x < c \\ \frac{d-x}{d-c} & c \leq x \leq d \\ 0 & x > d \end{cases}$ $\mu_{\bar{A}}(x, u) = \begin{cases} 0 & x < (a + \alpha) \\ \frac{x - (a + \alpha)}{b - (a + \alpha)} & (a + \alpha) \leq x < b \\ (1 - \alpha) & b \leq x < c \\ (1 - \alpha) \frac{(d - \alpha) - x}{(d - \alpha) - c} & c \leq x \leq (d - \alpha) \\ 0 & x > (d - \alpha) \end{cases}$	

<p>Fonction gaussien</p>	$\mu_A(x, u) = \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{x - m}{\sigma}\right)^2\right)$ $\underline{\mu}_A(x, u) = (1 - \alpha)\exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{x - m}{\sigma}\right)^2\right)$	
--------------------------	---	---

Une fonction d'appartenance d'intervalle de type 2 est définie par une fonction d'appartenance supérieure et inférieure. La fonction d'appartenance supérieure (FAS) est équivalente à une fonction d'appartenance traditionnelle de type 1. La fonction d'appartenance inférieure (FAI) est inférieure ou égale à la fonction d'appartenance supérieure pour toutes les valeurs d'entrée possibles. La région entre FAS et FAI est l'empreinte de l'incertitude (en anglais, FOU : Footprint Of Uncertainty). Le diagramme suivant montre FAS (rouge), le FAI (bleu) et le FOU (ombré) pour une fonction d'appartenance triangulaire de type 2 (cf. Figure II.4) [37]

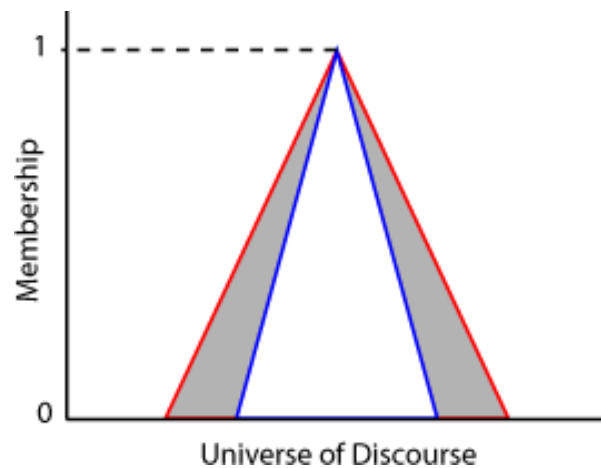


Figure II. 4: Fonction d'appartenance triangulaire type 2.

1.3.4 Base de règles

La structure des règles floues de type 2 est la même que celle du type 1, car la différence entre type 2 et type 1 est liée à la nature des fonctions d'appartenance. Par conséquent, la seule différence est que maintenant certains ou tous les ensembles flous impliqués dans les règles sont de type 2. Dans un système flou de type 1, l'ensemble de sortie est un ensemble flou de type 1, et nous effectuons une défuzzification pour obtenir un nombre qui est en quelque sorte

une représentation claire (type 0) de l'ensemble de sortie combiné. Dans le cas du type 2, le jeu de sorties est de type 2. [32]

$$\text{Si } x_1 \text{ est } \tilde{F}_1 \text{ and } x_2 \text{ est } \tilde{F}_2 \text{ and } x_n \text{ in } \tilde{F}_n \text{ Alors } y = \tilde{G}$$

Où x_i ($i = 1, \dots, n$) sont les entrées du système flou, \tilde{F}_i est l'ensemble flou de type 2 correspondant à l'entrée x_i , G est un singleton de type 2 et y est la sortie. Il n'est pas nécessaire que toutes les fonctions d'appartenance des prémisses et des conséquences soient de type 2. Il suffit qu'une seule fonction d'appartenance dans une prémisse ou dans une conséquence soit de type 2 pour que tout le système soit de type 2.

1.3.5 Inférence

Les méthodes inférences pour FL type 1 et 2 respectivement sont les mêmes, la seule différence est dans les valeurs d'entrée et de sortie de type 2 qui sont des ensembles \mathcal{A} donc elle utilise les fonctions d'appartenance supérieures et inférieures pour l'efficacité de ces méthodes [30]

Pour les systèmes d'inférence floue de type 2, les valeurs d'entrée sont floues en trouvant le degré correspondant d'appartenance à la fois aux FAS et aux FAI à partir de l'antécédent de la règle. Cela génère deux valeurs floues pour chaque fonction d'appartenance de type 2. Par exemple, la fuzzification dans la figure suivante (**Figure II.5**) montre la valeur d'appartenance dans la fonction d'appartenance supérieure (f_U) et la fonction d'appartenance inférieure (f_L) [37].

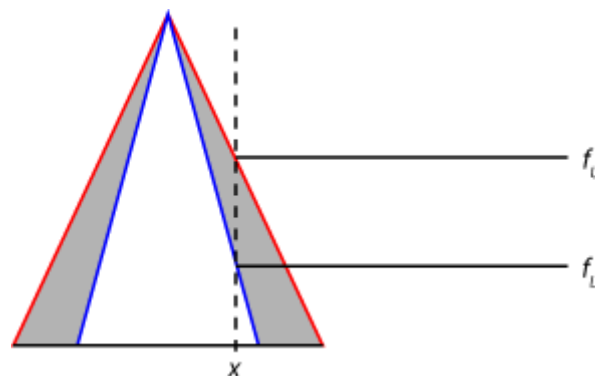


Figure II. 5: Fonction d'appartenance à fuzzifier.

Ensuite, une plage de forces de déclenchement de règle est trouvée en appliquant l'opérateur flou aux valeurs floues des fonctions d'appartenance de type 2, comme illustré dans la figure suivante (**Figure 30**). La valeur maximale de cette plage (w_U) est le résultat de l'application de l'opérateur flou aux valeurs floues des FAS. La valeur minimale (w_L) est le résultat de l'application de l'opérateur flou aux valeurs floues des FAI [37]

Le traitement des antécédents est le même pour les systèmes Mamdani et Sugeno.

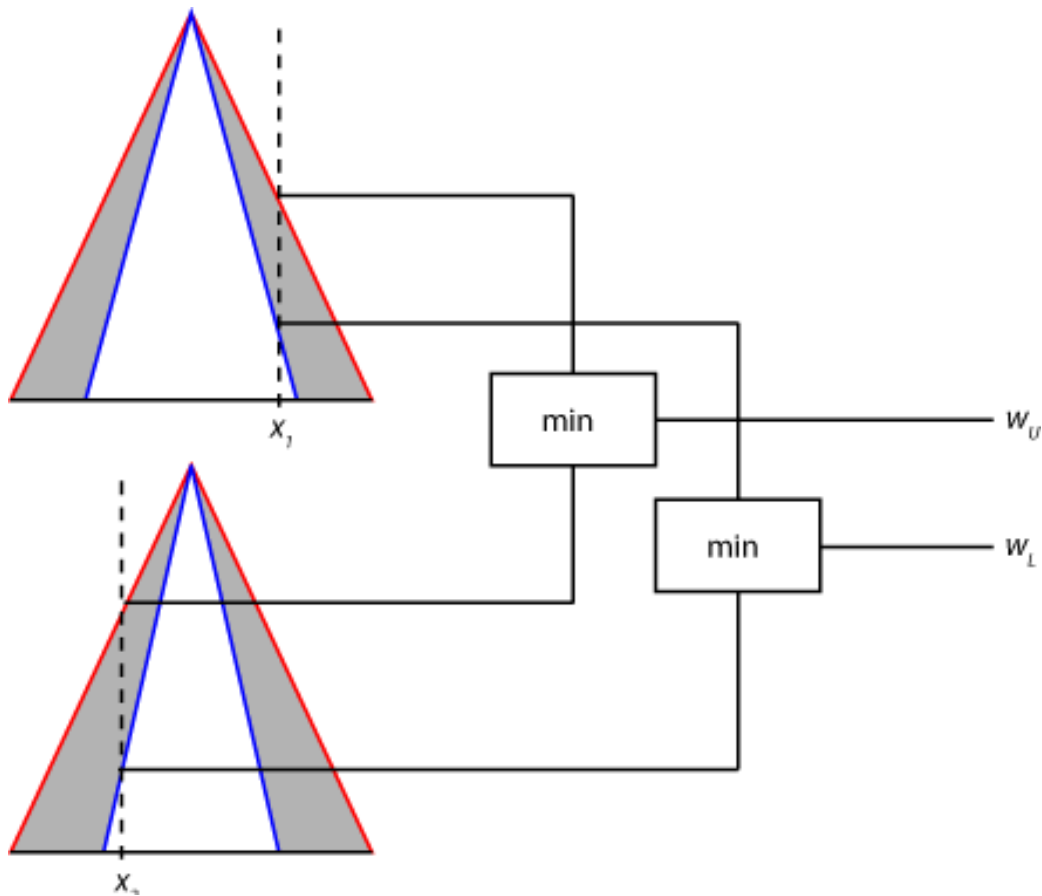


Figure II. 6: Deux fonctions d'appartenance à fuzzifier.

- **Traitement conséquence**

Pour un système Mamdani, la méthode d'implication coupe (implication min) ou met à l'échelle l'FAS et le FAI de la fonction d'appartenance de type 2 en sortie en utilisant les limites de la plage de tir de la règle. Ce processus produit un ensemble flou de sortie pour chaque règle. La (Figure II.7) montre l'ensemble flou de sortie (région gris foncé) produit en appliquant l'implication min à l'UMF (rouge) et au LMF (bleu) [37].

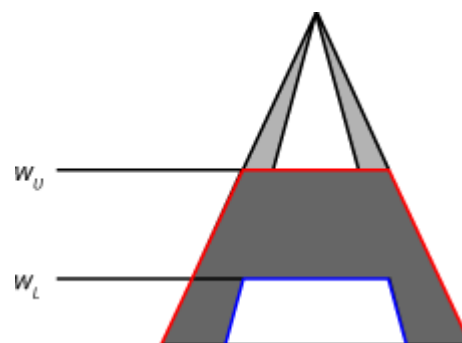


Figure II. 7: Ensemble flou de sortie pour chaque règle.

1.3.6 Le module de traitement de la sortie

Le module de traitement de la sortie se compose de deux blocs (**Figure II.8**) qui sont :

1. Le réducteur de type
2. L'interface de défuzzification.

Les méthodes de réduction de type donnent un EFT-1 (Ensemble floue type 1) à partir de l'EFT2 (Ensemble floue type 2) obtenu à la sortie du mécanisme d'inférence. L'ensemble résultant obtenu par la réduction de type sera par la suite défuzzifié pour obtenir une sortie numérique.

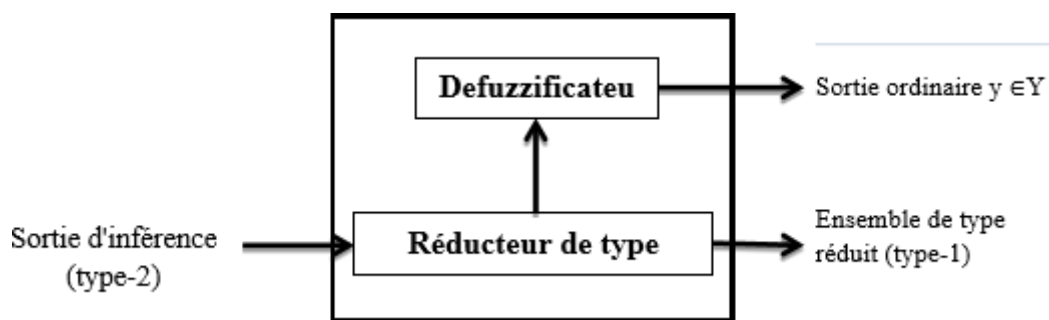


Figure II. 8: Structure de traitement de la sortie.

1.3.6.1 Réducteur de type

Dans un système flou type 1, l'ensemble de sortie est un ensemble flou type 1 et on effectue une défuzzification pour obtenir des valeurs numériques représentant la combinaison des ensembles de sortie (ensemble type 0).

En revanche, dans un système flou type 2 l'ensemble de sortie dans l'étape de mécanisme d'inférence est de type 2 (Figure II.9 (a)), l'opération de défuzzification permet d'obtenir un ensemble flou de type 1 dans un premier temps. Cette opération de la conversion d'un ensemble flou type 2 en un ensemble flou type 1 est appelée réduction de type. Nous appelons l'ensemble flou type 1 résultant l'ensemble de type réduit (Figure II.9 (b)). Enfin, l'ensemble flou de type réduit doit être défuzzifié pour obtenir un nombre ordinaire (Figure II.9 (c)) [33] [34] [35]. Ce processus de sortie est clairement illustré dans la Figure II.9.

Parmi les méthodes de réduction de type utilisées on cite :

- La réduction de type par le centre de gravité.
- La réduction de type par la hauteur.
- La réduction de type par le centre des ensembles.

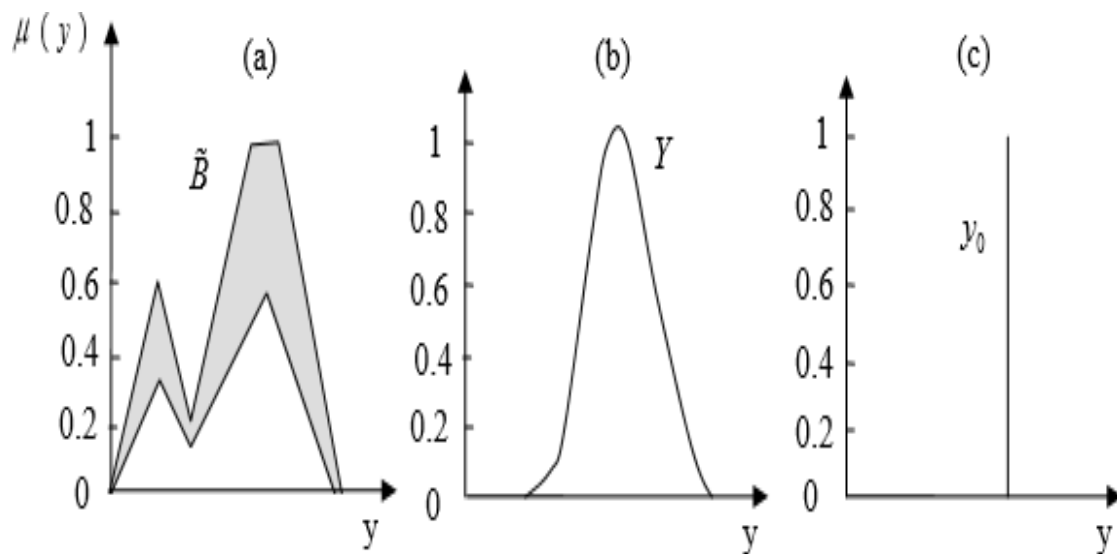


Figure II. 9: Opérations du traitement de sortie d'un système flou type-2.

Le logiciel Fuzzy Logic Toolbox prend en charge quatre méthodes de réduction de type intégrées. Ces algorithmes diffèrent par leurs méthodes d'initialisation, leurs hypothèses, leur efficacité de calcul et leurs conditions de terminaison [37].

Tableau II. 2 : Méthodes de réduction de type.

Méthodes	Propriété Type Réduction	La description
Valeur		
Karnik-Mendel (KM)	"karnikmendel"	Première méthode de réduction de type développée
Enhanced Karnik-Mendel (EKM)	"ekm"	Modification de l'algorithme de Karnik-Mendel avec une initialisation améliorée, une condition de terminaison modifiée et une efficacité de calcul améliorée
Iterative algorithm with stop condition (IASC)	"iasc"	Amélioration itérative des méthodes de force brute
Enhanced iterative algorithm with stop condition (EIASC)	"eiasc"	Version améliorée de l'algorithme IASC

- Les étapes de calcul de l'algorithme de karnik mendel [38]

- **pour calculer le y_l**

- 1) Trier x_i ($i = 1, 2, \dots, N$) dans l'ordre croissant et appeler les x_i triés par le même nom, mais maintenant $x_1 < x_2 < \dots < x_N$. Associer les poids w_i à leurs x_i respectifs et les renuméroter de manière à ce que leur indice corresponde au x_i renuméroté.

- 2) Initialiser w_i en réglant

$$w_i = \frac{\bar{w}_i + \underline{w}_i}{2} \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (1)$$

Puis calculer

$$y = \frac{\sum_{i=1}^N x_i w_i}{\sum_{i=1}^N w_i} \quad (2)$$

- 3) Trouver le point de commutation k ($1 \leq k \leq N-1$) tel que

$$x_k \leq y \leq x_{k+1} \quad (3)$$

- 4) Positionner

$$w_i = \begin{cases} \bar{w}_i, & i \leq k \\ \underline{w}_i, & i > k \end{cases} \quad (4)$$

Et calculer

$$y' = \frac{\sum_{i=1}^N x_i w_i}{\sum_{i=1}^N w_i} \quad (5)$$

- 5) Vérifier si $y' = y$ si oui, arrêter, Poser $y_l = y$ appeler k L. Si non, passer à l'étape 6.
- 6) Définissez $y = y'$ et passer à l'étape 3.

- **Pour calculer le y_r**

- 1) Trier \bar{x}_i ($i = 1, 2, \dots, N$) dans l'ordre croissant et appeler les \bar{x}_i triés par le même nom, mais maintenant $\bar{x}_1 < \bar{x}_2 < \dots < \bar{x}_N$. Associer les poids w_i à leurs \bar{x}_i respectifs et les renuméroter de manière à ce que leur indice corresponde au \bar{x}_i renuméroté.

- 2) Initialiser w_i en réglant

$$w_i = \frac{w_i + \bar{w}_i}{2} \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (6)$$

Puis calculer

$$y = \frac{\sum_{i=1}^N \bar{x}_i w_i}{\sum_{i=1}^N w_i} \quad (7)$$

- 3) Trouver le point de commutation k ($1 \leq k \leq N-1$) tel que

$$\bar{x}_k \leq y \leq \bar{x}_{k+1} \quad (8)$$

4) Positionner

$$w_i = \begin{cases} w_i, & i \leq k \\ \bar{w}_i, & i > k \end{cases} \quad (9)$$

Et calculer

$$y' = \frac{\sum_{i=1}^N \bar{x}_i w_i}{\sum_{i=1}^N w_i} \quad (10)$$

5) Vérifier si $y' = y$ si oui, arrêter, poser $y_r = y$ appeler $k \in \mathbb{R}$. Si non, passer à l'étape

6.

6) Définir $y = y'$ et passer à l'étape 3.

1.3.6.2 Défuzzification

Dans le cas d'un système flou de type 2, une opération de défuzzification étendue peut d'abord obtenir un ensemble flou de type 1. Cette opération de conversion d'un ensemble flou de type 2 en un ensemble flou de type 1 est appelée réduction de type. Nous appelons l'ensemble flou de type 1 résultant : l'ensemble de types réduit. Enfin, l'ensemble flou de type réduction doit être défuzzifié pour obtenir un nombre commun.

1.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons abordé principalement une technique de commande intelligente : la logique floue type 2. La logique floue, établie par Zadeh en 1965, permet la représentation et le traitement de connaissances inexacts ou approximatives. Ces dernières années, le nombre d'applications basées sur la théorie de la logique floue a considérablement augmenté, car la logique floue est généralement représentée par des règles de langage de la forme Si – Alors. Il est utilisé pour résoudre des problèmes de décision de contrôle ou pour décrire le comportement dynamique de systèmes inconnus ou ambigus. La logique floue type 2 est une nouvelle génération car l'ancienne génération c'est la logique floue type 1. Les fonctions d'appartenance floues type-2 sont tridimensionnelles. La nouvelle (troisième) dimension des ensembles flous de type 2 offre un degré de liberté supplémentaire pour prendre en charge l'incertitude de modélisation. Par conséquent, les ensembles flous de type 2 ont la capacité de modéliser l'incertitude car leurs fonctions d'appartenance sont elles-mêmes floues.

Le troisième chapitre est réservé aux trois tests que nous allons simultanément.

Chapitre III :
Test et simulation

Chapitre III : Test et simulation

III.1 Introduction

Les travaux menés dans ce chapitre visent à comprendre et évaluer les capacités de la méthode intelligente (logique floue) de suivi PPM pour les systèmes photovoltaïques autonomes (SPA) et à tester les performances de cette méthode sous différentes conditions météorologiques dont les effets affectent directement les performances de production d'énergie par GPV.

La simulation est un outil puissant pour l'évaluation des performances théoriques d'un système. Ce logiciel (MATLAB) et son extension graphique associée (SIMULINK) font partie d'un ensemble d'outils intégrés au traitement du signal, offrant la possibilité de simuler des systèmes à la fois dans des états continus et discrets. Par conséquent, il est idéal pour simuler et tester les différentes commandes MPPT utilisées dans cette étude.

Nous discutons ensuite les résultats obtenus et tirons des conclusions de ceux qui assurent de meilleures performances et un fonctionnement optimal de la conversion d'énergie photovoltaïque.

III.2 Description du système PV autonome

Notre système PV autonome est constitué de quatre blocs (Figure III.1)

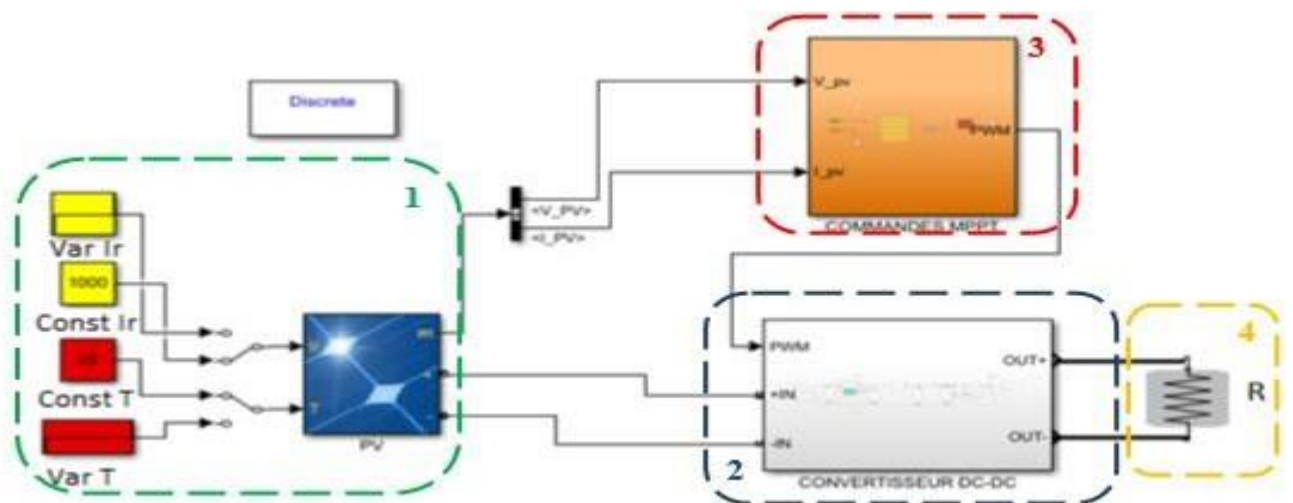


Figure III. 1: Modélisation d'un SPV avec MPPT sous MATLAB/SIMULINK.

Bloc 1 : représente le panneau PV du constructeur BP Solar de référence BP SX3190B. Les entrées du panneau sont le rayonnement représenté en couleur jaune et la température représentée en couleur rouge. Pour chaque entrée, il y a un profil constant et un profil variable, et à partir du switch, on peut choisir le profil.

Bloc 2 : 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 (Voir Figure III.1) :

- 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 **S** en empêchant le retour du courant.
- Un interrupteur à semi-conducteur contrôlable **S**.

Bloc 3 : représente le contrôleur MPPT qui est configuré selon la structure de la méthode à simuler. Les entrées de la commande sont le courant et la tension du panneau et la sortie représente le rapport cyclique qui génère par la suite le signal de modulation MLI.

Bloc 4 : montre la charge résistive connectée au convertisseur.

III.2.1. Schémas de simulation

La figure suivante montre le schémas des trois simulations qu'on a effectuées dans notre travaille

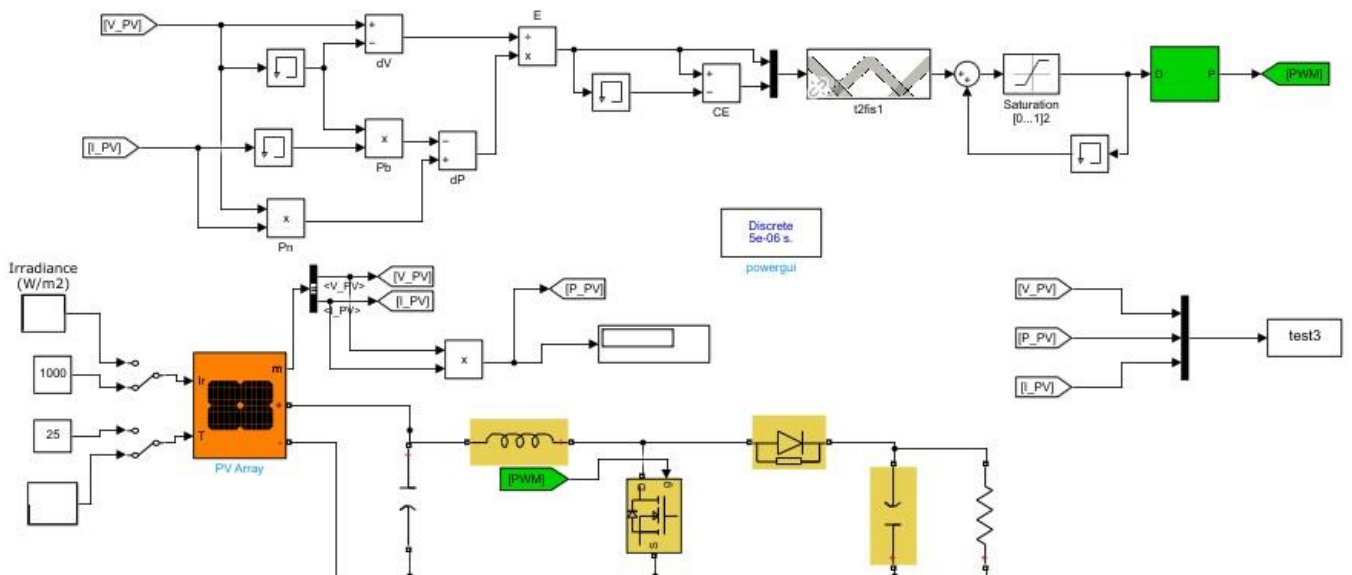


Figure III.2 : Schémas des trois simulations.

III.2.1 Description du contrôleur MPPT flou type 02 basé sur la commande MPPT

III.2.1.1 Variables du contrôleur flou

Dans le système proposé, les variables d'entrées du contrôleur MPPT flou sont l'erreur (E_r) et le changement d'erreur (ΔE_r) alors que la sortie du contrôleur est le changement du rapport cyclique ΔD [40]

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 : [40]

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

$$\Delta E_r(K) = E_r(K) - E_r(K - 1) \quad (\text{III.2})$$

$$\text{Où } P(K) = V(K) * I(K)$$

III.2.1.2 Univers de discours des variables du contrôleur

Une fois que les choix des fonctions d'appartenance et de partitionnement sont faits, il reste à déterminer les univers de discours des variables du contrôleur flou. Après 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 :

- L'intervalle de variation $[-8, 8]$ pour la variable d'entrée E_r ,
- L'intervalle de variation $[-8, 8]$ pour la variable d'entrée ΔE_r
- L'intervalle de variation $[-1, 1]$ pour la variable de sortie ΔD .

III.3 Fuzzification

Dans le processus de fuzzification, les variables d'entrées E_r et ΔE_r et la variable de la sortie ΔD sont converties en variables linguistiques en attribuant des valeurs de fonction d'appartenance. Les fonctions d'appartenances E_r , ΔE_r sont représentées dans les figures (III.3 et III.4) sauf ΔD , où on lui a attribué des valeurs puisque c'est un contrôleur flou SUGENO car dans ce dernier, les sorties sont des constantes ou des fonctions linéaires des valeurs d'entrées. Pour l'erreur E_r , les valeurs sont les suivantes :

$$\text{UMF} = [-8 -8 -4 0 1]$$

$$\text{LMF} = [-8 -8 -4 0 0.5]$$

Pour la variation de l'erreur ΔE_r , les valeurs sont les suivantes :

$$\text{UMF} = [-8 -8 -4 0 1]$$

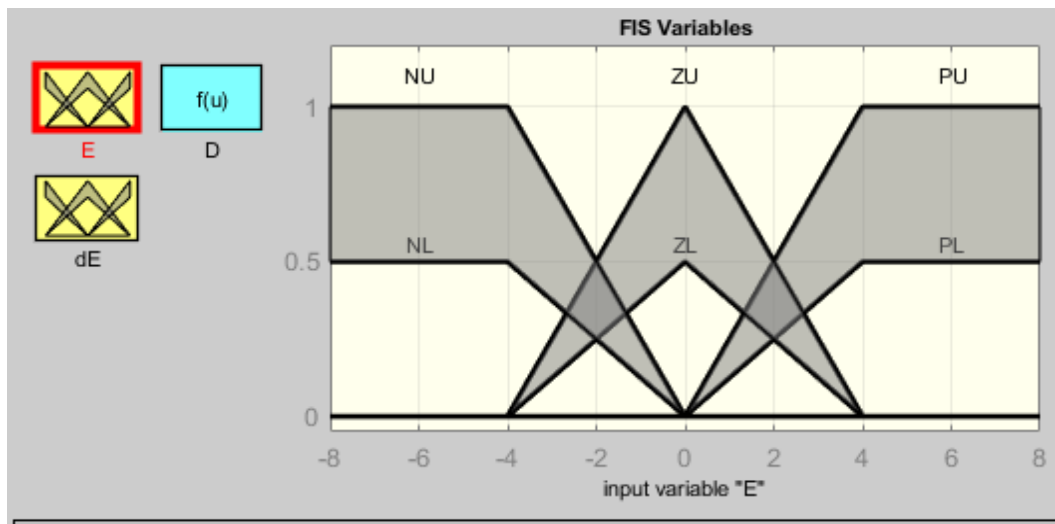
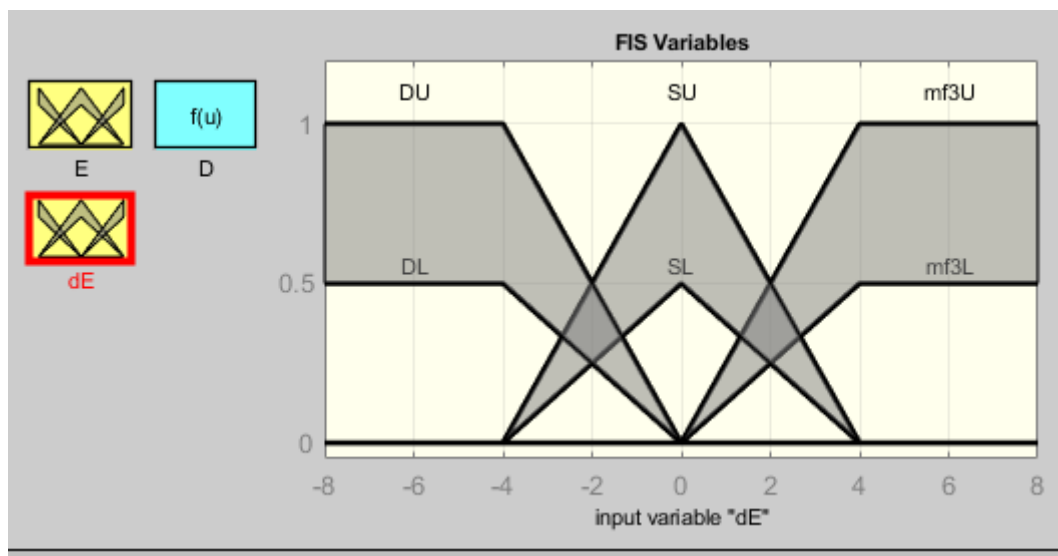
$$\text{LMF} = [-8 -8 -4 0 0.5]$$

Pour ΔD , les valeurs sont les suivantes :

$$(N) = -0.5$$

$$(Z) = 0$$

$$(P) = 0.5$$

Figure III. 3: les fonctions d'appartenance pour E_r .Figure III. 4: les fonctions d'appartenance pour ΔE_r .

III.4 Inférence

Après l'étape de fuzzification, l'étape d'inférence commence à construire des règles floues qui permettent d'aboutir à la commande en fonction des valeurs de l'erreur et de sa variation. Les règles floues relient les variables de sortie aux variables d'entrée pour tirer des conclusions ou des inférences floues. Une règle floue comporte une prémisse du genre « Si l'erreur est négative (N) ET la variation de l'erreur est négative (N) » et une déduction floue du type « Alors la variation du rapport cyclique est positive (+) » [41]. Dans notre cas les deux variables d'entrées sont définies, chacune, par 3 ensembles flous, on aboutit à 3×3 règles floues (cf. Tableau III.1).

Grâce à ces règles floues, et en répondant à la spécification du système, dans notre cas, il s'est positionné au point de puissance maximale. La matrice d'inférence du contrôleur MPPT flou donnant la sortie ΔD peut être tracée (voir Tableau III.1).

Tableau III. 1: Règles d'inférence du contrôleur MPPT flou.

ΔD		ΔE_r		
		N	Z	P
E_r	N	P	P	Z
	Z	P	Z	N
	P	Z	N	N

Les explications de neuf règles de la matrice d'inférence du contrôleur MPPT flou sont détaillées dans les paragraphes suivants :

- **Règle 1 :**

SI $E_r =$ (négatif), le point se situe à droite ; ET $\Delta E_r = N$ (décroit), on se déplace vers la droite ; **ALORS** $\Delta D = P$, il faut changer de direction et se déplacer vers la gauche (diminuer V).

- **Règle 2 :**

SI $E_r =$ (zéro), on est au PPM ; ET $\Delta E_r = N$ (décroit), on se déplace vers la droite ; **ALORS** $\Delta D = P$, il faut revenir au PPM et se déplacer vers la gauche (diminuer V).

- **Règle 3 :**

SI $E_r =$ (positif), le point se situe à gauche ; ET $\Delta E_r = N$ (décroit), on se déplace vers la droite ; **ALORS** $\Delta D = Z$, il faut rester dans cette direction (continuer à augmenter V).

- **Règle 4 :**

SI $E_r =$ (négatif), le point se situe à droite ; ET $\Delta E_r = Z$ (Stable), pas de déplacement

ALORS $\Delta D = P$, il faut se déplacer vers la gauche (diminuer V).

- **Règle 5 :**

SI $E_r =$ (zéro), on est au PPM ; ET $\Delta E_r = Z$ (Stable), pas de déplacement ; **ALORS** $\Delta D = Z$, pas besoin de se déplacer.

- **Règle 6 :**

SI $E_r =$ (positif), le point se situe à gauche ; ET $\Delta E_r = Z$ (Stable), pas de déplacement ;

ALORS $\Delta V = P$, il faut augmenter V .

- **Règle 7 :**

SI $E_r =$ (négatif), le point se situe à droite ; ET $\Delta E_r = P$ (Croît), on se déplace vers la gauche ; **ALORS** $\Delta D = Z$, il faut rester dans cette direction (continuer à diminuer V).

- **Règle 8 :**

SI $E_r =$ (zéro), on est au PPM ; ET $\Delta E_r = P$ (Croît), on se déplace vers la gauche ;

ALORS $\Delta D = N$, il faut revenir au PPM et se déplacer vers la droite (augmenter V).

- **Règle 9 :**

SI $E_r =$ (positif), le point se situe à gauche ; ET $\Delta E_r = P$ (Croît), on se déplace vers la gauche ; **ALORS** $\Delta V = N$, il faut revenir au PPM et se déplacer vers la droite (augmenter

V).

III.5 Réduction de type et défuzzification

Dans ces deux étapes on utilise la méthode de Karnik Mendel (KM) où ses algorithmes sont des procédures itératives largement utilisées dans la théorie de la logique floue. Ils sont connus pour converger de manière monotone et super-exponentiellement rapide ; cependant, plusieurs (généralement deux à six) itérations sont encore nécessaires avant que la convergence ne se produise.

III.6 Tests et simulation

III.6.1 Simulation sous des conditions STC :

Une étude a été faite sous les conditions STC (Standard Test Conditions) c'est-à-dire avec un éclairement fixé à 1000W/m^2 et la température à 25°C .

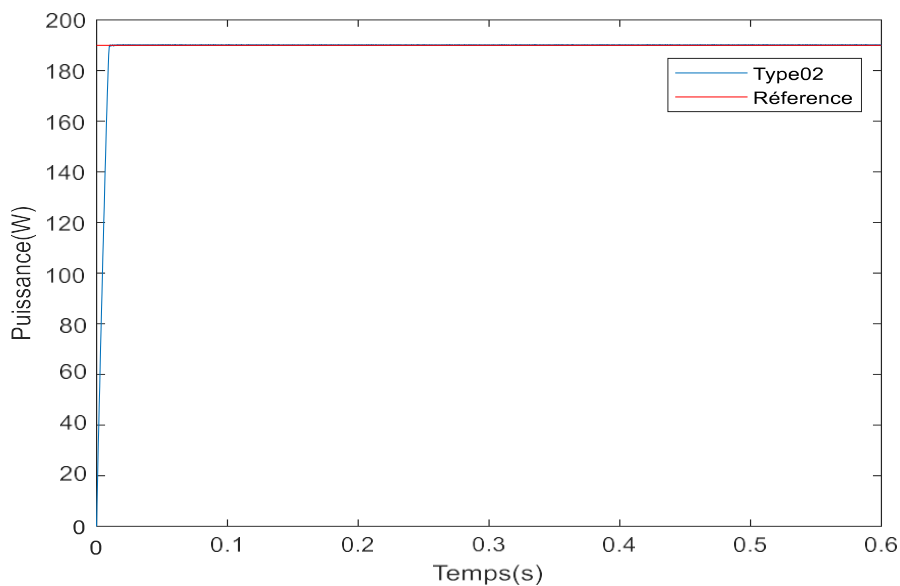


Figure III. 5: Evolution de la puissance du GPV.

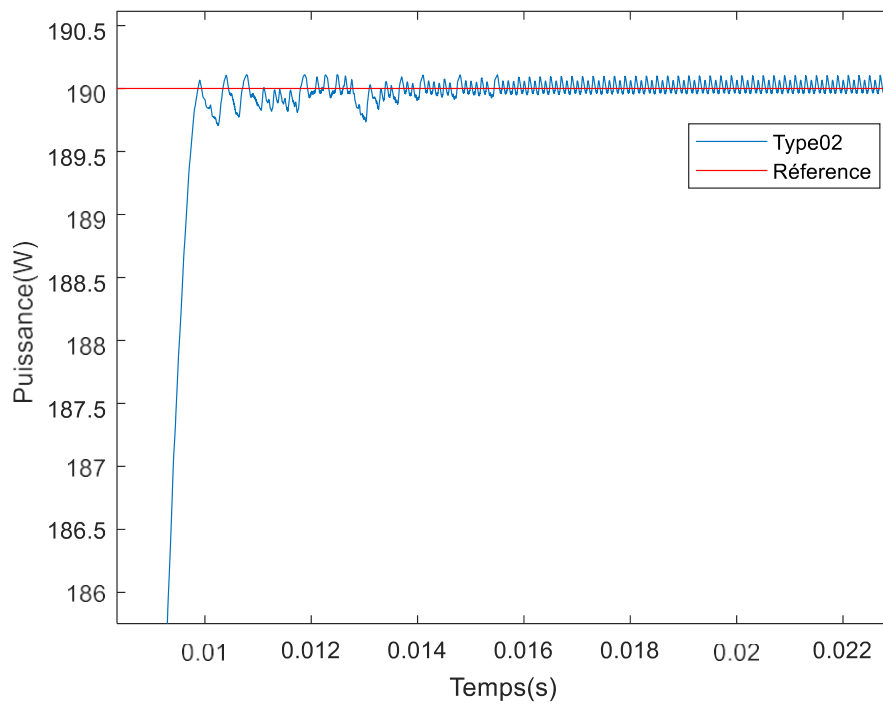


Figure III. 6: zoom sur l'évolution de la puissance du GPV.

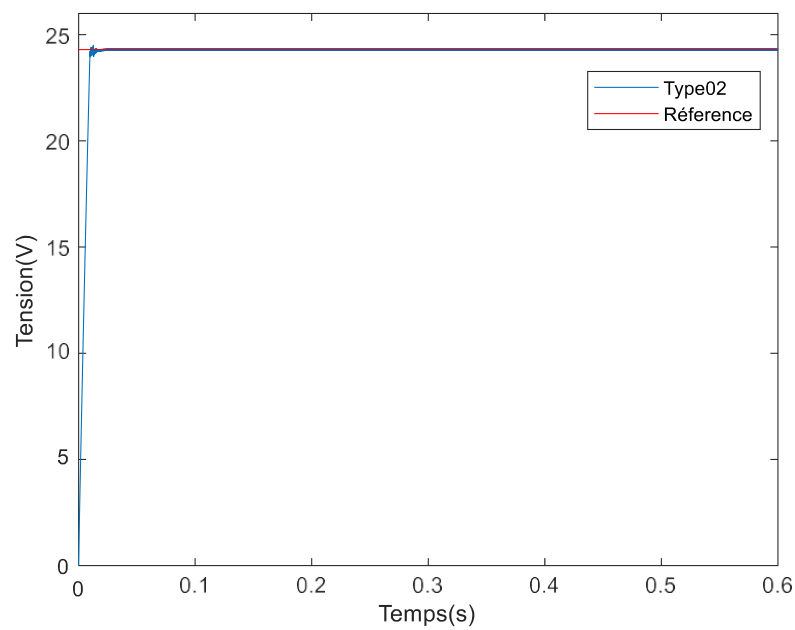


Figure III. 7: Evolution de la tension du GPV.

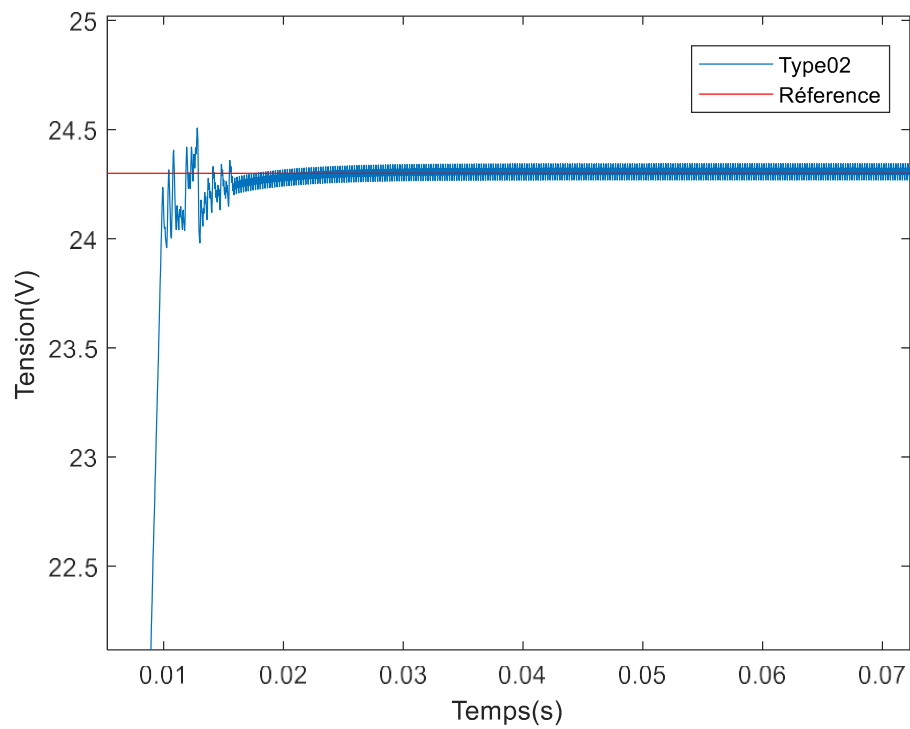


Figure III. 8: zoom sur l'évolution de la tension du GPV.

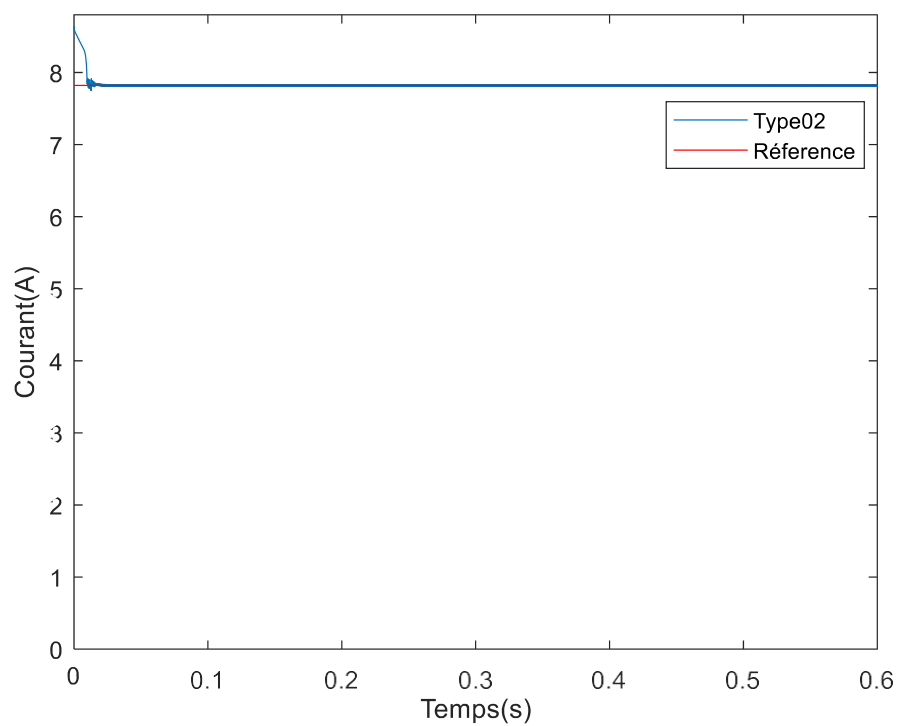


Figure III. 9: l'évolution du courant du GPV.

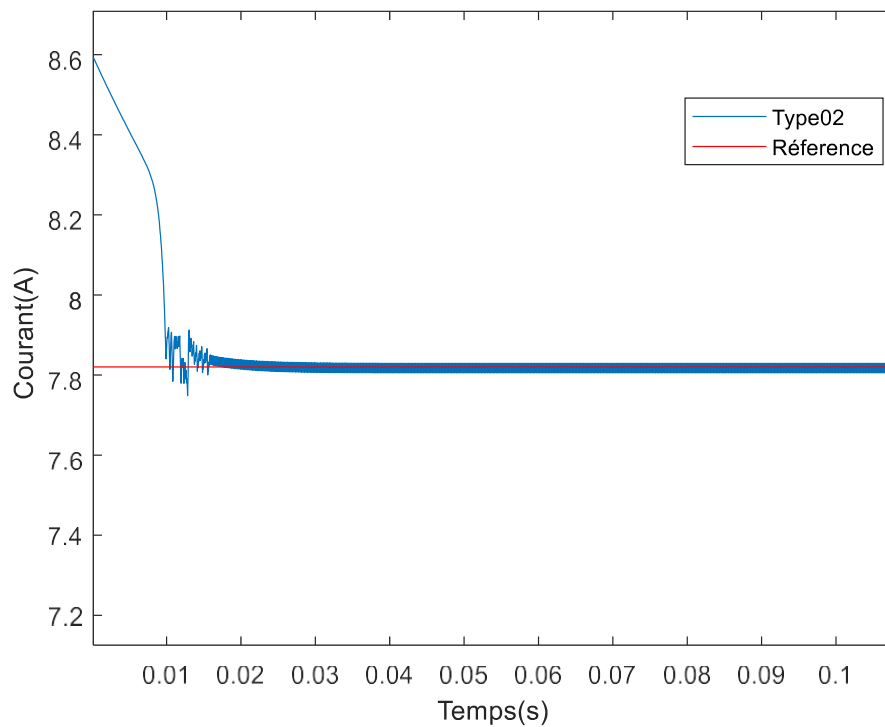


Figure III. 10: zoom sur l'évolution de courant du GPV.

On remarque sur la **figure III.7** que le signal de logique floue de type-2 atteint et converge vers la puissance maximale ≈ 190 (w), ce qui montre l'efficacité et la robustesse de son algorithme.

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.

D'après les résultats de simulation obtenus, on remarque que le contrôleur flou de type-2 conduit à d'excellentes performances comme le montre la **figure III.8**, avec l'absence des oscillations dans le régime permanent, et un temps de réponse très rapide (0.01s), et l'erreur est presque inexistante.

Pour les signaux de la tension et du courant du système, ils atteignent leurs points de convergence au même moment que le signal de puissance c'est-à-dire à 0.01s selon les (**figures III.9** et **III.10**) pour se stabiliser aux alentours de 24.3 V pour le signal de tension, et

7.82 A pour le signal du courant

III.6.2 Tests de fonctionnement sous des conditions atmosphériques variables

La première simulation a été réalisée sous des conditions STC. Cependant, dans cette section, des profils variables de l'éclairement et de la température ont été testés.

III.6.2.1 Variation de l'éclairement

Pour ce test un profil d'ensoleillement variable a été choisi [600 1000 800] W/m² comme le montre la Figure 44 et sous une température constante de 25°C.

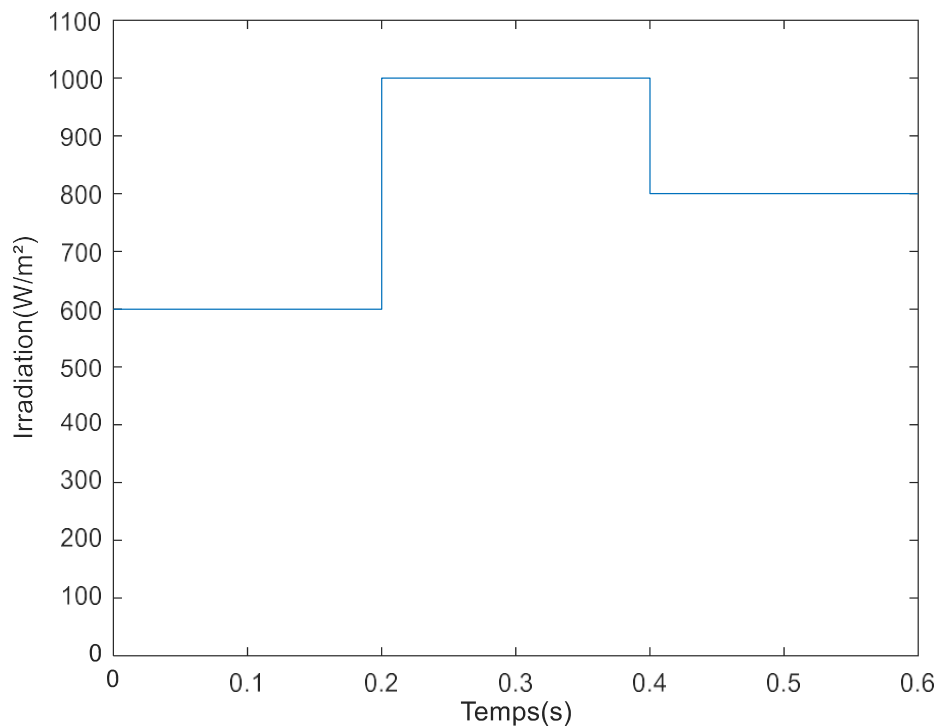


Figure III. 11: Profil d'ensoleillement injecté dans le GPV.

L'évolution de la puissance de la tension et du courant du GPV commandée par la logique floue type 2 est représentée par **les figures III.12, III.14 et III.16.**

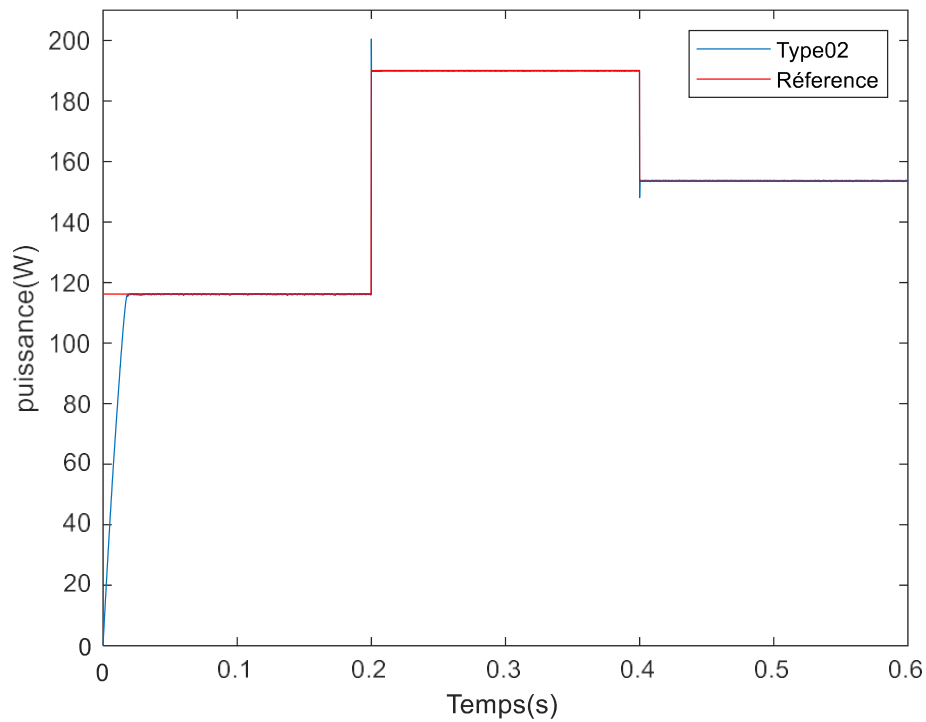


Figure III. 12: Evolution de la puissance en cas de changement brusque d'ensoleillement.

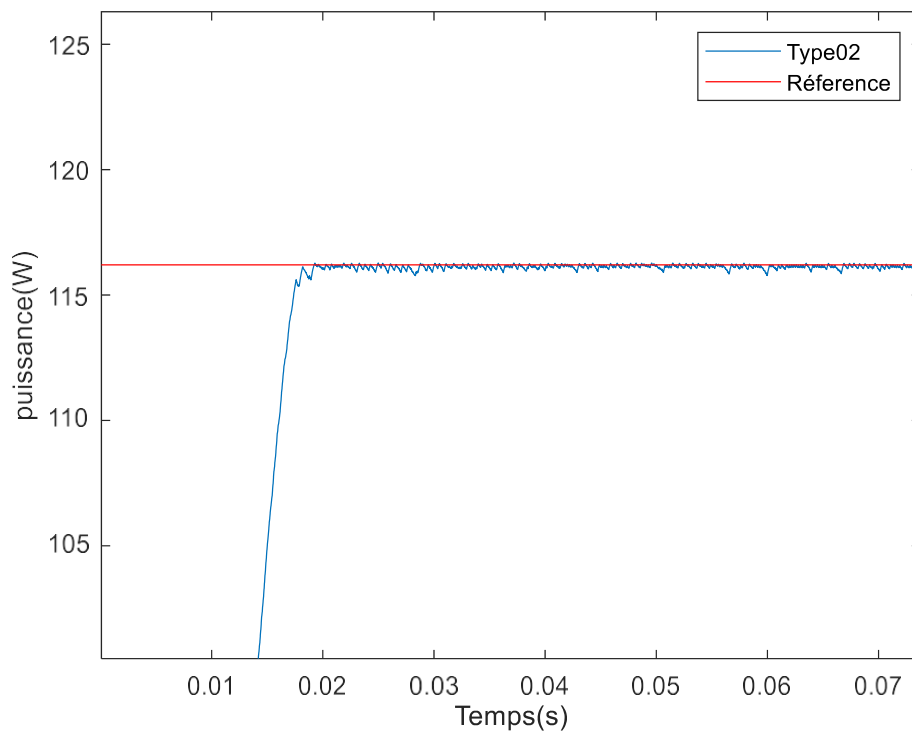


Figure III. 13: zoom sur l'évolution de la puissance en cas de changement brusque d'ensoleillement.

Pour les séries de tests effectués, nous constatons que le signal du contrôleur flou type-2 varie le rapport cyclique dans le but de poursuivre le PPM, ce dernier suit la variation

d'irradiation et du signal de référence associé.

Selon la (Figures III.13) on remarque qu'au moment où l'ensoleillement change (augmente ou diminue) brusquement, l'algorithme perd le point de puissance maximale. Le point de fonctionnement s'écarte de sa valeur de référence. Dès que la valeur de l'ensoleillement se stabilise, l'algorithme reprend le contrôle et le point de fonctionnement converge rapidement vers sa position référentielle optimale.

Selon la zone zoomée (Figures III.14) on remarque que le temps de convergence est maintenant de 0.02s, on a un signal plus lent dû à un plus faible ensoleillement dans cet intervalle de temps (600W/m^2).

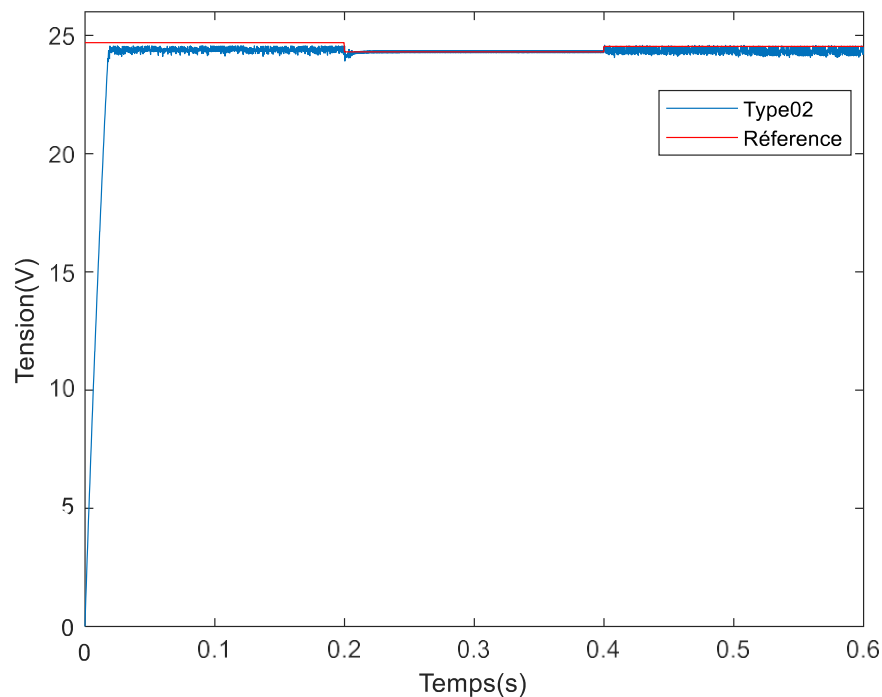


Figure III. 14: Evolution de la tension en cas de changement brusque d'ensoleillement.

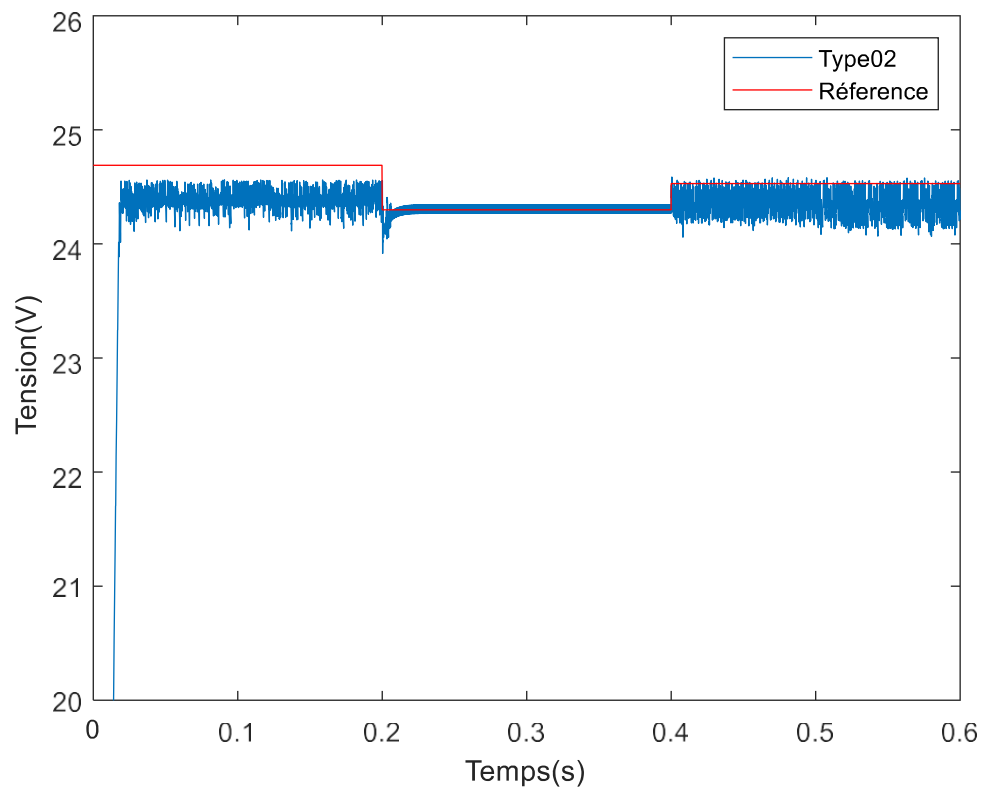


Figure III. 15: Zoom sur l'évolution de la tension en cas de changement brusque d'ensoleillement.

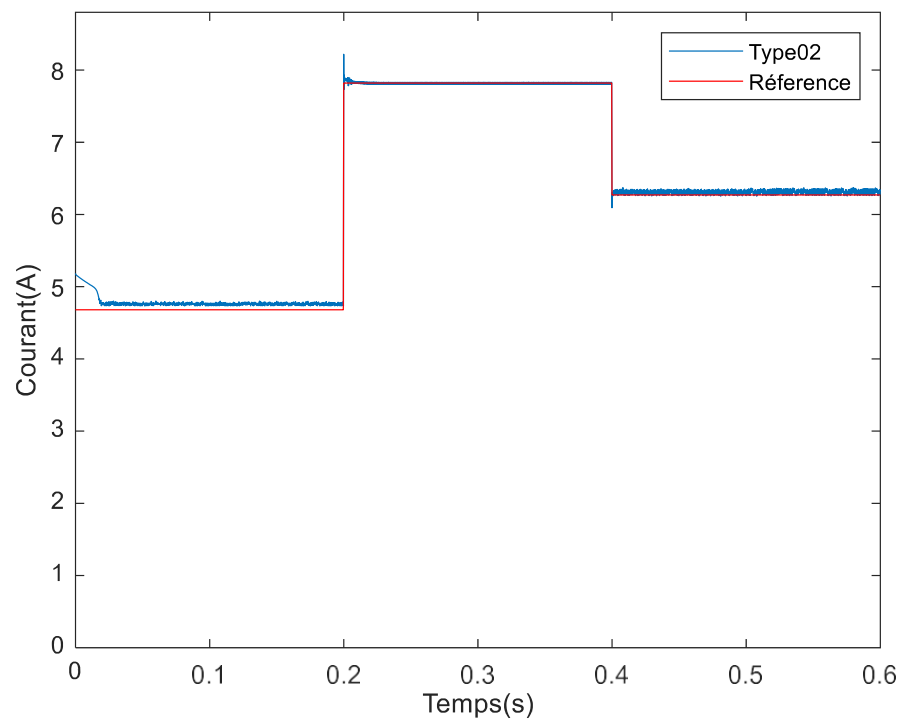


Figure III. 16: Evolution du courant en cas de changement brusque d'ensoleillement.

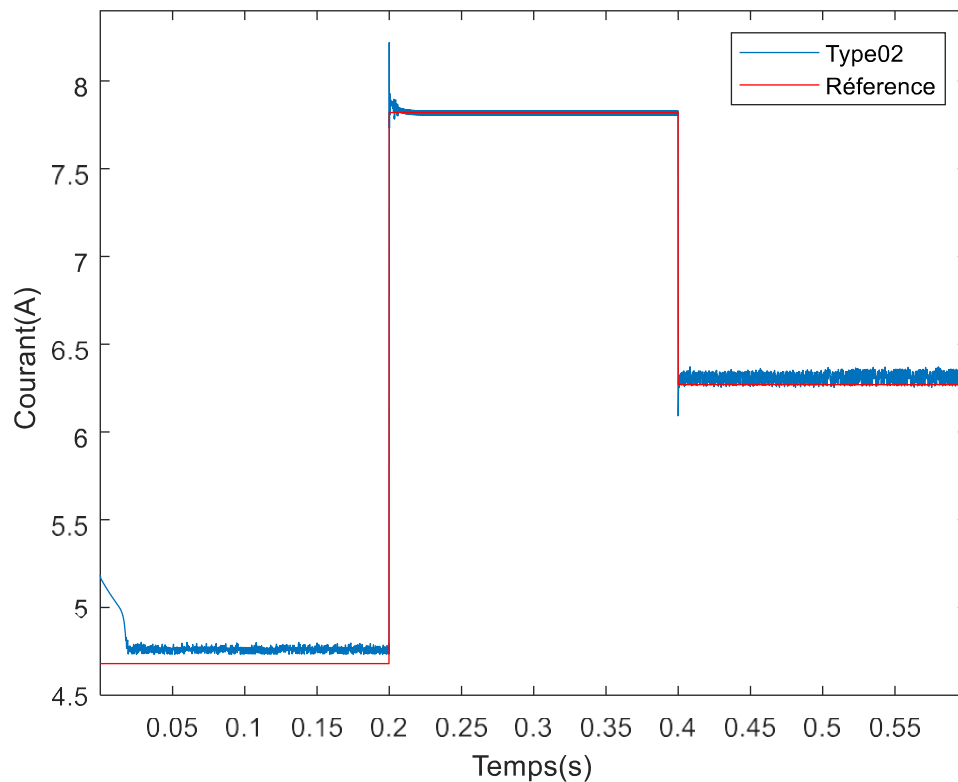


Figure III. 17: Zoom sur l'évolution du courant en cas de changement brusque d'ensoleillement.

On remarque que la variation de l'ensoleillement n'affecte pas significativement la tension de notre système contrairement au courant, leurs points communs sont leur instabilité et un léger décalage avec le signal de référence dans l'intervalle de temps $[0, 0.2]$ (s) et $[0.4, 0.6]$ (s) ce qui correspond respectivement à 600 W/m^2 et 800 W/m^2 .

III.6.2.2 Variation de la température

Cette fois-ci nous allons simuler le même système PV précédent, pour un ensoleillement ($G=1000 \text{ w/m}^2$) et sous un profil de température variable avec les valeurs suivantes : $[25 \ 22 \ 28]$ Le profil est représenté sur la **Figure III.19**.

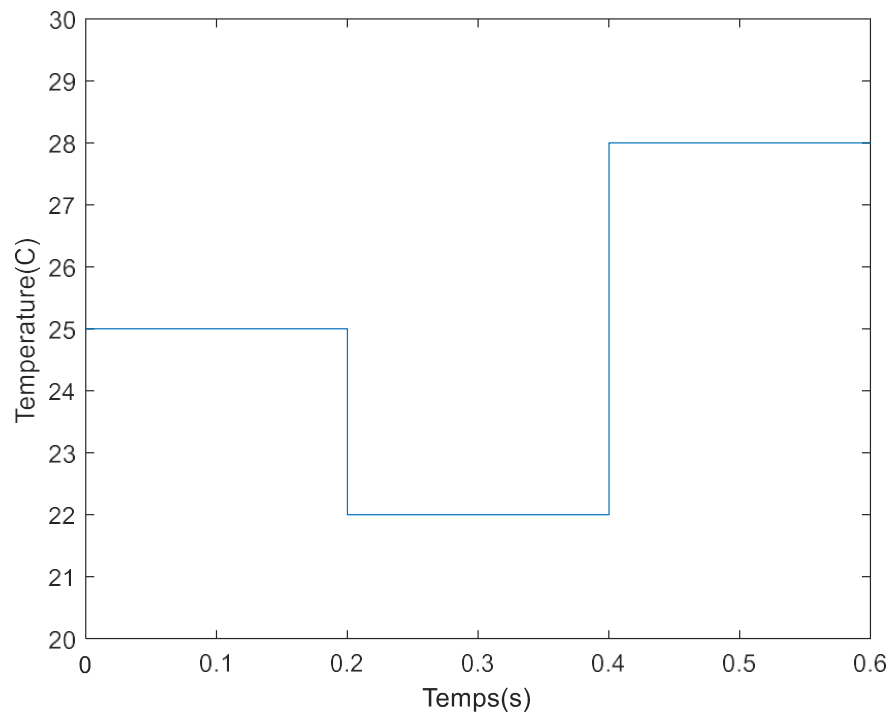


Figure III. 18: Profil de température injecté dans le GPV.

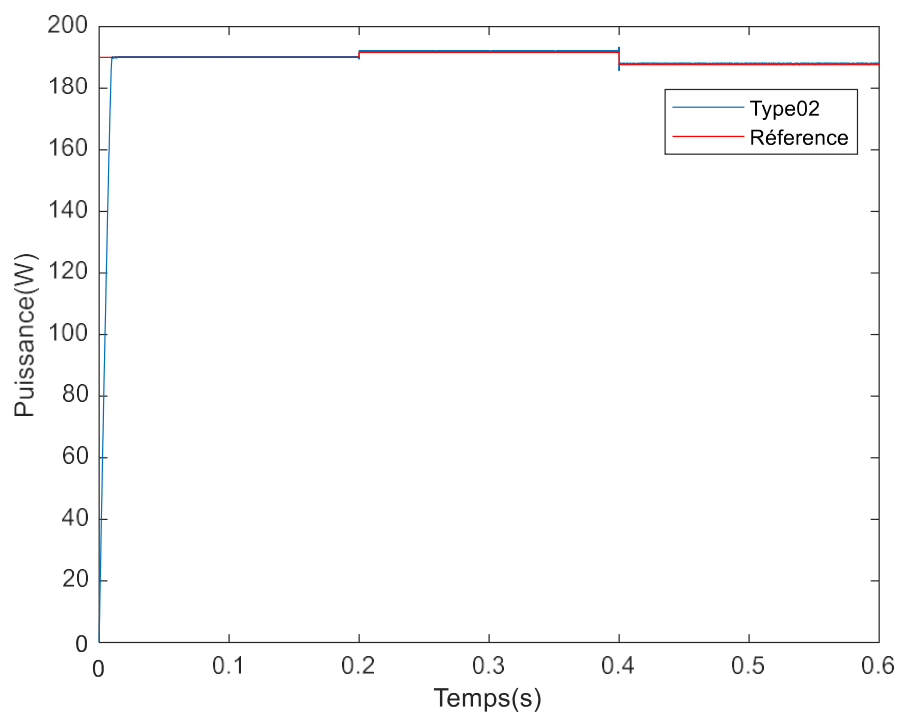


Figure III. 19: Evolution de la puissance en cas de changement brusque de la température.

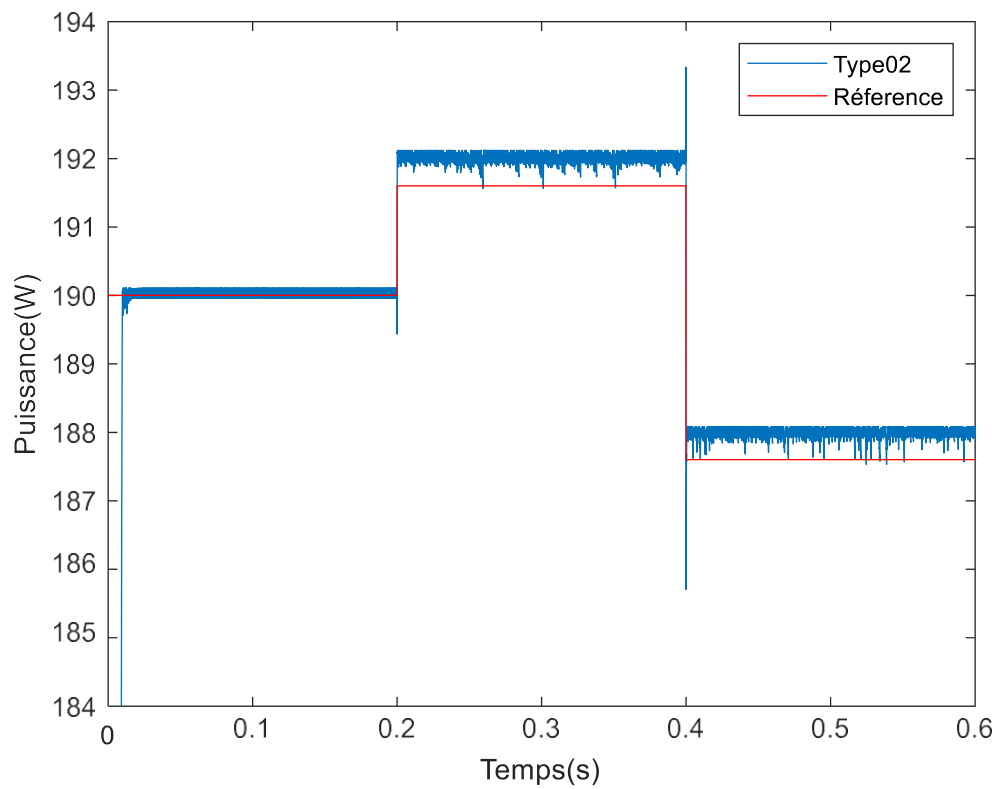


Figure III. 20 : Zoom sur l'évolution de la puissance en cas de changement brusque de la température.

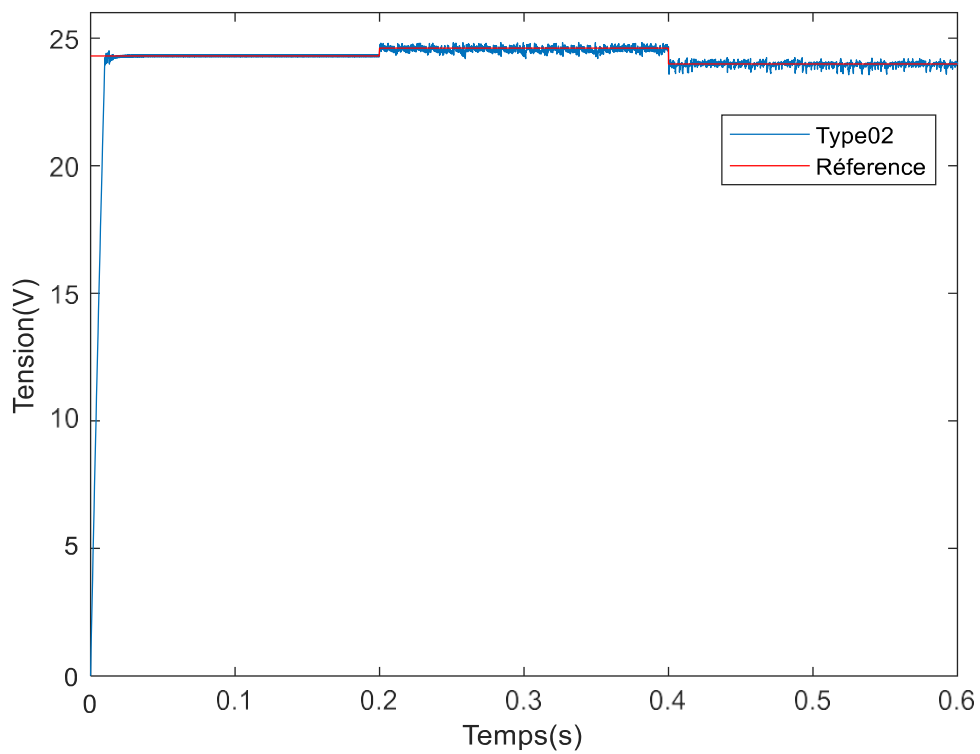


Figure III. 21: Evolution de la tension en cas de changement brusque de la température.

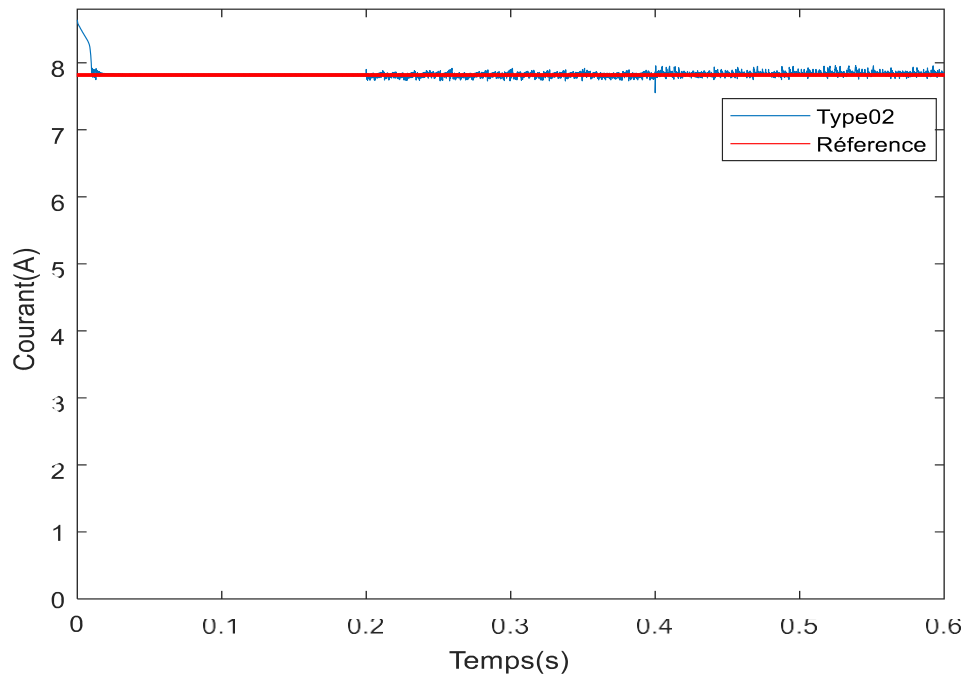


Figure III. 22: Evolution du courant en cas de changement brusque de la température.

On remarque que la variation de la température a peu d'effet sur le courant et la tension, par contre on observe une meilleure stabilité sur l'intervalle $[0, 0.2]$ qui correspond à la variation de température 25°C qu'à 22°C et 28°C dont les intervalles de temps correspondent à $[0.2, 0.4]$ et $[0.4, 0.6]$.

Comme pour le courant et la tension, varier la température n'a qu'un effet minime sur la puissance de notre système, mais on observe les habituels changements brusques de puissance entre chaque variation de température et on remarque un léger gain de puissance à 22°C par rapport à 25°C en échange d'une plus grande instabilité à 22°C ainsi qu'à 28°C .

III.7 Conclusion

Ce chapitre présente les résultats obtenus de la méthode intelligente de commande MPPT basée sur un contrôleur flou type 2 appliqués à un panneau PV. Le travail a été réalisé sous des STC puis deux autres tests où on fait varier l'ensoleillement puis la température.

Nous avons effectué une étude comparative entre méthodes MPPT (FLC T2) avec un signal de référence sous des conditions atmosphériques standards et variables.

Les résultats obtenus lors de cette étude montrent que la commande par la logique floue type 2 est très efficace et stable pour la poursuite du point de puissance maximale de façon optimale.

Conclusion générale

Conclusion générale

Dans ce modeste travail nous avons montré l'efficacité de la logique floue de type-2 appliquée pour la poursuite du point maximum de puissance afin d'améliorer l'efficacité des systèmes de conversion photovoltaïques.

Les panneaux photovoltaïques nous ont donné une occasion d'avoir une énergie durable, propre sans effet de serre pour une utilisation autonome à domicile ou bien une utilisation raccordée au réseau de production, et afin de profiter de cette énergie, on cherche toujours à avoir un meilleur rendement produit par cette dernière en utilisant des nouvelles technologies de commande, et parmi ces technologies on a opté pour la commande MPPT de logique floue de type-2.

Nous avons abordé la notion de logique floue, plus particulièrement du contrôleur de logique floue de type-2 où plusieurs points ont été traités : sa différence avec le contrôleur flou de type-1, ses définitions, opérations sur les ensembles flous, ainsi nous avons étudié la structure des contrôleurs flous type-2.

Nous avons modélisé puis simulé sous le logiciel de simulation Matlab/Simulink notre système photovoltaïque commandé par un contrôleur flou de type-2 puis comparé les résultats trouvés par rapport à une référence, d'abord sous des conditions STC (Standard Test Conditions) puis sous conditions variables de températures et d'ensoleillement et on est arrivé à la conclusion que le contrôleur flou de type-2 montre de bonnes performances de poursuite en termes de rapidité de convergence.

Références bibliographiques

- [1] Mousa, H. H., Youssef, A. R., & Mohamed, E. E. (2021). State of the art perturb and observe MPPT algorithms based wind energy conversion systems: A technology review. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 126, 106598.
- [2] Kumar, P., & Diwan, R. (2017). A Comprehensive Review of Maximum Power Point Tracking Algorithm for Photovoltaic System. *Journal of Science and Technology (JST)*, 2(6), 28-32.
- [3] D. Petreus, et al: "A novel maximum power point tracker based on analog and digital control loops". *Solar Energy* 85 (2011) 588–600. 2007.
- [4] A, Zegaoui, M. Aillerie1, P. Petit1, J.P. Sawicki, A. Jaafar, C. Salame and J.P. Charles: " Comparison of Two Common Maximum Power Point Trackers by Simulating of PV Generators". *Energy Procedia* 6 (2011) 678–687
- [5] Kumar, P., & Diwan, R. (2017). A Comprehensive Review of Maximum Power Point Tracking Algorithm for Photovoltaic System. *Journal of Science and Technology (JST)*, 2(6), 28-32.
- [6] Rekioua, D., Zaouche, F., Hassani, H., Rekioua, T., & Bacha, S. (2019). Modeling and fuzzy logic control of a stand-alone photovoltaic system with battery storage. *Turkish Journal of Electromechanics and Energy*, 4(1).
- [7] J. M. Mendel “computing with words : Zadeh,turing,Popper and Occam“ *IEEE Comput. Intell. Mag*, vol 2, no. 4, pp, 10-17, Nov 2007
- [8] Boukhers Djamil « optimisation d’un système d’énergie photovoltaïque application au pompage. » Magister en électrotechnique université Mentouri de Constantine 28/ 11/ 2007
- [9] Dr. Chaouki GHENNAI « Systèmes de Conversion Photovoltaïque » université Batna 2
- [10] Sofia, B. L. (2015). Cours Energie Solaire Photovoltaïque. Université Abderrahmane MIRA de BEJAIA.
- [11] V. Boitier, C. Alonso, (2013) Mémoire Pour l’obtention du titre de MAGISTER Option : Physique énergétique Présenté Par : SMAIL SEMAOUI Thème Etude de l’électrification d’un village avec de l’énergie solaire photovoltaïque Soutenu, le: 23 / 06 / 2014 ; dimensionnement d'un Système Photovoltaïque
- [12] Belatel, M. Etude d’un Système Photovoltaïque Hybridé avec un Groupe Diesel pour un Développement Durable. In 5ème Conférence Internationale des Energies Renouvelables (CIER–2017), Proceeding of Engineering and Technology–PET (Vol. 30, pp. 23- 28)
- [13] Richet, N. (2021). Les cellules photovoltaïques en silicium : théorie et fabrication. *EDP sciences*.
- [14] « Types de cellules » consulte le site <https://energieplus->

Références bibliographiques

lesite.be/techniques/photovoltaique3/types-de-cellules/ 2021

- [15] A. Ould Mohamed Yahya, A. Ould Mahmoud Et I. Youm « etude et modélisation d'un générateur photovoltaïque » revue des energies renouvelables vol. 11 n°3 sénégal, 2008
- [16] Harrag A, Messalti S (2016). Adaptive GA-based reconfiguration of photovoltaic array combating partial shading conditions. Neural Comput Appl.
- [17] Aouchiche, N.(2020). Conception d'une commande MPPT optimale à base d'intelligence artificielle d'un système photovoltaïque. Doctoral dissertation, Université Bourgogne Franche-Comté.
- [18] Sahraoui, H.(2017). Modélisation et commande des convertisseurs DC-DC utilisés dans les systèmes photovoltaïques (théorie et expérimentation). Doctoral dissertation, Université de Batna 2.
- [19] Mohamed, O. (2018). Poursuite du point de puissance maximale d'un système photovoltaïque. [20] Lasmi, Y.(2018). Optimisation de la poursuite du point de puissance maximale (MPPT) d'un système photovoltaïque par les techniques intelligentes. Doctoral dissertation.
- [21] J. Ferrieux, f. Forest, « alimentations a découpage convertisseurs a résonance: principes composants modélisation ». Paris, france: dunod, 1999
- [22] Menniti, D., Burgio, A., Sorrentino, N., Pinnarelli, A., & Brusco, G. (2009, September). An incremental conductance method with variable step size for MPPT: Design and implementation. In 2009 10th International Conference on Electrical Power Quality and Utilisation (pp. 1-5). IEEE
- [24] SADOUNI, R. Cours : Commande Intelligente (Spécialité: Master 2_Automatique et Systèmes). December 2019 At : Université de Ghardaia - ALGERIA. Voir le site : <https://www.researchgate.net/publication/33851719>
- [25] J.Lvern, « La logique floue : Concepts et définitions », Electronique radio plan541, pp11-18, 1992
- [26] H.Buhler, « Réglage par logique floue », Presses polytechniques romandes, 1994.
- [27] D.Driankov, H.Hellendoorn et M.Reinfrank « An introduction : fuzzy control », Springer Verlag, 1996.
- [28] M.Jamshidi, N.Vadiee et T.J.Ross, « Fuzzy logic and control », Prentice-Hall, 1993.
- [29] GIND 5439- Gabriel Cormier, « Système intelligent chapitre 4 : logique floue », université de Moncton.
- [30] L. A. Zadeh, « Fuzzy sets, fuzzy logic and fuzzy systems »,

Références bibliographiques

World Scientific Publishing 1996

[31] DERNONCOURT, F. (2011). Introduction à la logique floue. Licence Commons-BY-SA. <http://franckdernoncourt.developpez.com/tutoriels/algo/introduction-logique-floue/>, Paris.

[32] Castillo, O., Melin, P., Kacprzyk, J., & Pedrycz, W. (2007, November). Type-2 fuzzy logic : theory and applications. In 2007 IEEE international conference on granular computing (GRC 2007) (pp. 145-145). IEEE.

[33] N. N. Karnik, J. M. Mendel et Q. Liang, "Type-2 fuzzy logic systems," IEEE Trans. Fuzzy Syst., vol. 7, no. 6, pp. 643-658, Dec. 1999.

[34] Q. Liang, J. M. Mendel, 'Interval type-2 fuzzy logic systems: theory and design', IEEE transactions on fuzzy, vol. 8, no. 5, 2000.

[35] N. N. Karnik, et J. M. Mendel, "Type-2 fuzzy logic systems: Type- reduction," Proc. IEEE conference on Systems, Man and Cybernetics, pp. 2046-2051, Oct. 1998.

[36] N. N. Karnik, et J. M. Mendel, "An introduction to type-2 fuzzy logic systems," Univ. Southern California, Rep., Oct. 1998

[37] « Type-2 Fuzzy Inference Systems » <https://www.mathworks.com/help/fuzzy/type-2-fuzzy-inference-systems.html>

[38] J.M. Mendel, Rule-based fuzzy logic system : Introduction and new direction. Upper Saddle River, NJ: Prentice-hall , 2001.

[39] N. N. Karnik, et J. M. Mendel, "Centroid of a type-2 Fuzzy set," Information Sciences, vol 132, pp. 195-220, 2001

[40] 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.

[41] Ajaamoum, M., Kourchi, M., Bouachrine, B., Ihlal, A., & Bouhouch, L. (2015). Comparaison du contrôleur flou Takagi-Sugeno et de la commande " P & O" pour l'extraction de la puissance maximale d'un système photovoltaïque [Comparison of Takagi-Sugenofuzzy controller and the command " P & O" for extracting the maximum power from a photovoltaic system]. International Journal of Innovation and Applied Studies, 10(1), 192.

Résumé

L'objectif principal de ce mémoire réside sur l'application de la commande MPPT par la logique floue-2 pour un système photovoltaïque .il s'agit en premier lieu de tester notre panneau photovoltaïque branché directement a la charge et on remarque vite le problème, c'est l'incapacité à maintenir le point de puissance maximal du PV. Ensuite, on propose la commande par la logique floue type-2 qui va s'avérer être une méthode très efficace.

Ce travail présente une étude par simulation sur le logiciel matlab/simulink ou le système sera commandé par un contrôleur flou de type-2 sous les conditions STC puis avec des conditions d'enseilllements et de températures variables.

Les résultats de simulations ont montrés l'efficacité de l'approche proposée en terme de vitesse de convergence et stabilité ce qui prouve la robustesse l'efficacité et la fiabilité de ce type de contrôleur.

Abstract

The main objective of this thesis is to apply the MPPT control by fuzzy logic-2 for a photovoltaic system. First, we test our photovoltaic panel connected directly to the load and we quickly notice the problem, which is the inability to maintain the maximum power point of the PV. Then, we propose the control by the fuzzy logic type-2 which will prove to be a very effective method.

This work presents a simulation study on matlab/simulink software where the system will be controlled by a type-2 fuzzy controller under STC conditions and then with variable sunlight and temperature conditions.

The simulation results show the effectiveness of the proposed approach in terms of convergence speed and stability which proves the robustness, efficiency and reliability of this type of controller.