

FACULTE DE TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT GENIE ELECTRIQUE

FILIERE : AUTOMATIQUE

OPTION : AUTOMATIQUE ET SYSTEME

Numéro d'inscription : AUT/01

**Projet de fin d'études Pour l'obtention du diplôme de
Master Académique :**

**Optimisation du suivi du point de puissance maximale pour les systèmes
photovoltaïques à l'aide de contrôleurs logiques flous de type 2**

Préparé par :

- *RABHI Aziz*

- *ZAZGAD Aymen*

Devant le Jury composé de :

Nom et Prénom	Etablissement	Qualité
Dr. BOUDIA Assam	Univ. de M'sila	Encadreur
Dr.HERIZI Abdelguafour	Univ. de M'sila	Examineur
Dr.ROUABHI Riad	Univ. de M'sila	Examineur

Année universitaire : 2024/2025

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Remerciements

En premier lieu, nous remercions Dieu de nous avoir donné le courage et la patience nécessaires pour mener à bien ce modeste travail tout au long de cette année riche en efforts.

Nous adressons nos remerciements les plus sincères à :

Monsieur Boudia, Assam notre encadrant, pour ses conseils avisés, sa patience, son engagement et ses suggestions précieuses qui ont grandement facilité la réalisation de ce travail.

Les membres du jury, pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre travail en acceptant de l'évaluer et de l'enrichir par leurs remarques et propositions constructives

Dédicaces

Je dédie ce travail :

✚ *A mon cher père et ma chère*

✚ *A mes chers frères et sœurs ;*

✚ *A toute ma famille ;*

✚ *A tous ceux qui ont sacrifié leur temps pour la science et à tous ceux qui utilisent la science pour le bien et la prospérité de l'humanité.*

Dédicaces

Je dédie ce travail :

✚ *A mon cher père et ma chère*

✚ *A mes chers frères et sœurs ;*

✚ *A toute ma famille ;*

✚ *A tous ceux qui ont sacrifié leur temps pour la science et à tous ceux qui utilisent la science pour le bien et la prospérité de l'humanité.*

Table des matières

Introduction Générale : Error! Bookmark not defined.

Chapitre 01: Généralité sur le système photovoltaïque

1.1 Introduction : Error! Bookmark not defined.

1.2 HISTORIQUE DES ENERGIES RENOUVELABLE..... Error! Bookmark not defined.

1.3 Définition Energies renouvelable :..... Error! Bookmark not defined.

1.4 Les types d'énergie renouvelable :..... Error! Bookmark not defined.

1.5 Définition de l'énergie solaire :..... Error! Bookmark not defined.

1.6 Caractéristiques Principales de l'énergie solaire : Error! Bookmark not defined.

1.6.1 Renouvelable et inépuisable : **Error! Bookmark not defined.**

1.6.2 Propre et respectueuse de l'environnement : **Error! Bookmark not defined.**

1.6.3 Applications variées:..... **Error! Bookmark not defined.**

1.6.4 Disponibilité mondiale : **Error! Bookmark not defined.**

1.7 Le fonctionnement des panneaux solaires : Error! Bookmark not defined.

1.8 SYSTEM PV: Error! Bookmark not defined.

1.8.1 Historique..... **Error! Bookmark not defined.**

1.8.1 L'effet photovoltaïque **Error! Bookmark not defined.**

1.8.2 La cellule PV **Error! Bookmark not defined.**

1.9 Type des cellules photovoltaïques Error! Bookmark not defined.

1.9.1 Les cellules monocristallines : **Error! Bookmark not defined.**

1.9.2 Les cellules polycristallines : **Error! Bookmark not defined.**

1.9.3 Les cellules amorphes : **Error! Bookmark not defined.**

1.10 Modélisation d'un système photovoltaïque..... Error! Bookmark not defined.

1.10.1 Cas d'une cellule idéale : **Error! Bookmark not defined.**

1.10.2 Cas d'une cellule réelle : **Error! Bookmark not defined.**

1.10.3 Cas d'un module photovoltaïque : **Error! Bookmark not defined.**

1.11 Influence de l'Irradiation..... Error! Bookmark not defined.

1.12 Influence de la Température..... Error! Bookmark not defined.

1.13 Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque :..... Error! Bookmark not defined.

1.13.1 ➤ Les avantages : **Error! Bookmark not defined.**

1.13.2 ➤ Les inconvénients : **Error! Bookmark not defined.**

1.14 Conclusion..... Error! Bookmark not defined.

Chapitre 02 : Commande d'un système photovoltaïque par la méthode de perturbation et d'observation

2.1 Introduction : Error! Bookmark not defined.

2.2	MPPT Problématique	Error! Bookmark not defined.
2.3	Commande pour la recherche du Point de Puissance Maximale (MPPT)	Error! Bookmark not defined.
2.4	LE PROCESSUS DE SUIVI DU POINT DE PUISSANCE MAXIMALE :	Error! Bookmark not defined.
2.5	Les convertisseurs DC-DC	Error! Bookmark not defined.
2.6	Avantages et inconvénients des convertisseurs	Error! Bookmark not defined.
2.6.1	Avantages :	Error! Bookmark not defined.
2.6.2	Inconvénients :	Error! Bookmark not defined.
2.7	La conception du convertisseur DC-DC Boost	Error! Bookmark not defined.
2.7.1	Définition	Error! Bookmark not defined.
2.7.2	Fonctionnement	Error! Bookmark not defined.
2.7.3	Avantages du convertisseur BOOST :	Error! Bookmark not defined.
2.8	La méthode “Perturbe and Observe” (P&O)	Error! Bookmark not defined.
2.9	Principe des techniques “Perturbe and Observe” (P&O)	Error! Bookmark not defined.
2.10	Avantages et inconvénients de la méthode P&O :	Error! Bookmark not defined.
2.10.1	Avantages de la méthode P&O :	Error! Bookmark not defined.
2.10.2	Inconvénients de la méthode P&O :	Error! Bookmark not defined.
2.11	Conclusion	Error! Bookmark not defined.
Chapitre 03 : Commande d’un système photovoltaïque par la logique flou		
3.1	Introduction :	Error! Bookmark not defined.
3.2	La logique floue de type 1	Error! Bookmark not defined.
3.2.1	Historique de la logique floue :	Error! Bookmark not defined.
3.2.2	Logique classique et logique floue	35
3.2.3	Théorie des ensembles flous.....	36
3.2.4	Sous-ensemble flou.....	36
3.2.5	Les variables et les valeurs linguistiques	38
3.2.6	Fonction d’appartenance	39
3.2.7	Opérateurs de la logique floue.....	41
3.3	La commande floue de type 1	42
3.3.1	Structure d’un régulateur flou type 1	42
3.3.2	Avantages et Inconvénients sur la Logique Floue :	47
3.3.2.2	<i>Inconvénients</i> :	47
3.4	La logique floue de type 2	47
3.4.1	Introduction	47
3.4.2	Définition de la logique floue type-2	48

3.4.3	Différents types d'ensembles flous type-2	50
3.4.4	Fonction d'appartenance	51
3.4.5	Opérations sur les ensembles flous type-2	53
3.5	La commande floue de type 2	53
3.5.1	Structure d'un régulateur flou type 2	53
3.6	Conclusion.....	56
Chapitre 04 : Simulation et évaluation des résultats		
4.1	Introduction	58
4.2	Simulation du système photovoltaïque	58
4.2.1	Simulation de la méthode P and O.....	60
4.2.2	Simulation de la méthode floue type 1	64
4.2.3	Simulation de la méthode floue type 2	68
4.3	Conclusion.....	73
	<u>Conclusion générale</u>.....	76

Liste des figures

Chapitre 01

Figure 1.1: Énergie renouvelable strategies	7
Figure 1.2: Les types d'énergie renouvelable	7
Figure 1.3: Structure d'une cellule photovoltaïque	8
Figure 1.4: Innovation énergétique durable	9
Figure 1.5: Type des cellules photovoltaïques	12
Figure 1.6: Schéma équivalent d'une cellule idéale	13
Figure 1.7: Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque réelle	14
Figure 1.8: Influence de l'irradiation (gauche) et de la température (droite) sur la puissance d'un module	16
Figure 1.9: Influence de l'irradiation (gauche) et de la température (droite) sur la puissance d'un module sur la caractéristique P-V	16

Chapitre 02

Figure 2.1 Schéma fonctionnel d'un système MPPT typique	21
Figure 2.2 Courbes caractéristiques des panneaux solaires	22
Figure 2.3: Convertisseur Boost	25
Figure 2.4: Schéma de convertisseur Boost état ON	26
Figure 2.5: Schéma de convertisseur Boost état OFF	26
Figure 2.6: Caractéristique Ppv (Vpv) et fonctionnement de la méthode P&O.	28
Figure 2.7: Organigramme de l'algorithme perturbation et observation.	29

Chapitre 03

Figure 3.1: La Logique floue et La Logique classique	38
Figure 3.2 : Représentation d'un sous-ensemble flou et principales caractéristiques	39
Figure 3.3: Variable linguistique	41
Figure 3.4: Exemple d'une variable linguistique.	41
Figure 3.5: Fonction floue de type 1 : appartenance à l'entrée E : erreur	43
Figure 3.6: Fonction floue de type 1 : appartenance à l'entrée dE : variation de l'erreur	43
Figure 3.7: Fonction floue de type 1 : appartenance des sorties	43
Figure 3.8: Structure d'un régulateur flou type 1	45
Figure 3.9: Représentation schématique d'un ensemble flou type-2 gaussien.	51
Figure 3.10. Fonction floue de type 2 : appartenance à l'entrée E : erreur	54
Figure 3.11. Fonction floue de type 2 : appartenance à l'entrée dE : variation de l'erreur	54
Figure 3.12 Schéma synoptique d'un contrôleur flou type-2	56

Chapitre 04

Figure 4.1 schéma block du système photovoltaïque avec la commande MPPT	61
Figure 4.2 schéma block de la méthode P and O	62
Figure 4.3 allures de puissance sous conditions stables ($G=1000 \text{ W/m}^2$, $T=25\text{C}^\circ$) par la méthode P and O	63
Figure 4.4 allures de puissance sous conditions d'irradiation variable par la méthode P and O	64
Figure 4.5 allures des puissances sous conditions d'irradiation variable par la méthode P and O	65
Figure 4.6 schéma block de la méthode de la logique floue type 1	66
Figure 4.7 allures de puissance sous conditions stables ($G=1000 \text{ W/m}^2$, $T=25\text{C}^\circ$) par la méthode de la logique floue type 1 avec P and O	67
Figure 4.8 allures des puissances sous conditions d'irradiation variable par la méthode de la logique floue type 1 avec P and O	68
Figure 4.9 allures des puissances sous conditions de la température variable par la méthode de la logique floue type 1 avec P and O	69
Figure 4.10 schéma block de la méthode de la logique floue type 2	71

Figure 4.11 allures des puissances sous conditions stables ($G=1000 \text{ W/m}^2$, $T=25\text{C}^\circ$) par les trois méthodes	71
Figure 4.12 allures des puissances sous conditions d'irradiation variable par les trois méthodes	73
Figure 4.13 allures des puissances sous conditions de la température variable par les trois méthodes	74
Figure 4.14 Comparaison de l'efficacité des méthodes du MPPT	76

Liste des Tableaux

Chapitre 02

Tableau 2.1 Différents convertisseurs DC–DC utilisées dans les applications solaires.....	24
---	----

Chapitre 03

Tableau 3.1 Fonctions d'appartenance de la logique floue type-1.....	42
--	----

Tableau 3.2 : Exemple de variable linguistique	46
--	----

Tableau 3.3: Tableau des règles.....	47
--------------------------------------	----

Tableau 3.4 : Fonctions d'appartenance de la logique floue type-2.	53
---	----

Tableau 3.5: Fonction floue de type 2 : appartenance des sorties	55
--	----

Tableau 3.6: Tableau des règles.....	57
--------------------------------------	----

Chapitre 04

Tableau 4.1 Caractéristiques électriques du module photovoltaïque BP SX 150.....	61
--	----

Tableau 4.2 Paramètres du hacheur boost.	61
---	----

Tableau 4.3 Paramètres des MPPT méthodes.....	62
---	----

Notations et Symboles

Liste des Notations

MPPT: maximum power point tracking

MPP: maximum power point

PV: photovoltaïques

DC-DC : Convertisseur continu-continu

CS : convertisseur statique

GPV : générateur photovoltaïque

P&O : Perturb and Observe

UV : les rayonnements ultraviolets

IR : infrarouges

cc. /cc : Convertisseur de courant continu en courant continu

IGBTs : transistors bipolaires à gâchette isolée

MOSFETs : transistors à effet champ d'oxyde de métal

PWM : taux de fréquence de commutation

PN : jonction

THD : la distorsion harmonique totale THD

FOU : Footprint Of Uncertainty

List des Symboles

G : Éclairement absorbé par la cellule

G_{ref} : Éclairement de référence (1000 w/m²)

I_0 : Courant de saturation inverse de la diode

V_t : Tension thermique

n : Facteur d'idéalité de la photopile

k : Constant de Boltzmann (1, 38.10-23J/K)

q : Charge de l'électron (1, 6.10-19 C)

V_{cell} : La tension aux bornes de la cellule

I_{cell} : Le courant fournie par la cellule

I_{sc} : Le courant de court-circuit

V_{oc} : La tension de circuit-ouvert

q : La charge de l'électron [$1.602 \cdot 10^{-19}$ C]

n : Le facteur d'idéalité de la jonction

E_g : L'énergie du band gap

α : Coefficient de température de I_{ph}

k : La constante de Boltzmann [$1.381 \cdot 10^{-23}$ J/K]

Introduction Générale :

Introduction Générale :

Compte tenu de l'inquiétude croissante suscitée par la consommation d'énergie dans la société contemporaine, la forte augmentation de la demande énergétique est directement liée à l'industrialisation et à la croissance démographique [1]. Malgré cette demande croissante, la disponibilité d'énergie reste insuffisante et la disponibilité des combustibles fossiles diminue de manière significative [2]. En outre, la diminution de l'offre de combustibles fossiles, la hausse des coûts du pétrole et les dilemmes environnementaux associés aux sources d'énergie conventionnelles, tels que le réchauffement climatique [3], imposent une transition vers des sources d'énergie alternatives en réponse aux effets négatifs des émissions de carbone résultant de la combustion de combustibles fossiles et de la dégradation de l'environnement [4].

Récemment, l'énergie dérivée de sources caractérisées par leur propreté, leur efficacité et leur impact environnemental minimal est devenue une source d'énergie primaire, posant des défis majeurs aux scientifiques et les ingénieurs doivent relever [5-6]. Parmi l'éventail des sources d'énergie renouvelables, l'énergie solaire a suscité une grande attention en raison de son potentiel prometteur de production d'énergie. Il est à noter toutefois que les systèmes photovoltaïques présentent une non-linéarité importante attribuée aux variations de température, influençant ainsi l'efficacité des installations photovoltaïques. Un système photovoltaïque typique comprend généralement un générateur photovoltaïque (PV) composé d'une série de modules solaires et d'un convertisseur DC-DC chargé d'adapter la puissance générée à la charge. Ces paramètres compliquent la prévision de la tension et du courant nécessaires pour garantir une production d'énergie optimale [7-8].

Le générateur photovoltaïque, qui est constitué de cellules photovoltaïques interconnectées, fonctionne sous une gamme variée de tensions et de courants, atteignant sa puissance électrique maximale uniquement à un point de fonctionnement spécifique qui correspond à la caractéristique courant-tension (I-V). Ce point est désigné comme point de puissance maximale (MPP). Pour optimiser la gestion de l'énergie disponible en sortie du générateur photovoltaïque, des stratégies de contrôle et d'optimisation permettent d'amélioration de l'efficacité énergétique globale de l'installation photovoltaïque en garantissant le transfert de la puissance électrique maximale du générateur photovoltaïque à la charge, indépendamment des fluctuations d'éclairage et de température [2].

Introduction Générale :

Le principe du suivi des points de puissance maximale (MPPT) repose sur le réglage automatique du rapport cyclique du convertisseur statique (CS) dans le but de maximiser en permanence la puissance de sortie du générateur photovoltaïque (GPV). Les méthodes classiques employées pour localiser ce point incluent l'algorithme d'incrément d'inductance et la technique de perturbation et d'observation (P&O). Si ce dernier a démontré des résultats louables, il n'est pas dépourvu de défauts, notamment son inefficacité dans des conditions d'irradiance solaire diminuée [9].

Les contrôleurs à logique floue (fuzzy logic) sont nettement plus simples à mettre en œuvre que les autres systèmes de contrôle non linéaires. En conséquence, diverses méthodologies utilisant ce paradigme ont été proposées pour atténuer efficacement les fluctuations de tension de sortie et pour superviser les signaux de référence générés par l'algorithme MPPT (Maximum Power Point Tracking). Néanmoins, elles n'assurent pas toujours une précision optimale dans toutes les conditions de fonctionnement. De plus, le cadre établi pour les règles de logique floue n'est pas intrinsèquement corrélé aux spécifications de l'algorithme MPPT, ce qui complique l'assurance du comportement opérationnel souhaité du système photovoltaïque (PV) complet. Pour relever ces défis, l'exploration de méthodologies de contrôle non linéaires, y compris la logique floue, constitue une voie viable. Dans ce cadre, l'objectif principal de nos recherches est d'aborder la question du transfert d'énergie au sein de la chaîne de conversion photovoltaïque.

Pour atteindre cet objectif, cette thèse est structurée pour être organisée en quatre chapitres distincts :

Premier chapitre : un aperçu des principes de l'énergie solaire et de la dynamique des systèmes photovoltaïques est présenté.

Deuxième chapitre : cette section se concentre sur la modélisation des convertisseurs DC/DC et la mise en œuvre du principe de contrôle MPPT dans notre système photovoltaïque. Nous présenterons les résultats liés à l'optimisation de la puissance de sortie du générateur photovoltaïque à l'aide de la méthode Perturbation et observation (P&O).

Troisième chapitre : cette section met l'accent sur la modélisation des convertisseurs DC/DC et sur l'application du principe de commande MPPT dans notre système photovoltaïque.

Introduction Générale :

Nous présenterons les résultats obtenus par le générateur photovoltaïque grâce à la méthodologie de la logique floue (fuzzy logique type 1 et type 2).

Dans le quatrième chapitre final, une étude approfondie est entreprise pour présenter et analyser les différents résultats issus des simulations effectuées.

CHAPITRE 01

Généralité sur le système photovoltaïque

Chapitre 01 : Généralité sur le système photovoltaïque

1.1 Introduction :

Dans ce chapitre, nous présentons les généralités relatives aux systèmes photovoltaïques, en mettant en lumière les principes fondamentaux de leur fonctionnement, leur structure typique ainsi que les principaux composants qui les constituent. Le recours à l'énergie solaire photovoltaïque constitue aujourd'hui une solution incontournable dans la transition énergétique mondiale, en raison de sa disponibilité, de son caractère renouvelable et de son faible impact environnemental.

Le système photovoltaïque repose sur la conversion directe de l'énergie solaire en énergie électrique à l'aide de dispositifs semi-conducteurs appelés cellules photovoltaïques. Ce processus, basé sur l'effet photovoltaïque, permet de générer une tension électrique lorsqu'une cellule est exposée à la lumière. L'association en série et en parallèle de ces cellules forme un module photovoltaïque, élément de base des installations solaires. Toutefois, la performance d'un système photovoltaïque dépend non seulement du comportement des cellules, mais également de l'ensemble du système, incluant des composants tels que les convertisseurs DC-DC, les onduleurs, les dispositifs de protection, les unités de stockage et les algorithmes de gestion énergétique.

Ce chapitre s'attache également à exposer les facteurs influençant le rendement d'un générateur photovoltaïque, notamment l'irradiance solaire, la température ambiante, et les caractéristiques électriques de la charge. Une attention particulière est accordée à la modélisation électrique du panneau solaire ainsi qu'aux paramètres clés permettant de caractériser son comportement, tels que le courant de court-circuit, la tension à vide ou encore le point de puissance maximale (MPP).

L'objectif de ce chapitre est de fournir une base théorique solide sur le fonctionnement global des systèmes photovoltaïques, en vue de faciliter la compréhension des techniques de conversion d'énergie et des stratégies de commande abordées dans les chapitres suivants.

1.2 HISTORIQUE DES ENERGIES RENOUVELABLE

Bien que le terme énergie renouvelable soit apparu en 1970, les différentes formes d'énergie exploitées depuis les premiers stades de la Terre et utilisées par l'humanité remontent à plusieurs siècles, voire millénaires. La crise pétrolière qui s'est produite au début des années 1970 a mis en lumière, tant pour le public que pour les décideurs politiques, la précarité de la dépendance à l'égard du pétrole, qui pourrait rendre les pays vulnérables à des pratiques

Chapitre 01 : Généralité sur le système photovoltaïque

d'extorsion. En manipulant les cours du pétrole sur les bourses de matières premières, les pays producteurs de pétrole ont exercé une influence significative sur les valorisations des devises et les perspectives d'exportation ;

Ce qui a eu un effet direct sur le paysage économique international. Bien que diverses stratégies, notamment une dépendance accrue à l'égard du gaz naturel, aient atténué cette influence dans une certaine mesure, ce que l'on a appelé le choc pétrolier a eu un effet durable sur l'Allemagne. Le gouvernement fédéral s'est efforcé de réduire sa dépendance au pétrole en faisant progresser l'énergie nucléaire et en augmentant l'utilisation du charbon. Parallèlement, des ressources financières ont été allouées à l'exploration de technologies alternatives de production d'énergie. L'université de Stuttgart a relancé ses efforts dans le développement et l'évaluation de systèmes d'énergie éolienne, aboutissant au projet Growian, qui impliquait la construction d'une grande éolienne ; des évaluations contemporaines la classeraient comme une installation standard. Néanmoins, le projet s'est finalement révélé infructueux, nécessitant de nombreuses avancées supplémentaires. De telles initiatives d'amélioration étaient rarement menées au sein des institutions universitaires et des centres de recherche allemands ; elles ont plutôt été principalement réalisées dans de nombreux ateliers et garages domestiques où des personnes enthousiastes ont construit des systèmes de production d'énergie à partir de l'énergie éolienne, hydroélectrique et solaire, soit pour leur usage personnel, soit pour quelques clients sélectionnés, afin de satisfaire leurs propres besoins en matière de consommation d'électricité.

Cette tendance s'est maintenue tout au long des années 1980, et ce n'est qu'au début des années 1990 que les premières installations de fabrication sont apparues, commençant la production en série de tels systèmes. C'est ainsi que l'une des principales entreprises de production d'énergie éolienne, Enercon, a été créée dans les limites d'un garage. C'est grâce au

Chapitre 01 : Généralité sur le système photovoltaïque

soutien financier apporté par la coalition rouge-verte au pouvoir à l'époque que l'entreprise a pu financer le développement de sa première série de constructions d'éoliennes.



Figure 1.1: Énergie renouvelable strategies

1.3 Définition Energies renouvelable :

Les sources d'énergie renouvelable proviennent de ressources apparemment infinies, telles que le rayonnement solaire ou le vent, qui sont accessibles en permanence ou peuvent être rapidement renouvelées. Ils contrastent nettement avec les combustibles fossiles, dont les réserves sont limitées et non renouvelables sur une échelle de temps humaine, notamment le charbon, le pétrole et le gaz naturel. L'énergie renouvelable englobe une variété de méthodologies pour exploiter l'énergie provenant de ces sources théoriquement inépuisables.

1.4 Les types d'énergie renouvelable :

- L'énergie solaire
- L'énergie éolienne
- L'énergie hydraulique (ou hydroélectrique)
- La biomasse
- La géothermie



Figure 1.2: Les types d'énergie renouvelable

Chapitre 01 : Généralité sur le système photovoltaïque

1.5 Définition de l'énergie solaire :

L'énergie solaire désigne l'énergie émise par le rayonnement du Soleil. Elle constitue une ressource propre, renouvelable et inépuisable, pouvant être exploitée pour diverses finalités telles que le chauffage, l'éclairage, la production d'électricité ou encore pour des procédés industriels. Cette énergie provient de réactions thermonucléaires au sein du Soleil, où l'hydrogène est transformé en hélium, libérant ainsi d'importantes quantités de rayonnement électromagnétique, incluant la lumière visible, les rayons ultraviolets (UV) et infrarouges (IR).

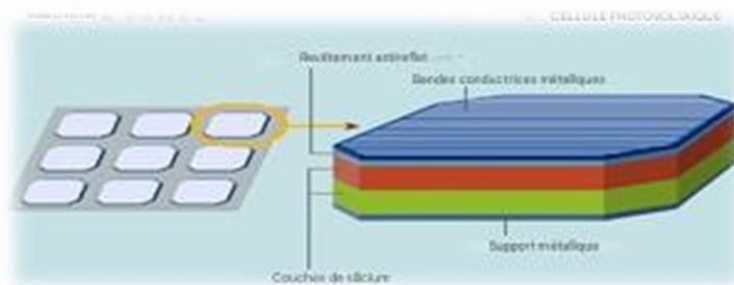


Figure 1.3: Structure d'une cellule photovoltaïque

1.6 Caractéristiques Principales de l'énergie solaire :

1.6.1 Renouvelable et inépuisable :

L'énergie solaire est naturellement régénérée et disponible en abondance, ce qui en fait une source d'énergie durable à long terme.

1.6.2 Propre et respectueuse de l'environnement :

Contrairement aux énergies fossiles, l'énergie solaire ne génère ni gaz à effet de serre ni autres polluants, ce qui contribue à la protection de l'environnement.

1.6.3 Applications variées :

Elle peut être utilisée directement (chauffage, éclairage) ou indirectement pour la production d'électricité, à travers des cellules photovoltaïques ou des systèmes à concentration solaire.

1.6.4 Disponibilité mondiale :

Présente partout sur la planète, l'énergie solaire est cependant soumise à des variations d'intensité en fonction de la situation géographique et du moment de la journée.

1.7 Le fonctionnement des panneaux solaires :

La Terre ne reçoit qu'environ un demi-milliardième de l'énergie totale émise par le Soleil, ce qui suffit pourtant à maintenir la vie depuis des milliards d'années. En Europe centrale, on observe en moyenne annuelle un tiers de rayonnement direct (sans nuages) et deux tiers de rayonnement diffus (avec couverture nuageuse). En République tchèque, la Moravie du Sud est la région la plus ensoleillée, avec environ 1 100 kWh/m²/an. En France, la région la plus ensoleillée est celle de la Provence, où l'ensoleillement annuel peut atteindre jusqu'à 2 000 kWh/m². À l'échelle européenne, les zones les plus exposées sont le sud du Portugal et le sud-ouest de l'Espagne.



Figure 1.4: Innovation énergétique durable

Avant de choisir l'énergie solaire et d'installer des panneaux, il est nécessaire d'évaluer plusieurs facteurs, au-delà de l'intensité du rayonnement. Bien que cette dernière détermine directement la puissance électrique produite, d'autres éléments influencent le rendement des installations. Il convient par exemple d'éviter l'ombrage partiel de certaines cellules, car dans une connexion en série (la plus fréquente), la production globale est limitée par la cellule la moins performante. De plus, l'inclinaison du toit doit être comprise idéalement entre 10 % et 30 %, avec une orientation vers le sud, ou éventuellement sud-ouest ou sud-est.

Henze et Hillebrand considèrent que le Soleil est à l'origine de la majorité des phénomènes énergétiques terrestres. Ils distinguent l'énergie solaire directe de l'énergie solaire indirecte. Cette dernière inclut des formes secondaires telles que l'énergie hydraulique, l'énergie éolienne et la biomasse. En revanche, l'exploitation directe consiste à convertir immédiatement le rayonnement solaire en énergie utile : thermique ou électrique. On distingue ainsi deux grandes catégories de panneaux solaires :

Les panneaux photovoltaïques, qui convertissent la lumière en électricité,

Chapitre 01 : Généralité sur le système photovoltaïque

Les panneaux thermiques, qui transforment l'énergie solaire en chaleur (chauffage, eau chaude).

Il existe également un troisième type, appelé énergie solaire mécanique, encore peu répandue, mais dont le potentiel futur est considérable [10].

1.8 Le système PV :

1.8.1 Historique :

L'effet photovoltaïque, c'est-à-dire la conversion directe de la lumière en électricité, a été découvert en 1839 par le physicien français Edmond Becquerel. Cependant, il faudra attendre près d'un siècle pour que ce phénomène suscite un intérêt scientifique significatif.

L'usage des cellules solaires a débuté dans les années 1940 dans le domaine spatial. Les recherches menées après la Seconde Guerre mondiale ont permis d'améliorer leurs performances et de réduire leur taille. Toutefois, ce n'est qu'à partir de la crise énergétique des années 1970 que les gouvernements et l'industrie ont commencé à investir sérieusement dans la technologie photovoltaïque pour des applications terrestres.

Quelques jalons importants dans l'histoire du photovoltaïque [11] :

- 1839 : Edmond Becquerel découvre l'effet photovoltaïque.
- 1875 : Werner von Siemens présente à l'Académie des sciences de Berlin un exposé sur le phénomène dans les semi-conducteurs. Il reste néanmoins une curiosité scientifique jusqu'à la Seconde Guerre mondiale.
- 1954 : Trois chercheurs américains (Chapin, Pearson et Prince) mettent au point une cellule photovoltaïque à haut rendement, répondant aux besoins croissants du secteur spatial.
- 1958 : une cellule solaire atteignant un rendement de 9 % est mise au point. Des satellites commencent alors à être alimentés par l'énergie solaire.
- 1973 : première maison alimentée par des cellules photovoltaïques, construite à l'université du Delaware.
- 1983 : Une voiture alimentée uniquement par énergie photovoltaïque parcourt 4000 km en Australie.

Chapitre 01 : Généralité sur le système photovoltaïque

L'image ci-dessous illustre les trois chercheurs américains ayant participé à la conception du premier satellite alimenté par des panneaux solaires.

1.8.2 L'effet photovoltaïque :

L'effet photovoltaïque correspond au processus de conversion de l'énergie lumineuse (photons) en énergie électrique, via un matériau semi-conducteur formant une cellule solaire. Ce processus comprend trois étapes :

- L'absorption des photons provenant du rayonnement solaire.
- La conversion de l'énergie photonique en énergie électrique.
- La collecte des charges générées dans un circuit électrique externe.

1.8.3 La cellule PV :

Les cellules photovoltaïques, ou modules solaires, sont des dispositifs qui transforment directement la lumière du soleil en électricité à travers l'effet photovoltaïque [12]. Elles sont fabriquées à partir de matériaux semi-conducteurs, présentant des propriétés intermédiaires entre les conducteurs et les isolants.

Les cellules peuvent mesurer de quelques cm^2 à plus de 100 cm^2 et prendre une forme circulaire, carrée ou hybride. Connectées en série, les électrons générés par une cellule alimentent la suivante. L'objectif est d'obtenir une différence de potentiel allant généralement de 6 à 24 V [13].

Les résistances R_s (résistance série) et R_{sh} (résistance shunt) permettent de modéliser les pertes liées aux défauts de fabrication. R_s correspond aux pertes de contact et de connexion, tandis que R_{sh} modélise les courants de fuite dus aux effets de bord et à la diode [14].

La cellule fonctionne grâce à une jonction PN, formée d'une couche de silicium dopée P (au bore) est superposée à une couche dopée N (au phosphore). Sous l'effet des photons, les électrons sont excités, générant des paires électron-trou qui créent une tension entre les bornes positives et négatives. La tension générée varie entre 0,3 V et 0,7 V, selon les matériaux, la température et l'état de vieillissement [15].

Chapitre 01 : Généralité sur le système photovoltaïque

1.9 Type des cellules photovoltaïques :

Il existe plusieurs types de cellules solaires, chacune présentant des rendements et des coûts spécifiques. Toutefois, leur rendement reste globalement modeste, variant de 8 % à 23 % selon la technologie [16] :

1.9.1 Les cellules monocristallines :

Ce sont celles qui ont le meilleur rendement, mais aussi celles qui ont le coût le plus élevé, du fait d'une fabrication compliquée.

1.9.2 Les cellules polycristallines :

Moins coûteuses à produire grâce à une méthode de fabrication simplifiée, mais avec un rendement inférieur aux cellules monocristallines.

1.9.3 Les cellules amorphes :

Affichent un rendement faible, mais nécessitent moins de matériau (silicium) et sont donc plus économiques. Elles sont couramment utilisées dans des objets à faible consommation (montres, calculatrices, etc.).



Figure 1.5: Type des cellules photovoltaïques [40]

1.10 Modélisation d'un système photovoltaïque :

1.10.1 Cas d'une cellule idéale :

Dans un modèle idéal, une cellule photovoltaïque à jonction PN, soumise à un éclairage, peut être représentée par un générateur de courant en parallèle avec une diode (figure 1. 6) .

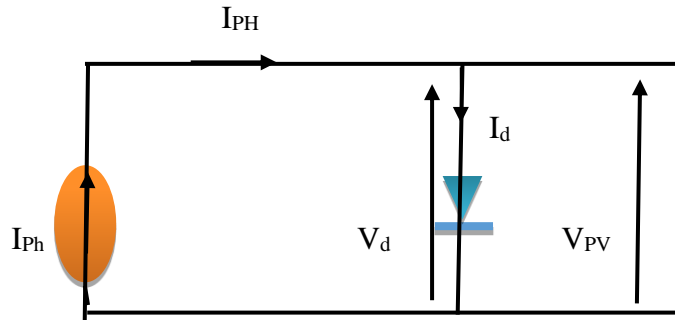


Figure 1.6: Schéma équivalent d'une cellule idéale [40]

Les équations retenues de ce modèle sont :

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

Le courant I_{ph} est assimilé au courant I_{sc} avec $V_{pv} = 0$, courant de court-circuit obtenu en court-circuitant la charge.

$$I_{ph} = I_{sc} = \frac{G}{G_{ref}} \quad (2)$$

$$I_d = I_0 \left(e^{\frac{V_d}{V_t}} - 1 \right) \quad (3)$$

$$V_t = \frac{nkT}{q} \quad (4)$$

Chapitre 01 : Généralité sur le système photovoltaïque

1.10.2 Cas d'une cellule réelle :

Le schéma équivalent de la cellule photovoltaïque réelle, qui tient compte des effets résistifs parasites dus à la fabrication, est représenté sur la figure 1.7. Ce schéma équivalent est constitué d'une diode (d) caractérisant la jonction, et une source de courant (I_{ph}) caractérisant le photocourant, et une résistance série (R_s) représentant les pertes par effet Joule, et une résistance shunt (R_{sh}) caractérisant un courant de fuite entre la grille supérieure et le contact arrière qui est généralement très supérieure à (R_s)

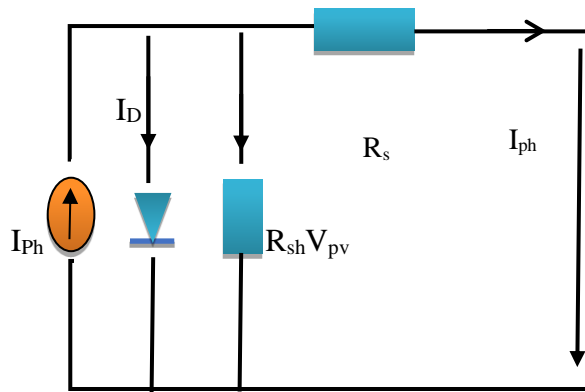


Figure 1.7: Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque réelle [40]

Le modèle mathématique d'une cellule photovoltaïque est donné par :

$$I_{cell} = I_{ph} - I_D - I_p = I_{ph} - I_{sat} \left[e^{\frac{q(V_{cell} + R_s I_{cell})}{nkT}} - 1 \right] - \frac{V_{cell} + R_s I_{cell}}{R_p} \quad (5)$$

Le courant photonique I_{ph} dépendant de l'ensoleillement G [W/m²] solaire et de la température T [°K]. I_{ph} est donné par l'expression :

$$I_{ph} = \frac{G}{1000[I_{sc} + \alpha(T - T_r)]} \quad (6)$$

Le courant de saturation I_{sat} est donné par :

$$I_{sat} = I_{rr} \left(\frac{T}{T_r} \right)^{\frac{3}{n}} e^{\frac{qE_g}{nk} \left[\frac{1}{T_r} - \frac{1}{T} \right]} \quad (7)$$

Le courant de saturation I_{rr} de la diode pour la température T_r est calculé par l'équation suivante :

$$I_{rr} = \frac{I_{sc} - \left(\frac{V_{oc}}{R_{sh}} \right)}{e^{\left(\frac{qV_{oc}}{nkT_r} \right)} - 1} \quad (8)$$

Chapitre 01 : Généralité sur le système photovoltaïque

1.10.3 Cas d'un module photovoltaïque :

Le modèle développé pour une cellule peut être étendu au cas du raccordement des cellules en séries et en parallèle afin d'obtenir le modèle d'un module photovoltaïque (en faisant l'hypothèse que toutes ces cellules sont identiques à l'intérieur du module).

$$I_M = I_{ph-M} - I_{D-M} - I_{p-M} \quad (9)$$

Avec :

$$\begin{cases} I_{ph-M} = I_{ph-cell} \cdot N_p \\ I_{D-M} = I_{D-cell} \cdot N_p = \left[I_{sat} \cdot \left(e^{\frac{q(V_{cell} + R_s I_{cell})}{nkT}} - 1 \right) \right] \cdot N_p \\ I_{p-M} = I_{p-cell} \cdot N_p = \left[\frac{V_{cell} + R_s I_{cell}}{R_p} \right] \cdot N_p \end{cases} \quad (10)$$

Alors le module photovoltaïque s'écrit comme :

$$I_M = I_{ph-cell} \cdot N_p - \left[I_{sat} \cdot \left(e^{\frac{q(V_{cell} + R_s I_{cell})}{nkT}} - 1 \right) \right] \cdot N_p - \left[\frac{V_{cell} + R_s I_{cell}}{R_p} \right] \cdot N_p \quad (11)$$

1.11 Influence de l'Irradiation :

L'irradiation solaire correspond à la puissance du rayonnement solaire reçu par unité de surface (exprimée en W/m²). Lorsque l'irradiation augmente, le courant de sortie du panneau photovoltaïque augmente presque linéairement, tandis que la tension reste relativement stable. Ainsi, la puissance de sortie augmente globalement avec l'irradiation.

1.12 Influence de la Température :

La température affecte principalement la tension du module. Une élévation de température provoque une baisse significative de la tension de sortie, avec un impact plus fort que la légère augmentation du courant. Par conséquent, la puissance diminue avec l'augmentation de la température.

Chapitre 01 : Généralité sur le système photovoltaïque

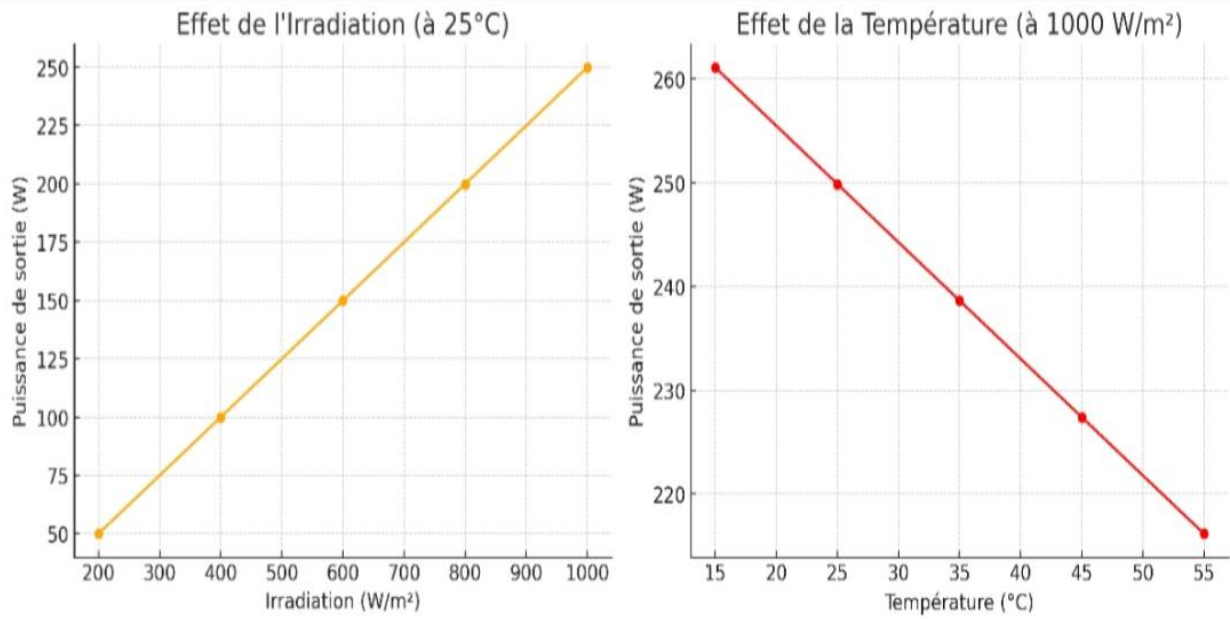


Figure 1.8: Influence de l'irradiation (gauche) et de la température (droite) sur la puissance d'un module

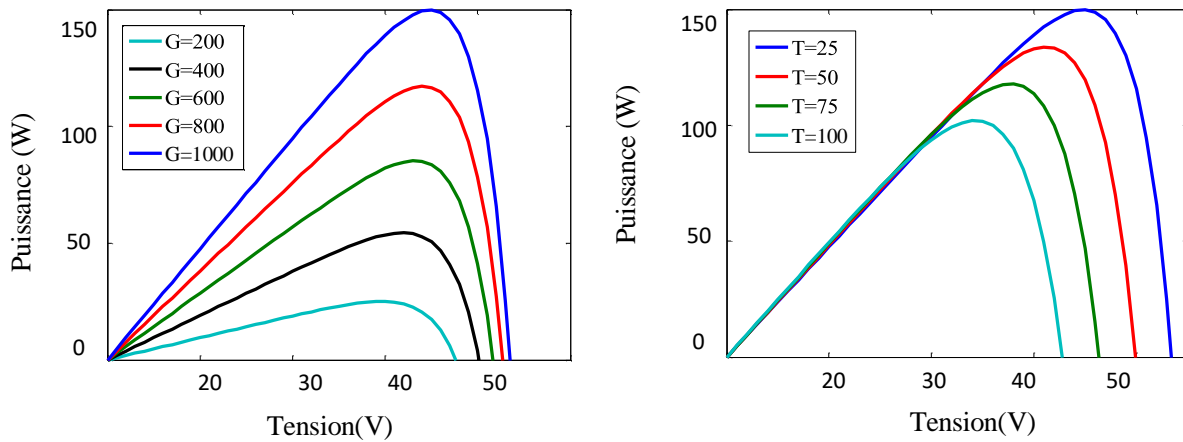


Figure 1.9: Influence de l'irradiation (gauche) et de la température (droite) sur la puissance d'un module sur la caractéristique P-V [41]

Chapitre 01 : Généralité sur le système photovoltaïque

1.13 Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque :

1.13.1 Les avantages :

- L'énergie photovoltaïque est renouvelable, gratuite, non polluante et indépendante.
- Les systèmes de cette filière ne génèrent pas de déchets, sans pollution et sans bruit
- Pas de gaz à effet de serre.
- Peut se combiner avec d'autres sources d'énergie avec une longue durée de vie.
- Une nouvelle technologie décentralisée qui demande moins d'entretien, production d'énergie à la demande en allant des milliwatts au mégawatt.
- Les frais et les risques de transport des énergies fossiles sont éliminés.

1.13.2 Les inconvénients :

Malgré les avantages qu'elle présente, l'énergie photovoltaïque présente certains inconvénients qui peuvent être résumés comme suit :

- L'efficacité de conversion des modules est assez faible en pratique.
- Le recyclage des modules présente un souci pour l'environnement.
- L'intermittence et la sensibilité contre les conditions météorologiques

1.14 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons fourni des informations complètes sur l'énergie photovoltaïque, soulignant son importance croissante dans le domaine des sources d'énergie renouvelables. Les principes de fonctionnement des cellules photovoltaïques ont été élucidés, parallèlement à un examen des caractéristiques électriques inhérentes aux panneaux solaires. Un accent particulier a été mis sur les effets de paramètres environnementaux tels que l'irradiance solaire et la température ambiante sur l'efficacité du système. Ces concepts fondamentaux constituent le cadre essentiel pour comprendre les méthodologies de suivi du point de puissance maximale (MPPT), qui seront expliquées dans le chapitre suivant.

CHAPITRE 02

Commande d'un système
photovoltaïque par la méthode
de perturbation et
d'observation

Chapitre 02 : Commande d'un système photovoltaïque par la méthode de perturbation et d'observation

2.1 Introduction :

Dans ce chapitre, nous avons étudié l'approche conventionnelle du suivi du point de puissance maximale (MPPT) à travers l'étude conjointe du convertisseur Boost et de la méthode de Perturbation et d'Observation (P&O). Contrairement aux stratégies de contrôle avancées basées sur l'intelligence artificielle ou la logique floue, la méthode P&O repose sur un algorithme simple et intuitif qui consiste à perturber périodiquement le point de fonctionnement du système et à observer la variation de la puissance en sortie. Bien que cette technique soit largement utilisée en raison de sa facilité d'implémentation et de son faible coût de calcul, elle présente certaines limitations, notamment en présence de conditions environnementales dynamiques telles que les variations rapides de l'ensoleillement ou de la température.

Le convertisseur Boost joue un rôle essentiel dans cette démarche en assurant une conversion efficace de la tension issue du générateur photovoltaïque, tout en permettant le réglage du point de fonctionnement autour du MPP. Son principe de fonctionnement, basé sur le découpage haute fréquence, permet d'élever la tension d'entrée tout en conservant une commande fine de la puissance transférée vers la charge ou vers l'onduleur.

L'analyse conjointe du comportement du convertisseur Boost et de l'algorithme P&O nous a permis de mieux cerner les interactions entre la dynamique du convertisseur et la stratégie de suivi MPPT. Les résultats de simulation montrent que, malgré une certaine instabilité aux abords du MPP et une susceptibilité aux variations rapides, l'approche P&O reste efficace dans des conditions stables. Toutefois, les performances globales peuvent être significativement améliorées par une optimisation de la fréquence de perturbation ou l'intégration de mécanismes adaptatifs.

Ainsi, ce chapitre met en lumière les fondements théoriques et pratiques du convertisseur Boost et de la méthode P&O, tout en évaluant leur pertinence dans le contexte du MPPT. Il sert également de base comparative pour l'étude d'approches plus avancées dans les chapitres suivants.

Chapitre 02 : Commande d'un système photovoltaïque par la méthode de perturbation et d'observation

2.2 MPPT Problématique :

Les systèmes photovoltaïques (PV) sont progressivement intégrés dans les technologies de l'énergie électrique. Les principales limites associées aux systèmes photovoltaïques sont leurs coûts de production élevés et leur efficacité de conversion d'énergie sous-optimale, qui peut être attribuée, en partie, à leurs caractéristiques tension-courant (V-I) et courant de puissance (P-I) non linéaires et sensibles à la température. Pour atténuer ces difficultés, trois stratégies fondamentales peuvent être utilisées :

- Amélioration des méthodologies de fabrication des panneaux solaires : De nombreuses initiatives de recherche ont été entreprises concernant les matériaux et les techniques de fabrication des panneaux photovoltaïques.
- Régulation de l'irradiation solaire incidente des panneaux photovoltaïques : la maximisation de l'énergie solaire est réalisable grâce à l'utilisation de capteurs solaires qui suivent la trajectoire du soleil ou à la reconfiguration des dispositions des cellules solaires au sein des panneaux photovoltaïques en réponse aux fluctuations des conditions environnementales.
- Mise en œuvre du suivi des points de puissance maximale (MPPT)

Les variations de l'irradiation solaire ou de la température induisent un décalage du point de puissance maximale (MPP) sur un large spectre ; les phénomènes d'ombrage instantanés et la dégradation des cellules photovoltaïques influencent davantage le point MPP. De plus, les caractéristiques électriques de la charge connectée peuvent également présenter une variabilité.

Comme indiqué précédemment, le MPPT est la méthodologie qui garantit que le panneau photovoltaïque fournit en permanence la puissance maximale disponible, quelles que soient les conditions d'irradiation et de température affectant les cellules. En substance, il est impératif de suivre en permanence le MPP afin d'optimiser l'extraction d'énergie du panneau photovoltaïque dans toutes les circonstances susceptibles d'entraîner une perte de régulation du système

Chapitre 02 : Commande d'un système photovoltaïque par la méthode de perturbation et d'observation

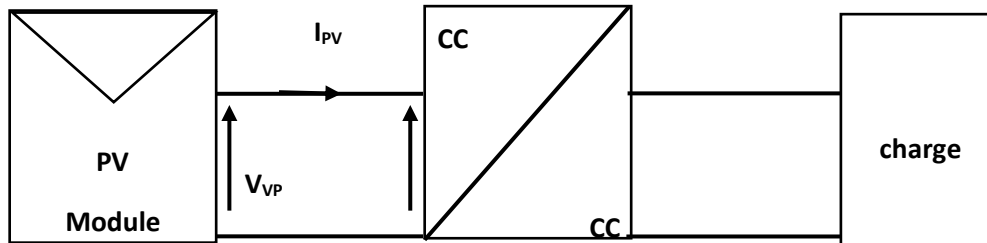


Figure 2.1 : Schéma fonctionnel d'un système MPPT typique [42]

2.3 Commande pour la recherche du Point de Puissance Maximale (MPPT) :

Des recherches approfondies ont été menées concernant les divers algorithmes conçus pour suivre le point de puissance maximale (MPP). Ces études prennent en compte divers paramètres, caractéristiques du système et/ou variations climatiques.

En conclusion, l'optimisation de la connexion entre une source et une charge peut être réalisée grâce à la modulation du rapport cyclique (D) du convertisseur statique (CS) afin de maximiser la puissance délivrée à la charge, plusieurs techniques étant appliquées. Parmi ces méthodologies figure la technique MPPT.

Dans cette mémoire, nous expliquerons les fondements théoriques de plusieurs méthodes (classiques et modernes) utilisées pour surveiller le point de fonctionnement du système photovoltaïque à la puissance maximale, notamment :

- Méthode Perturbe and Observe (P&O).
- Méthode de logique floue (floue type 1 et floue type 2).

2.4 LE PROCESSUS DE SUIVI DU POINT DE PUISSANCE MAXIMALE :

La figure 2.2 présente les caractéristiques électriques d'un champ photovoltaïque sous une irradiation solaire donnée. On observe que l'impédance interne du générateur solaire est élevée sur le côté gauche de la courbe (basses tensions) et faible sur le côté droit (hautes tensions). Le point de puissance maximale (MPP) se situe au niveau du coude de la courbe, où la puissance délivrée est optimale.

Selon la théorie du transfert de puissance maximale, la puissance transférée vers la charge est maximale lorsque l'impédance interne de la source est égale à l'impédance de la charge.

Chapitre 02 : Commande d'un système photovoltaïque par la méthode de perturbation et d'observation

Par conséquent, pour qu'un système photovoltaïque fonctionne à proximité du MPP, il est nécessaire que l'impédance vue depuis le convertisseur (ajustable via le rapport cyclique du convertisseur) corresponde à celle du générateur solaire.

Les convertisseurs DC-DC traditionnels présentent généralement un comportement d'impédance négative : leur courant augmente lorsque la tension diminue. Ce phénomène résulte du fait que ces convertisseurs cherchent à maintenir une puissance d'entrée constante, tout en régulant leur tension de sortie.

Lorsque le système fonctionne sur la partie haute impédance de la courbe caractéristique (c'est-à-dire à basse tension), cela entraîne une chute brutale de la tension en sortie du générateur solaire. Pour éviter cela, le système doit impérativement fonctionner sur le côté droit de la courbe, où la stabilité de l'alimentation est assurée, permettant un suivi efficace du MPP.

Dans le cas contraire, le convertisseur fonctionne au rapport cyclique maximal, et la tension en sortie du panneau ne varie qu'en fonction de l'irradiation. Le système devient alors incapable d'atteindre le véritable point de puissance maximale, pouvant confondre le point

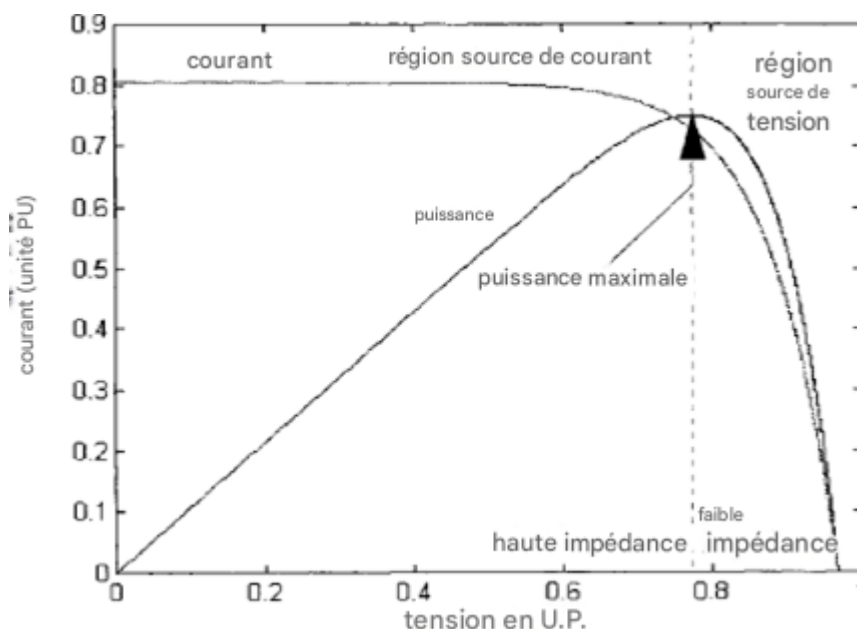


Figure 2.2 : Courbes caractéristiques des panneaux solaires. [42]

Chapitre 02 : Commande d'un système photovoltaïque par la méthode de perturbation et d'observation

2.5 Les convertisseurs DC-DC :

Dans le but de maintenir un rendement énergétique élevé au sein d'une chaîne photovoltaïque (PV), les modules solaires sont systématiquement interfacés avec la charge via des convertisseurs DC-DC à découpage. Ces derniers permettent d'adapter dynamiquement le point de fonctionnement du générateur photovoltaïque de manière à atteindre le point de puissance maximale (MPP).

Pour limiter les pertes énergétiques par dissipation thermique et éviter la surchauffe des composants électroniques, il est primordial de choisir adéquatement les éléments de stockage d'énergie, tels que les inductances et les condensateurs, ainsi que les interrupteurs de puissance. Le choix de ces composants dépend directement du niveau de puissance à convertir ou à contrôler.

- Les MOSFETs (transistors à effet de champ à oxyde métallique) sont privilégiés pour les applications de faible à moyenne puissance (de l'ordre de quelques kilowatts).
- Les IGBTs (transistors bipolaires à grille isolée) sont mieux adaptés aux puissances plus élevées.
- Les thyristors sont quant à eux traditionnellement employés dans les applications nécessitant des niveaux de puissance très élevés.

Parmi les convertisseurs DC-DC les plus couramment utilisés dans les systèmes photovoltaïques, on distingue trois topologies principales :

- Le convertisseur Buck (abaisseur de tension), utilisé lorsque la tension de sortie souhaitée est inférieure à la tension d'entrée ;
- Le convertisseur Boost (élevateur de tension), permettant d'augmenter la tension de sortie au-dessus de la tension d'entrée ;
- Le convertisseur Buck-Boost, qui permet d'obtenir une tension de sortie supérieure ou inférieure à celle d'entrée, mais avec une polarité inversée [17].

Chapitre 02 : Commande d'un système photovoltaïque par la méthode de perturbation et d'observation

Ces convertisseurs sont constitués exclusivement d'éléments réactifs (inductances et condensateurs), lesquels, dans un modèle idéal, ne consomment aucune énergie, ce qui leur confère un rendement élevé.

Le tableau 2.1 présente un résumé comparatif de ces différentes topologies de convertisseurs DC–DC.

Tableau 2.1 Différents convertisseurs DC–DC utilisées dans les applications solaires.[43]

Type	Fonction	Rapport de transformation $M(\alpha)$
Série (Buck)	Abaisseur	A
Parallèle (Boost)	Elévateur	$\frac{1}{1 - \alpha}$
Série-parallèle (Buck-boost)	Abaisseur Elévateur	$\frac{\alpha}{1 - \alpha}$

Dans le cadre de notre étude, nous nous focaliserons uniquement sur le convertisseur de type Boost, dont une analyse détaillée sera proposée dans la section suivante.

2.6 Avantages et inconvénients des convertisseurs :

2.6.1 Avantages :

- Bon rendement.
- Taille et masse réduites.
- Fonctionnement silencieux.

2.6.2 Inconvénients :

- Harmonique, c'est le seul inconvénient sérieux du pouvoir les systèmes électroniques considérable des deux côtés, du côté de la charge connectée et du côté de la source d'alimentation.
- Faible facteur de puissance.
- Capacité de surcharge faible.

Chapitre 02 : Commande d'un système photovoltaïque par la méthode de perturbation et d'observation

- Les forts dv/dt et di/dt générés par les commutations peuvent perturber les capteurs, et il peut être intéressant de remplacer un ensemble de capteurs exposés au bruit par un même nombre de capteurs moins perturbés [18].

2.7 La conception du convertisseur DC-DC Boost :

2.7.1 Définition :

Un convertisseur élévateur est classé comme une alimentation à découpage qui transforme une tension continue (DC) en une tension continue d'une amplitude supérieure.

2.7.2 Fonctionnement :

Le convertisseur élévateur, illustré à la figure 2.3, comprend un condensateur et une bobine d'induction servant à stocker de l'énergie, ainsi que deux commutateurs complémentaires. Dans le contexte d'un convertisseur élévateur, la tension à la sortie est supérieure à celle de l'entrée.

Les commutateurs fonctionnent en alternance, s'ouvrant et se fermant à une fréquence de commutation à modulation de largeur d'impulsion (PWM). Tant que le transistor reste à l'état allumé, la diode est non conductrice, ce qui facilite l'inversion de polarisation. La tension d'entrée est directement appliquée à l'inductance L . Lorsque le transistor passe à l'état OFF, la charge est alimentée non seulement par la source d'entrée mais également par le filtre LC. Par conséquent, la sortie produite est une tension régulée d'une amplitude supérieure à la tension d'entrée. Les caractéristiques opérationnelles du convertisseur seront examinées en fonction des états des commutateurs [19].

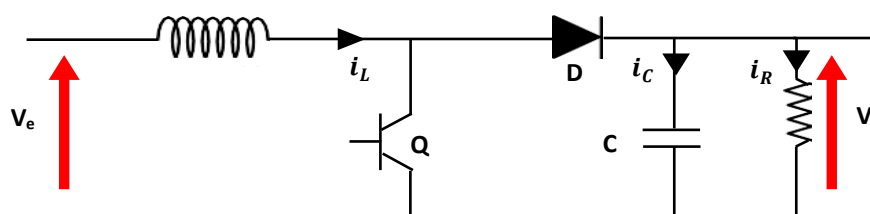


Figure 2.3: Convertisseur Boost [44]

- La première période ($0 \leq t \leq dT$) : le transistor est à l'état ON et la diode OFF.

Durant cette période, correspondant au cycle de PWM signal de conduite, le schéma équivalent du circuit est présenté ci-dessous. En cette période, l'inductance stocke l'énergie.

Chapitre 02 : Commande d'un système photovoltaïque par la méthode de perturbation et d'observation

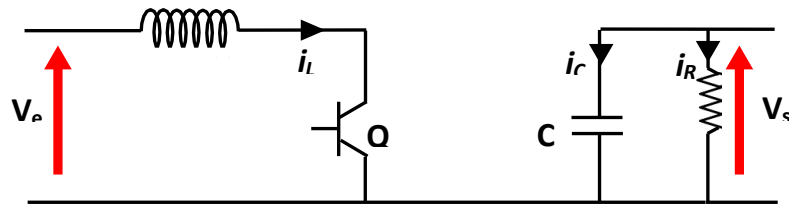


Figure 2.4: Schéma de convertisseur Boost état ON [44]

Pour cette période d'exploitation, la tension de sortie du VC et le courant dans l'inducteur satisfont les équations suivantes :

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{1}{L}(V_e) \quad (12)$$

$$\frac{dV_C}{dt} = \frac{1}{R * C}(V_C) \quad (13)$$

- La deuxième période ($dT \leq t \leq T$) : le transistor OFF et la diode ON

Dans le moment où le commutateur à transistor est à l'état OFF, la tension aux bornes

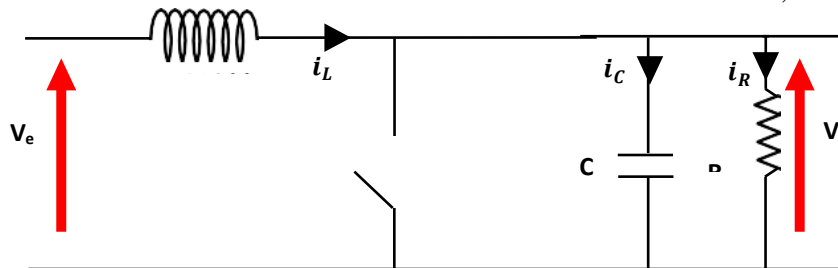


Figure 2.5: Schéma de convertisseur Boost état OFF [44]

de l'inductance va changer de polarité et la diode passera à l'état ON. Le schéma équivalent du convertisseur au cours de cette période est indiqué dans la figure ci-dessous :

Pour cette période d'exploitation, le VC tension de sortie et le courant dans l'inducteur i_L satisfont les équations suivantes :

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{2}{L}(V_e * V_C) \quad (14)$$

$$\frac{dV_C}{dt} = \frac{2}{R * C}(i_L * V_C) \quad (15)$$

2.7.3 Avantages du convertisseur BOOST :

Le convertisseur BOOST est utilisé dans les systèmes photovoltaïques équipés d'un capteur de point de puissance maximale (MPPT). Cela est dû à la fonctionnalité du convertisseur en mode courant continu, qui extrait une quantité optimale d'énergie des cellules solaires. Par conséquent, l'efficacité énergétique du convertisseur BOOST peut surpasser celle

Chapitre 02 : Commande d'un système photovoltaïque par la méthode de perturbation et d'observation

des autres configurations d'hacheur. Le convertisseur BOOST est principalement utilisé pour obtenir une tension de sortie supérieure à la tension d'entrée, tandis que le convertisseur BUCK est conçu pour réduire la tension de sortie. Un avantage notable de cette configuration est que l'inducteur « L » sert à limiter l'ondulation du courant d'entrée. [20] Tous les convertisseurs mentionnés ci-dessus ont la capacité d'agir comme des amplificateurs de tension, à l'exception du convertisseur BUCK. Le convertisseur Buck-Boost facilite la suralimentation pour les cycles de service supérieurs à la moitié. Les contraintes de tension et de courant subies par les commutateurs et les diodes sont relativement comparables selon les différentes topologies d'ascenseurs. Après analyse de la complexité inhérente à ces structures, le convertisseur BOOST apparaît comme l'option la plus simple. Lorsqu'une comparaison est effectuée, qui présente la progression du gain de tension en fonction du rapport cyclique, le convertisseur BOOST occupe la première position en ce qui concerne le gain de tension. Enfin, le tableau 2.1 résume l'analyse réalisée sur les différents convertisseurs. [21] En général, les convertisseurs BOOST sont principalement appréciés par la majorité des concepteurs responsables des dispositifs de suivi de puissance maximale. Pour les besoins de notre étude de cas, nous avons choisi le convertisseur BOOST en raison de ses caractéristiques remarquables, notamment sa capacité à fournir une tension de sortie élevée tout en garantissant une efficacité louable [20].

2.8 La méthode “Perturbe and Observe” (P&O) :

Les conditions optimales de perturbation et d'observation (P&O) sont étudiées afin d'identifier les performances d'efficacité des bords. D'opération sont étudiées afin d'identifier les performances d'efficacité de ce de cette technique de suivi du point de puissance maximale (MPPT) la plus pour les applications photovoltaïques (PV). Il est démontré que P&O peut garantir un rendement de haut niveau, à condition qu'un système de prédictive (au moyen d'une interpolation parabolique des trois derniers points de fonctionnement) et adaptative (au moyen d'une interpolation parabolique des trois derniers points de fonctionnement). Points de fonctionnement) et adaptative (basée sur la mesure de la puissance réelle). De la puissance réelle) est adoptée.

L'approche proposée vise à réaliser, en plus des meilleures performances absolues de suivi, une grande robustesse et une rapidité dans des conditions météorologiques ensoleillées ou nuageuses. Le gain de puissance par rapport à la technique P&O standard est prouvé au moyen de résultats de simulation et de mesures expérimentales effectuées sur un système de faible puissance. Outre les améliorations de performance, il est l'approche proposée permet de

Chapitre 02 : Commande d'un système photovoltaïque par la méthode de perturbation et d'observation

réduire les coûts matériels des convertisseurs analogiques-numériques (A/D) utilisés dans le circuit de contrôle MPPT.

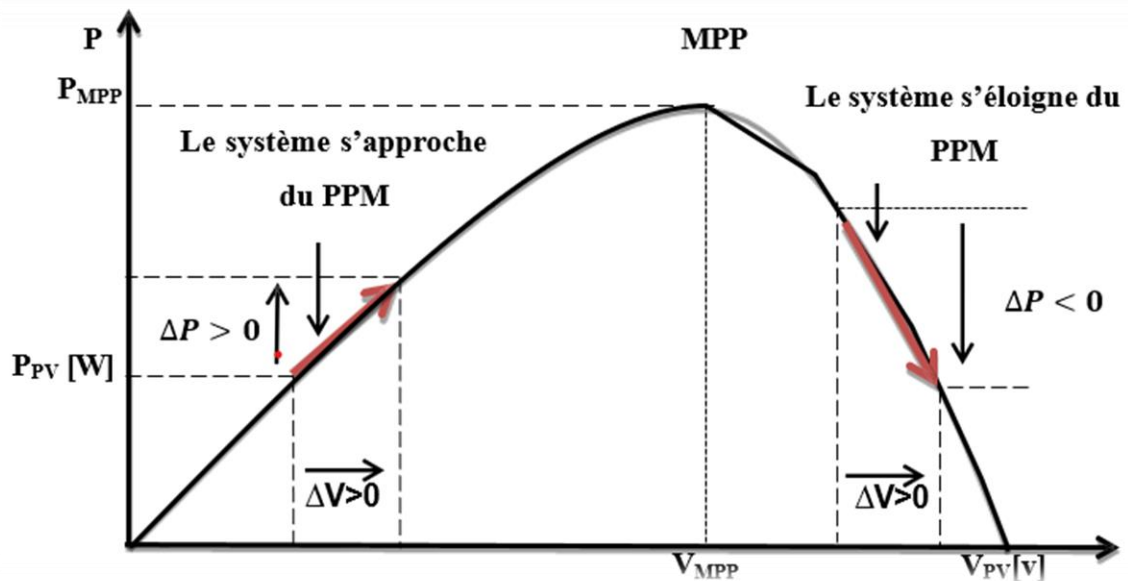


Figure 2.6: Caractéristique $P_{pv}(V_{pv})$ et fonctionnement de la méthode P&O. [45]

2.9 Principe des techniques "Perturbe and Observe" (P&O) :

L'algorithme « perturbe and Observe » constitue la méthode de poursuite du point de puissance maximale (MPPT) la plus couramment utilisée [22, 23, 24]. Comme son nom l'indique, cette approche repose sur la perturbation du système, réalisée soit par une modification de la tension de référence V_{ref} , soit par une intervention directe sur le rapport cyclique du convertisseur DC-DC. L'effet de cette perturbation est ensuite observé à travers l'évolution de la puissance de sortie du panneau photovoltaïque. Si la puissance mesurée à l'instant K , notée $P(k)$, est supérieure à celle enregistrée à l'instant précédent $P(k-1)$, alors la direction de la perturbation est maintenue. Dans le cas contraire, la direction de la perturbation est inversée. La figure 2.6 illustre l'organigramme de l'algorithme P&O tel qu'il est destiné à être implémenté dans un microprocesseur de commande.

Ce procédé implique que la tension de fonctionnement V soit perturbée à chaque cycle du MPPT. Une fois le point de puissance maximale (MPP) atteint, la tension oscille autour de la valeur optimale de fonctionnement V_{mp} . Ces oscillations entraînent des pertes de puissance, lesquelles sont fonction de l'amplitude du pas de perturbation.

Chapitre 02 : Commande d'un système photovoltaïque par la méthode de perturbation et d'observation

- Lorsque le pas est de grande amplitude, l'algorithme réagit promptement aux variations brusques des conditions de fonctionnement. Toutefois, cela induit des pertes significatives dans les situations où les conditions sont stables ou varient lentement.
- À l'inverse, un pas de faible amplitude réduit ces pertes dans des conditions stables, mais limite la capacité du système à suivre les variations rapides de la température ou de l'ensoleillement.

La valeur optimale du pas de perturbation ΔD dépend des caractéristiques spécifiques du système. Elle doit être déterminée de manière empirique.

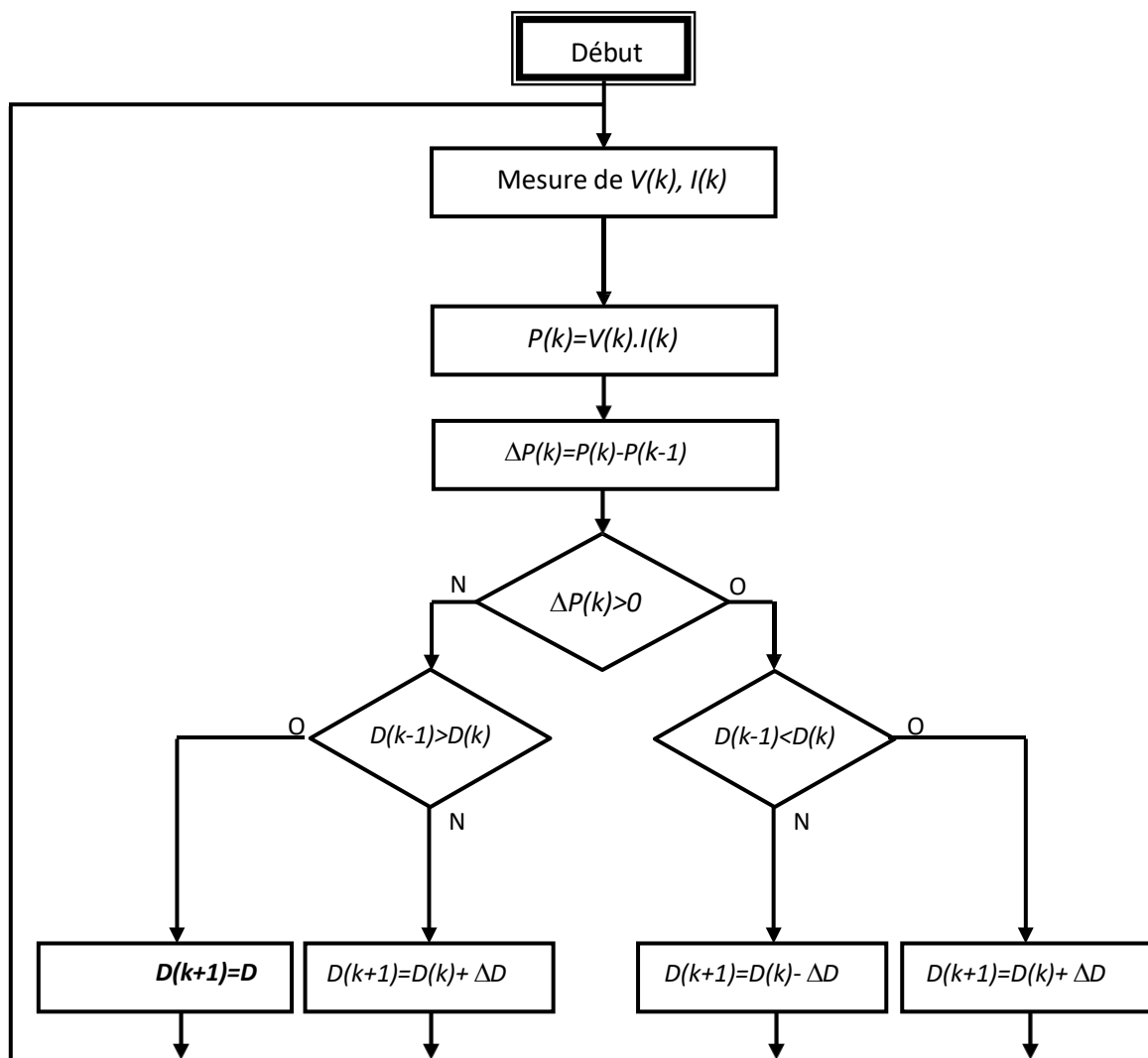


Figure 2.7: Organigramme de l'algorithme perturbation et observation. [45]

Chapitre 02 : Commande d'un système photovoltaïque par la méthode de perturbation et d'observation

2.10 Avantages et inconvénients de la méthode P&O :

2.10.1 Avantages de la méthode P&O :

L'algorithme de perturbation et d'observation (P&O) est largement reconnu pour sa simplicité et son efficacité dans la recherche du point de puissance maximale (MPPT) dans les systèmes photovoltaïques (PV). Ses principaux avantages sont la facilité de mise en œuvre, la viabilité économique et la polyvalence permettant de s'adapter à un large éventail de configurations de systèmes photovoltaïques. Néanmoins, l'efficacité de l'algorithme peut être encore améliorée grâce à des modifications et à la fusion avec d'autres méthodologies de contrôle. Les principaux avantages de l'algorithme P&O, tels qu'ils sont décrits dans la littérature de recherche fournie, sont exposés ci-dessous.

- *Simplicité et rentabilité:*

- L'algorithme P&O est réputé pour sa simplicité de mise en œuvre, ce qui en fait une solution rentable pour le MPPT dans les systèmes photovoltaïques.
- Il ne nécessite pas de modélisation mathématique complexe Ni de ressources informatiques importantes, Ce qui permet de réduire la charge financière globale du système.
- Amélioration de l'efficacité du système :
- Les modifications apportées à l'algorithme P&O, telles que l'incorporation d'un terme de quantité de mouvement, peuvent améliorer de manière significative sa réactivité dynamique tout en diminuant les oscillations au point de puissance maximale, augmentant ainsi l'efficacité globale du système.
- L'adaptabilité inhérente à l'algorithme facilite son intégration à d'autres stratégies de contrôle, telles que les contrôleurs prédictifs des modèles, qui peuvent contribuer à réduire la distorsion harmonique totale (THD) dans les systèmes photovoltaïques connectés au réseau.

- *Implémentation:*

- L'algorithme Perturbe and Observe (P&O) peut être exécuté en utilisant un large éventail de méthodologies, notamment la perturbation de la tension de référence et la perturbation du cycle de service direct, chacune présentant des avantages distincts en termes d'efficacité d'utilisation de l'énergie dans diverses conditions météorologiques.

Chapitre 02 : Commande d'un système photovoltaïque par la méthode de perturbation et d'observation

- Son utilité dépasse les limites des systèmes photovoltaïques, comme en témoignent les cadres de contrôle du couple moteur, où IL facilite la surveillance et la correction des perturbations en temps réel, améliorant ainsi l'efficacité du contrôle sans nécessiter de modèles précis.
- Malgré les avantages conférés par l'algorithme P&O, il n'est pas dépourvu de contraintes. Des défis tels que la lenteur du suivi face à des conditions qui fluctuent rapidement et un comportement oscillatoire potentiel au point de puissance maximale peuvent compromettre les performances. Néanmoins, ces obstacles peuvent être levés grâce aux progrès de la conception algorithmique et des méthodologies hybrides, affirmant ainsi la pertinence continue de l'algorithme P&O en tant qu'instrument essentiel dans les applications des énergies renouvelables.

2.10.2 Inconvénients de la méthode P&O :

- *Perte de puissance:*

La méthodologie P&O traditionnelle peut entraîner des pertes de puissance importantes lors de la surveillance du point de puissance maximale (MPP), en particulier dans des scénarios d'éclairage variables.

- *Problèmes d'oscillation:*

La technique présente fréquemment un comportement oscillatoire autour du MPP, ce qui peut aboutir à une extraction de puissance sous-optimale ET à des pertes d'énergie conséquentes.

- *Le temps de la réponse :*

L'algorithme P&O se caractérise par des temps de réponse prolongés, en particulier lorsque les conditions météorologiques subissent des modifications rapides, ce qui le rend moins efficace dans les paramètres dynamiques.

- *Instabilité du système:*

Des fluctuations brusques de l'intensité lumineuse peuvent provoquer des fonctionnements dans le cadre de la méthode P&O, peuvent entraîner un dysfonctionnement du système.

Chapitre 02 : Commande d'un système photovoltaïque par la méthode de perturbation et d'observation

Malgré ces défis, de nombreuses améliorations ont été proposées pour renforcer la robustesse et l'efficacité de la méthodologie P&O, soulignant les efforts de recherche soutenus visant à remédier à ses lacunes. Néanmoins, certains chercheurs affirment que d'autres méthodes de suivi du point de puissance maximale (MPPT) peuvent donner des performances plus constantes dans des conditions variables, ce qui indique la nécessité d'une étude plus approfondie des stratégies MPPT [25].

2.11 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons examiné la méthode Perturb and Observe (P&O) pour le suivi du point de puissance maximale (MPPT) dans les systèmes photovoltaïques. Cette méthodologie repose sur une perturbation périodique de la tension ou du courant de sortie du panneau afin de déterminer son influence sur la puissance générée. Son principe simple, sa facilité de mise en œuvre et ses coûts de calcul minimaux en font l'une des techniques les plus largement adoptées dans le domaine du MPPT. Cependant, nous avons également défini des limites spécifiques, telles que les oscillations à proximité du point de puissance maximale et une diminution de l'efficacité dans des conditions d'irradiance solaire variables. Ces résultats servent de catalyseur pour l'exploration, dans le chapitre suivant, de techniques de contrôle avancées, telles que la logique floue, visant à améliorer les performances du suivi MPPT

CHAPITRE 03

Commande d'un système
photovoltaïque par la logique
flou

Chapitre 03 : Commande d'un système photovoltaïque par la logique floue

3.1 Introduction :

Dans ce chapitre, nous avons étudié l'application de la logique floue de type 1 et de type 2 dans le cadre du suivi du point de puissance maximale (MPPT) pour les systèmes photovoltaïques. Ces approches reposent sur des règles linguistiques et des fonctions d'appartenance permettant de prendre des décisions en présence d'incertitudes et d'imprécisions liées aux variations rapides de l'ensoleillement et de la température. Contrairement aux méthodes classiques telles que P&O, la logique floue offre une capacité d'adaptation supérieure aux environnements dynamiques, en éliminant partiellement les oscillations autour du MPP et en améliorant la stabilité du système.

La logique floue de type 1, largement utilisée dans les systèmes de commande intelligents, repose sur des fonctions d'appartenance fixes. Bien qu'efficace dans des conditions modérément variables, elle présente certaines limites lorsqu'elle est confrontée à des incertitudes élevées. En réponse à ces limitations, la logique floue de type 2 introduit un degré supplémentaire d'incertitude au sein même des fonctions d'appartenance, permettant ainsi une modélisation plus robuste des variations environnementales et des bruits de mesure.

L'analyse comparative menée dans ce chapitre a permis de mettre en évidence les performances respectives de chaque type de logique floue, tant en termes de rapidité de convergence que de stabilité autour du point de puissance maximale. Ces résultats soulignent l'intérêt croissant pour les approches de commande intelligentes, notamment de type 2, dans l'optimisation énergétique des systèmes photovoltaïques soumis à des conditions d'exploitation complexes.

3.2 La logique floue de type 1 :

3.2.1 Historique de la logique floue :

Le concept d'ensembles flous, introduit par Lotfi Zadeh en 1965, a permis de modéliser l'incertitude et l'imprécision dans les systèmes complexes. Il a donné naissance à la logique floue, qui s'inspire du raisonnement humain. Après des débuts prudents, cette approche a connu un essor à partir des années 1990, notamment grâce à son application dans l'automatisation industrielle et les produits grand public. Aujourd'hui, la logique floue est largement utilisée pour intégrer des connaissances qualitatives et adapter les systèmes aux environnements incertains et variables. [26] [27]

Chapitre 03 : Commande d'un système photovoltaïque par la logique floue

3.2.2 Logique classique et logique floue :

Dans le cadre de la logique classique, une proposition est dite vraie ou fausse, selon que sa valeur est 1 ou 0. Par exemple, il est aisé pour la logique classique de diviser la température d'un espace en deux parties distinctes : « moins de 15 degrés » et « 15 degrés ou plus ».

Dans le cadre de cette étude, il est important de noter que toutes les températures inférieures à 15 degrés Celsius sont considérées comme faisant partie de l'ensemble « moins de 15 degrés ».

Dans le cadre de cette étude, les valeurs de température sont systématiquement affectées d'une unité, soit 1.

Ainsi, toute température égale ou supérieure à 15 degrés Celsius ne saurait être incluse dans l'intervalle de température « inférieur à 15 degrés Celsius ». Il convient de noter que ces éléments sont fréquemment considérés comme dépourvus de valeur.

Néanmoins, il est important de reconnaître que le raisonnement humain s'appuie souvent sur des connaissances ou des données qui peuvent s'avérer inexactes, incertaines ou imprécises.

Il est indubitable que, dans le cas où un sujet serait placé dans une pièce dont la température serait de 14,95 degrés ou de 15,05 degrés, il ne parviendrait pas à discerner une différence entre ces deux valeurs.

Cette personne sera néanmoins en mesure de déterminer si la pièce est l'expérience est décrite comme étant « Froide » ou « chaude », sans pour autant préciser la température limite ou fournir une mesure.

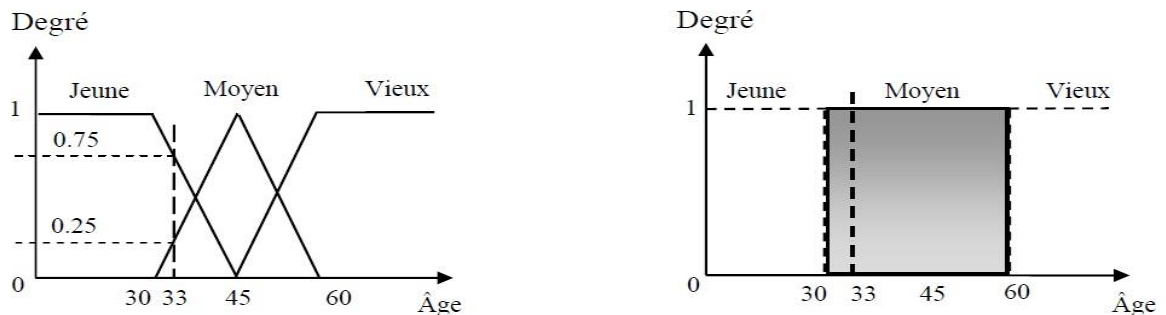


Figure 3.1: La Logique floue et La Logique classique. [46]

Chapitre 03 : Commande d'un système photovoltaïque par la logique floue

3.2.3 Théorie des ensembles flous :

La théorie des ensembles flous, ou « Fuzzy sets », est une branche de la mathématique qui s'inspire de la théorie des ensembles.

Elle se caractérise par l'extension de la notion d'ensemble ou de sous-ensemble, en introduisant une modification dans leur définition.

Ainsi, la théorie des ensembles flous s'appuie constamment sur un ensemble ordinaire pour définir les ensembles flous.

3.2.4 Sous-ensemble flou :

Nous venons de voir ce que l'on entend par sous-ensemble ou, d'un point de vue formel. Un sous-ensemble A sur un univers de discours U , est représenté comme dans la (figure 3.2) à travers sa fonction caractéristique μ_A . Il peut également être décrit par un certain nombre de caractéristiques comme :

Son support :

$$\text{Support}(A) = \{x \in U / \mu_A(x) \neq 0\} \quad (16)$$

Sa hauteur :

$$\text{Hauteur}(A) = \sup \{\mu_A(x)\} \quad (17)$$

Son noyau :

$$\text{Noyau}(A) = \{x \in U / \mu_A(x) = 1\} \quad (18)$$

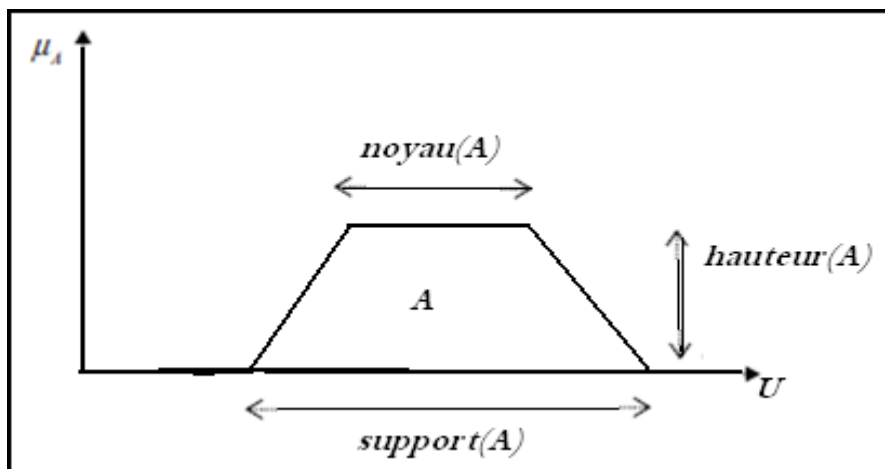


Figure 3.2 : Représentation d'un sous-ensemble flou et principales caractéristiques [47]

Chapitre 03 : Commande d'un système photovoltaïque par la logique flou

Le concept de sous-ensemble flou a été introduit dans le but d'éviter les transitions abruptes d'une classe à une autre, comme l'illustre le passage de la classe noire à la classe blanche.

Cette notion permet la présence d'éléments qui ne peuvent être rattachés de manière exclusive à aucune des deux classes, les situant ainsi dans une zone intermédiaire (ce que l'on pourrait appeler une zone grise).

Dans ce cas, l'élément en question présente un degré d'appartenance élevé à la classe noire et un degré faible à la classe blanche, comme l'illustre l'exemple du gris foncé.

La notion de sous-ensemble flou permet de traiter les situations suivantes :

Il convient de noter que les catégories utilisées présentent des limites mal définies. Celles-ci sont illustrées par des termes tels que « centre-ville » ou « ancien ».

Il s'agit de situations intermédiaires, se situant à la croisée du tout et du rien, comme l'illustre le concept de « presque noir ».

Le processus de transition d'une propriété à une autre s'effectue de manière graduelle, allant de la catégorie « proche » à celle « éloignée », en fonction de la distance qui les sépare.

Il convient de noter que les valeurs mentionnées sont approximatives. En effet, elles sont estimées à environ 2 kilomètres.

Dans le cadre de la définition des critères d'éloignement pour les constructions résidentielles, il est essentiel de ne pas recourir à des délimitations rigides et arbitraires. En effet, il est difficile de déterminer avec précision si une maison située à 200 mètres d'une plage est considérée comme étant à proximité immédiate, ou si, à 210 mètres, elle est en réalité plus éloignée.

Il convient de noter que :

Le concept de « sous-ensemble » flou trouve son origine dans la nature même de l'univers de discours U , qui est considéré comme une partie de ce dernier. Dans la littérature, l'emploi conjoint du terme « flou » et de son adverbe « ensemble » constitue un abus de langage.

Chapitre 03 : Commande d'un système photovoltaïque par la logique floue

3.2.5 Les variables et les valeurs linguistiques :

La logique floue, ou logique vague, est une théorie mathématique qui s'applique aux systèmes non linéaires et non déterministes. Elle repose sur des variables floues, dites « variables linguistiques à valeurs linguistiques », qui sont des variables aléatoires prenant des valeurs dans un ensemble de mots ou de phrases. Ces variables floues sont utilisées pour modéliser des situations complexes où les données sont imprévisibles et non linéaires.

Une variable linguistique peut être définie comme une caractéristique d'un système qui doit être ajustée ou modifiée. Dans le cadre d'un contrôleur flou, elle représente un paramètre qui peut être manipulé pour atteindre un objectif spécifique. Chaque valeur représente un concept flou, une entité discursive qui se déploie dans l'univers des discours.

Une variable linguistique se distingue par les critères suivants [28] :

- Un nom de la variable linguistique.
- Un ensemble des valeurs linguistiques qui peut prendre la variable linguistique.
- L'univers de discours, c'est-à-dire l'ensemble des valeurs numériques sur lesquelles il est défini.

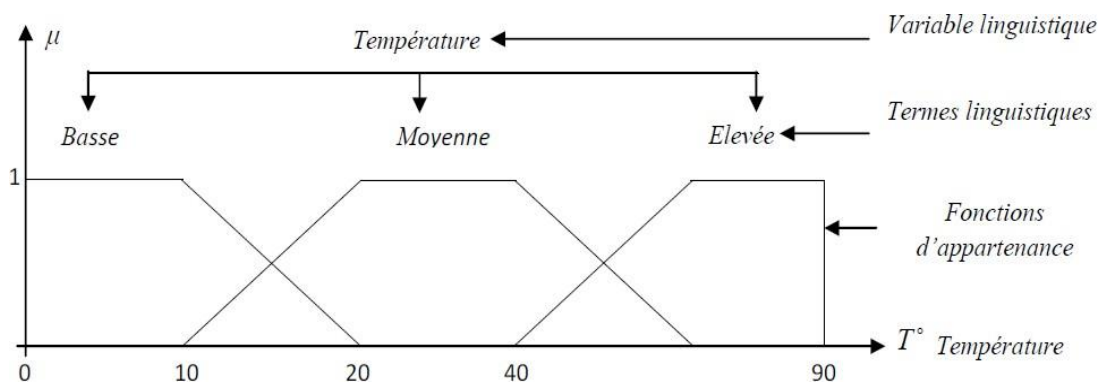


Figure 3.3: Variable linguistique [46]

Exemple 1:

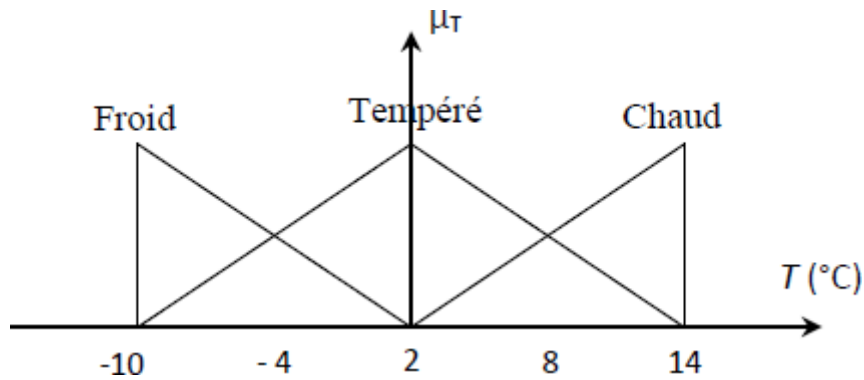


Figure 3.4: Exemple d'une variable linguistique.[46]

- Univers de discours : Gamme de température de -10°C à 14°C .
- Variable linguistique : La température.
- Valeurs linguistiques : « chaud » « tempéré » « froid ».

3.2.6 Fonction d'appartenance :

Dans le cadre de la prise de décisions floues sur ordinateur, il est impératif de procéder à une définition des variables linguistiques à l'aide de fonctions d'appartenance. Cette démarche est essentielle pour garantir un traitement numérique efficace des variables linguistiques.

Dans le cadre de cette étude, il est essentiel d'associer à chaque valeur de la variable linguistique une fonction d'appartenance, désignée par $\mu_A(x)$. Cette fonction d'appartenance sera communément appelée « degré » ou « facteur d'appartenance ».

Il convient de mentionner que la totalité des éléments de x pour lesquels $\mu_A(x) > 0$ est désignée sous le terme de « support de A ».

Dans la majorité des cas, les fonctions suivantes sont utilisées pour les fonctions d'appartenance :

Chapitre 03 : Commande d'un système photovoltaïque par la logique floue

Tableau 3.1 Fonctions d'appartenance de la logique floue type-1.[47]

Fonction	Forme algébrique	Forme graphique
Fonction triangulaire	$\mu(x) = \max\left(\min\left(\frac{x-a}{b-a}, \frac{c-x}{c-b}\right), 0\right)$	
Fonction trapézoïdale	$\mu(x) = \max\left(\min\left(\frac{x-a}{b-a}, 1, \frac{d-x}{d-c}\right), 0\right)$	
Fonction gaussienne	$\mu(x) = \exp\left(-\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2}\right)$	

- **Exemple 2:**

Chaque variable du contrôleur est définie par cinq (5) fonctions d'appartenance. Nous utilisons des fonctions de triangulaires aux extrémités des univers de discours pour les variables d'entrée (E et ΔE) et des fonctions de type trapézoïdales pour la variable de sortie (ΔD). Les termes linguistiques associés aux fonctions d'appartenance sont : PB (positif grand), P (positif petit), ZE (Zéro), N (négatif petit) et NB (négatif grand). Les figures 3.5, 3.6 et 3.7 donne respectivement les fonctions d'appartenance associées aux variables E, ΔE et ΔD le premier contrôleur de type 1.

Chapitre 03 : Commande d'un système photovoltaïque par la logique floue

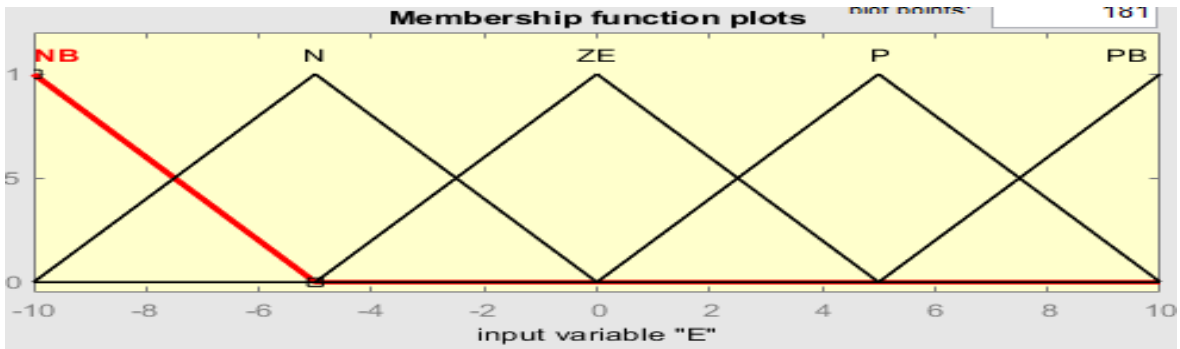


Figure 3.5: Fonction floue de type 1 : appartenance à l'entrée E : erreur

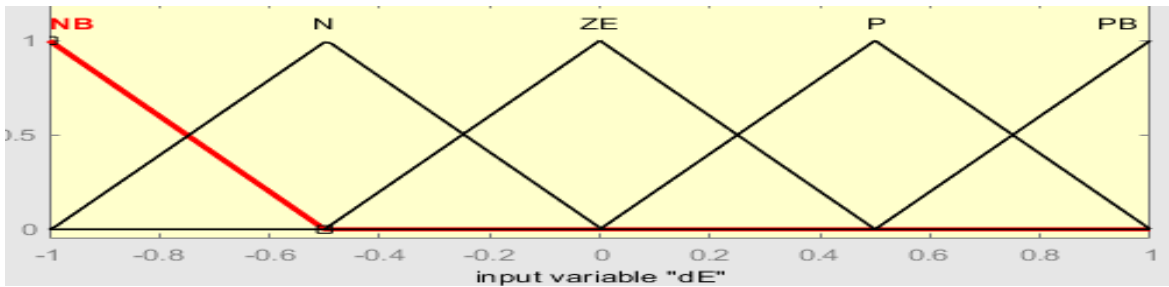


Figure 3.6: Fonction floue de type 1 : appartenance à l'entrée dE : variation de l'erreur

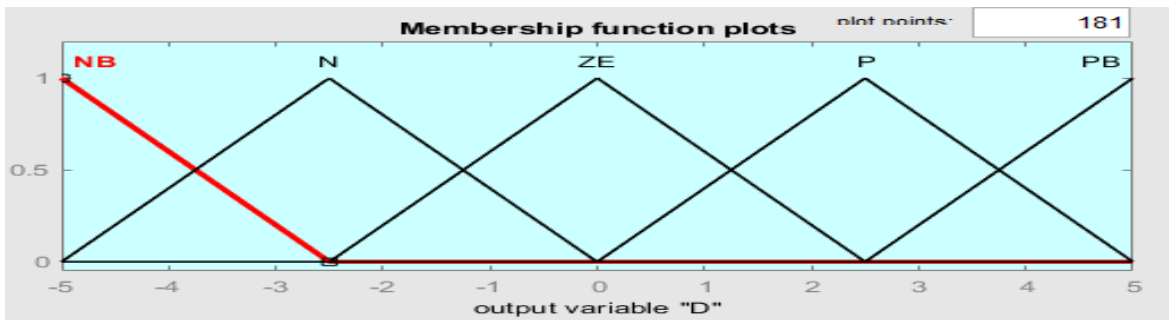


Figure 3.7: Fonction floue de type 1 : appartenance des sorties

3.2.7 Opérateurs de la logique floue :

Les variables linguistiques sont liées entre elles par des inférences qui s'expriment à l'aide d'opérateurs logiques tels que « ET » ou « OU ». Dans le cadre de cette étude, nous nous intéressons aux opérateurs de la logique floue qui interviennent sur les fonctions d'appartenance. Ces dernières représentent les variables linguistiques.

Dans la majorité des cas, les opérateurs ET ou OU sont réalisés respectivement par les règles « min » et « max ». Cette approche présente une certaine similitude avec les principes régissant la logique classique. Cependant, il convient de souligner l'existence d'un ensemble de règles pour la réalisation des opérateurs ET et OU, qui tiennent compte du caractère particulier de la logique floue.

Chapitre 03 : Commande d'un système photovoltaïque par la logique floue

Dans le cadre de cette étude, nous considérons deux ensembles flous, A et B, qui sont définis dans le référentiel U. Ces ensembles sont associés respectivement aux fonctions d'appartenance μ_A et μ_B .

- **Définition 1 :** (Union) La fonction d'appartenance $\mu_{A \cup B}$ de l'union AUB, est définis pour tout $u \in U$ par :

$$\mu_{A \cup B}(u) = \mu_A(u) + \mu_B(u) \quad (18)$$

Dans le domaine de la commande, le + représente souvent le MAX

$$\mu_A(u) + \mu_B(u) = \max\{\mu_A(u), \mu_B(u)\} \quad (19)$$

- **Définition 2 :** (intersection) La fonction d'appartenance

$A \cap B$, est définie pour tout $u \in U$ par :

$$\mu_{A \cap B}(u) = \min\{\mu_A(u), \mu_B(u)\} \quad (20)$$

- **Définition 3 :** (Complémentation) La fonction d'appartenance μ_{A^c} – du complément de l'ensemble A, notée A^c , est définie pour tout $u \in U$ par :

$$\mu_{A^c}(u) = 1 - \mu_A(u) \quad (21)$$

3.3 La commande floue de type 1 :

3.3.1 Structure d'un régulateur flou type 1 :

Le régulateur par logique floue est composé de quatre éléments de base suivants :

- Interface de fuzzification,
- Base de connaissance floue,
- Moteur d'inférence floue,
- Interface de défuzzification.

Chapitre 03 : Commande d'un système photovoltaïque par la logique floue

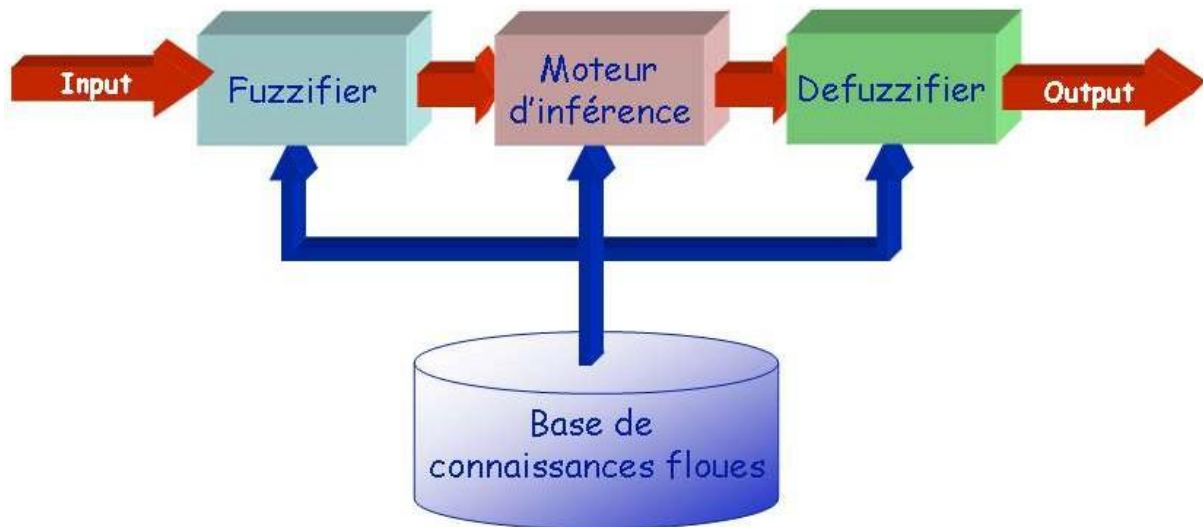


Figure 3.8: Structure d'un régulateur flou type 1 [47]

- *Fuzzification:*

La fuzzification, processus de conversion des valeurs continues en valeurs discrètes, s'effectue au sein de l'interface d'entrée du contrôleur flou. Dans le cadre de cette phase, les informations provenant du système sont d'abord normalisées. Dans un second temps, les données ainsi normalisées sont converties en qualifications linguistiques, au moyen de règles sémantiques élaborées par un expert.

Dans le cadre de la phase de normalisation, chaque mesure issue du système est soumise à une modification. Cette modification vise à attribuer à la mesure une valeur appartenant à un univers de discours relativement simple. Dans le cadre de cette analyse, il est possible d'opter pour un univers du discours qui se centre sur un intervalle compris entre $[-c, +c]$. Dans le cadre de la résolution d'une équation, il est fréquent que la mesure initiale X soit incluse dans un intervalle $[a, b]$. Dans ce contexte, il est fréquent que la normalisation soit réalisée par le biais d'une transformation linéaire.

Dans le cadre de cette étude, l'univers du discours sera représenté par une variable linguistique. Cette dernière se distingue par une taxinomie relativement restreinte, avec un nombre de termes généralement compris entre trois et sept, dans le but de limiter le nombre de règles.

Dans le cadre de la procédure, les valeurs normalisées, obtenues par le processus de calcul à partir des données entrées, sont converties en évaluations linguistiques. Cette conversion s'opère par le biais de l'utilisation de variables linguistiques spécifiques.

Chapitre 03 : Commande d'un système photovoltaïque par la logique flou

Exemple 2

Une variable linguistique sur P univers de discours $[-6, +6]$, peut être définie de la façon précisée dans le tableau :

Tableau 3.2 : Exemple de variable linguistique [48]

Terme linguistique	Signification	Regie semantique
NG	negatif grand	environ -6
NM	negatif moyen	environ -4
NP	negatif petit	environ -2
EZ	environ zero	environ 0
PP	positif petit	environ +2
PM	positif moyen	environ +4
PG	positif grand	environ +6

Dans cet exemple, les termes linguistiques utilisés sont ceux initialement proposés par Mamdani, lorsque la variable linguistique en comporte sept. Les fonctions d'appartenance correspondant à des variables comportant trois et cinq termes.

La fuzzification est une étape clé dans tout contrôleur flou. La variable linguistique, qui est définie par une expertise, doit respecter un certain nombre de critères afin d'être efficace :

- Chaque terme linguistique est un nombre flou, de noyau non nul et dont la fonction d'appartenance. Est convexe.
- Les fonctions d'appartenance doivent respecter un ordre linguistique.
- Les fonctions d'appartenance ne doivent pas trop se superposer. On tolère en général un chevauchement qui ne dépasse pas la mi-hauteur des termes linguistiques consécutifs.

Chapitre 03 : Commande d'un système photovoltaïque par la logique floue

- *Règles floues:*

Dans le cadre de la modélisation linguistique, les règles floues occupent une place prépondérante dans la détermination des connaissances relatives à l'état du système. Ces connaissances sont déterminées en fonction des qualifications linguistiques émises lors de l'étape de fuzzification. Ces compétences peuvent être considérées comme des qualifications linguistiques.

En règle générale, les règles floues sont le fruit d'une accumulation d'expériences issues de l'expertise des opérateurs. Ces connaissances sont traduites en règles simples pouvant être utilisées dans un processus d'inférence floue. Dans l'hypothèse où un expert émettrait la directive suivante : « Si la température de l'eau est élevée, il est nécessaire d'incorporer de l'eau froide », le système procéderait à l'utilisation d'une directive de la forme suivante : « Si p, alors q ».

À l'heure actuelle, il est néanmoins envisageable de constituer un ensemble de règles floues par le biais de méthodes d'apprentissage, sans qu'il soit impératif de recourir à l'intervention d'un expert humain.

Comme indiqué dans la partie suivante de cette thèse, la stratégie sera décrite en détail.

- **Exemple 3:**

Tableau 3.3: Tableau des règles.

	$\Delta E(k)$					
$E(k)$		NB	N	ZE	P	PB
	NB	NB	NB	NB	N	ZE
	N	NB	NB	N	ZE	P
	ZE	NB	N	ZE	P	PB
	P	N	ZE	P	PB	PB
	PB	ZE	P	PB	PB	PB

Chapitre 03 : Commande d'un système photovoltaïque par la logique floue

- *Mécanisme d'inférence:*

Cette approche s'inscrit dans le cadre de la logique de prise de décision, qui vise à simuler le processus décisionnel humain. Elle englobe deux composantes principales : premièrement, l'évaluation de la vérité des règles du système, et deuxièmement, l'attribution d'une valeur de sortie à chacune de ces règles. Cette valeur de sortie est fonction de la partie conclusion des règles, qui peut revêtir plusieurs formes. Il est à noter que cette proposition peut s'avérer vague, et l'on recourt généralement à l'une des trois méthodes suivantes :

- Méthode d'inférence Max-Min (méthode de Mamdani)
- Méthode d'inférence Max-Produit (méthode de Larsen)
- Méthode d'inférence Somme-Produit (Sugeno).

- *Défuzzification:*

Cette étape permet de convertir la conclusion résultante du mécanisme d'inférence en une variable physique applicable sur le système à commander. Dans le cadre de cette étude, nous avons évalué les différentes méthodes qui ont été proposées. Notre analyse a permis de distinguer les approches suivantes :

- *Méthode de centre de gravité :*

Il s'agit de la méthode la plus couramment employée. Le processus d'extraction barycentrique de la commande s'articule autour du calcul de la moyenne des valeurs du référentiel, pondérées par les degrés d'appartenance de chaque élément. La sortie défuzzifiée Z est définie par :

$$Z = \frac{\sum_{i=1}^n z_i * \mu(z_i)}{\sum_{i=1}^n \mu(z_i)} \quad (22)$$

- *Méthode de la moyenne des maxima :*

Cette procédure permet de déterminer la moyenne des abscisses des maximums de la fonction résultante.

- *Méthode du maximum :*

Cette approche, bien que la plus accessible et la plus imprécise, demeure la méthode la plus répandue. La sortie correspond à l'abscisse du maximum de la fonction d'appartenance résultante.[49]

Chapitre 03 : Commande d'un système photovoltaïque par la logique flou

3.3.2 Avantages et Inconvénients sur la Logique Floue :

3.3.2.1 *Avantages:*

- Il s'avère que la mise en œuvre d'un modèle mathématique ne s'avère pas indispensable dans le cadre de cette étude.
- Il convient de noter qu'une possibilité d'implémentation des connaissances linguistiques est à considérer.
- L'aptitude à maîtriser des systèmes à régler dont le comportement est complexe est une compétence essentielle dans le domaine de la mécanique.
- Il est impératif de disposer de systèmes de développement efficaces, que ce soit pour les microprocesseurs ou les PC « solution logicielle », ou encore pour les circuits intégrés (processeurs dédiés, processeurs « floue »), « solution matérielle ».

3.3.2.2 *Inconvénients :*

- Il est à constater que la conception d'un réglage n'est pas assortie de directives suffisamment précises.
- Il est impératif que les règles soient accessibles.
- L'approche méthodologique adoptée se caractérise par son caractère artisanal et non systématique.

3.4 La logique floue de type 2 :

3.4.1 Introduction :

L'incertitude est une composante intrinsèque des systèmes intelligents employés dans les applications concrètes [29]. L'emploi de méthodes inédites pour traiter les informations incomplètes revêt une importance fondamentale [29]. Comme les contrôleurs flous de type 1, dont les fonctions d'appartenance sont des ensembles flous de type 1, sont incapables de gérer directement ces incertitudes [29], une nouvelle méthode pour construire un contrôleur intelligent « contrôleur à logique floue de type 2 » doit être décrite. Cette méthode utilise la logique floue de type 2, dans laquelle les fonctions d'appartenance antécédentes ou conséquentes sont des ensembles flous de type 2. Ces ensembles, dits « flous », sont eux-mêmes composés d'ensembles de type 1, qui sont également flous. Leur utilisation est particulièrement pertinente dans les cas où il est difficile de déterminer une fonction d'appartenance exacte pour un ensemble flou [29]. En outre, les ensembles flous de type 2, qui sont utilisés dans les systèmes flous de type 2, sont en mesure de gérer de manière plus efficace ces incertitudes, car

Chapitre 03 : Commande d'un système photovoltaïque par la logique floue

ils fournissent un nombre plus élevé de paramètres [29]. Dans la présente section, nous proposons une description du processus de conception d'un contrôleur intelligent faisant usage de la logique floue de type 2 par intervalles. Cette approche vise à minimiser les effets de l'incertitude générée par divers facteurs, tels que les éléments d'instrumentation et le bruit environnemental.

3.4.2 Définition de la logique floue type-2 :

Un ensemble flou type-2, noté \hat{A} est caractérisé par une fonction d'appartenance tridimensionnelle, $\mu_{\hat{A}}(x, u)$, c.-à-d. :

$$\hat{A} = \iint \mu_{\hat{A}}(x, u) / (x, u) \quad J_x \in [0, 1] \quad (23)$$

Avec \iint dénote l'union de tous les éléments du produit cartésien sur x et u .

À chaque point fixe x de X , J_x est l'appartenance primaire de x , et x est appelé variable primaire [30] [31].

Donc pour $\hat{x} \in X$ et $\forall u \in J_x \in [0, 1]$, on a :

$$\mu_{\hat{A}}(x = \hat{x}, u) = \mu_{\hat{A}}(\hat{x}) = \int f_{\hat{x}}(u) / u \quad J_x \in [0, 1] \quad (24)$$

Avec $0 \leq f_{\hat{x}}(u) \leq 1$. Puisque $\forall \hat{x}$, ce \hat{x} va appartenir à X , c.-à-d. $\hat{x} \in X$, alors nous notons la fonction d'appartenance secondaire par $\mu_{\hat{A}}(\hat{x})$ 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 (24), on peut écrire \hat{A} sous la forme suivante [31] :

$$\hat{A} = \int \mu_{\hat{A}}(\hat{x}) / (\hat{x}) = \int [\int f_{\hat{x}}(u) / u] / \hat{x} \quad J_x \in [0, 1] \quad (25)$$

On représente sur la Fig.2.1 les grandeurs floues déjà expliqués, voir [31][32][33]. Le domaine de la fonction d'appartenance secondaire est appelé appartenance primaire de x noté J_x telle que $[0, 1] \quad J_x \in [0, 1] \quad x \in X$.

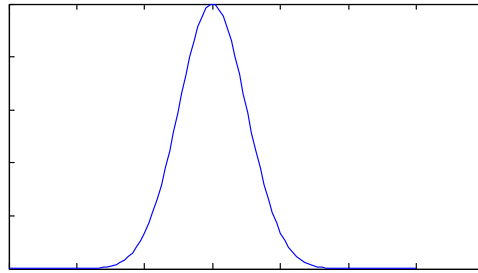
L'amplitude de la fonction d'appartenance secondaire est appelée degré d'appartenance secondaire noté $f_{\hat{x}}(u)$.

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. :

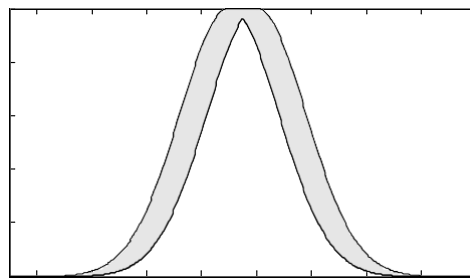
Chapitre 03 : Commande d'un système photovoltaïque par la logique floue

$$f_x(u)=1, \forall u \in J_x \in [0,1] \forall x \in X. \quad (26)$$

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 en termes des bornes gauches et droites $[l, r]$ ou par leurs centres et largeurs $[c-s, c+s]$ où $c=(l+r) /2$ et $c=(l-r) /2$.



(a)



(b)

Figure 3.9: Représentation schématique d'un ensemble flou type-2 gaussien. [47]

Les appartenances secondaires sont représentées dans (b), où on remarque qu'ils sont gaussiens [34]. L'incertitude dans un ensemble flou type-2, \tilde{A} est représentée par une région bornée appelée « Footprint Of Uncertainty » FOU. C'est l'union de toutes les appartenances primaires [31] [35] :

$$FOU(\tilde{A})= UJ_x \quad (27)$$

La fonction d'appartenance supérieure sera notée par $\overline{u_{\tilde{A}}(x)} \forall x \in X$, et la fonction d'appartenance inférieure sera notée par $u_{\tilde{A}}(x) \forall x \in X$, alors nous avons :

$$\overline{u_{\tilde{A}}(x)}=\overline{FOU(\tilde{A})} \quad (28)$$

Chapitre 03 : Commande d'un système photovoltaïque par la logique floue

$$\underline{u\tilde{A}(x)} = \underline{FOU(\tilde{A})} \quad (29)$$

3.4.3 Différents types d'ensembles flous type-2 :

- *Ensemble flou type-2 gaussien :*

Le degré d'appartenance de chaque point est défini comme un ensemble flou de type 1 gaussien, dont le domaine de définition est inclus dans l'intervalle [0, 1].

- *Ensemble flou type-2 triangulaire :*

Le degré d'appartenance de chaque point est défini comme un ensemble flou type-1 triangulaire, dont le domaine de définition est inclus dans l'intervalle [0,1].

- *Ensemble flou type-2 intervalle :*

Le degré d'appartenance de chaque point est défini comme un ensemble ordinaire dont le domaine de définition est inclus dans l'intervalle [0,1]. Dans cette configuration, les appartenances secondaires sont équivalentes à 1.

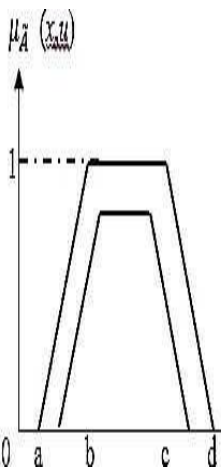
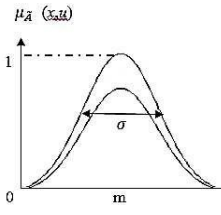
3.4.4 Fonction d'appartenance :

Les fonctions d'appartenance les plus utilisées sont représentées dans le tableau suivant :

Tableau 3.4 : Fonctions d'appartenance de la logique floue type-2. [47]

Fonction	Forme algébrique	Forme graphique
Fonction triangulaire	$u_{\tilde{A}}(x) = \begin{cases} 0 & ; x < a \\ \frac{x-a}{b-a} & ; a \leq x < b \\ \frac{c-x}{c-b} & ; b \leq x < c \\ 0 & ; x > c \end{cases}$ $u_{\tilde{A}}(x) = \begin{cases} 0 & ; x < (a + \alpha) \\ (1 - \alpha) \frac{x-(a+\alpha)}{b-(a+\alpha)} & ; (a + \alpha) \leq x < b \\ (1 - \alpha) \frac{x-(a+\alpha)}{b-(a+\alpha)} & ; b \leq x \leq (c - \alpha) \\ 0 & ; x > (c - \alpha) \end{cases}$	

Chapitre 03 : Commande d'un système photovoltaïque par la logique flou

<p>Fonction trapézoïdale</p>	$\overline{uA(x, u)} = \begin{cases} 0; & x < a \\ \frac{x-a}{b-a}; & a \leq x < b \\ 1; & b \leq x < c \\ \frac{d-x}{d-c}; & c \leq x < d \\ 0; & x > d \end{cases}$ $\overline{u_{\tilde{A}}(x, u)} = \begin{cases} 0 & ; x < (a + \alpha) \\ (1 - \alpha) \frac{x-(a+\alpha)}{b-(a+\alpha)}; & (a + \alpha) \leq x < b \\ (1 - \alpha) \frac{(d-\alpha)-x}{(d-\alpha)-c}; & b \leq x \leq (d - \alpha) \\ 0 & ; x > (d - \alpha) \end{cases}$	
<p>Fonction gaussienne</p>	$\overline{uA(x, u)} = \exp\left(-\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2}\right)$ $\overline{uA(x, u)} = (1 - \alpha) \exp\left(-\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2}\right)$	

• **EXEMPLE 4**

Chaque variable du contrôleur est définie par sept (7) fonctions d'appartenance. Nous utilisons des fonctions de triangulaires aux extrémités des univers de discours pour les variables d'entrée (E et ΔE). Les termes linguistiques associés aux fonctions d'appartenance sont : PB (positif grand), PM (positif moyen) , PS (positif petit), ZE (Zéro), NS (négatif petit), NM (négatif moyen) et NB (négatif grand). Les figures 3.10, 3.11 et le tableau 3.5 donne respectivement les fonctions d'appartenance associées aux variables E, ΔE et ΔD le premier contrôleur de type 2.

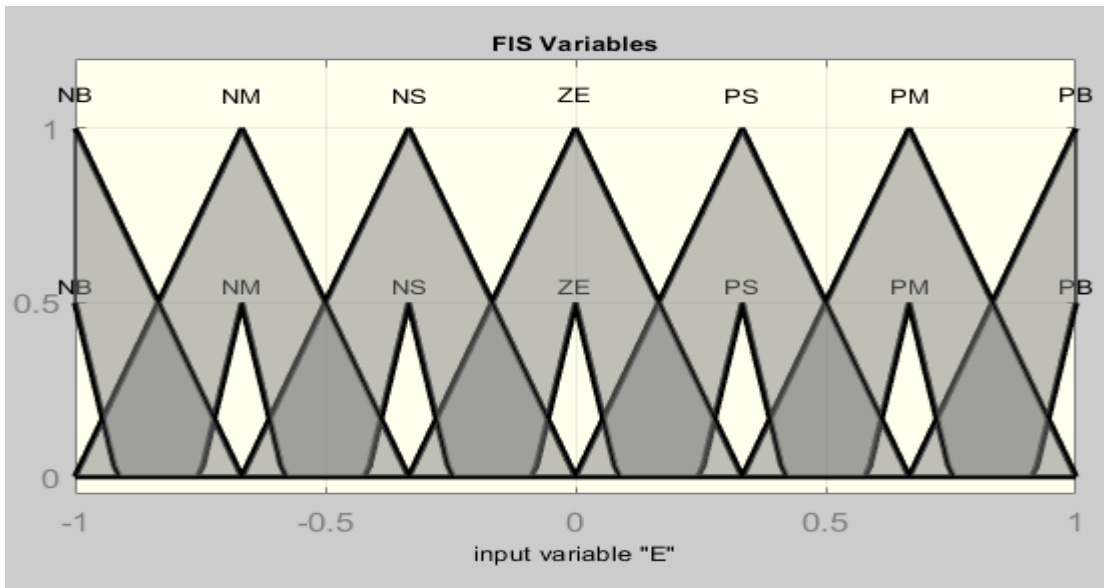


Figure 3.10. Fonction floue de type 2 : appartenance à l'entrée E : erreur

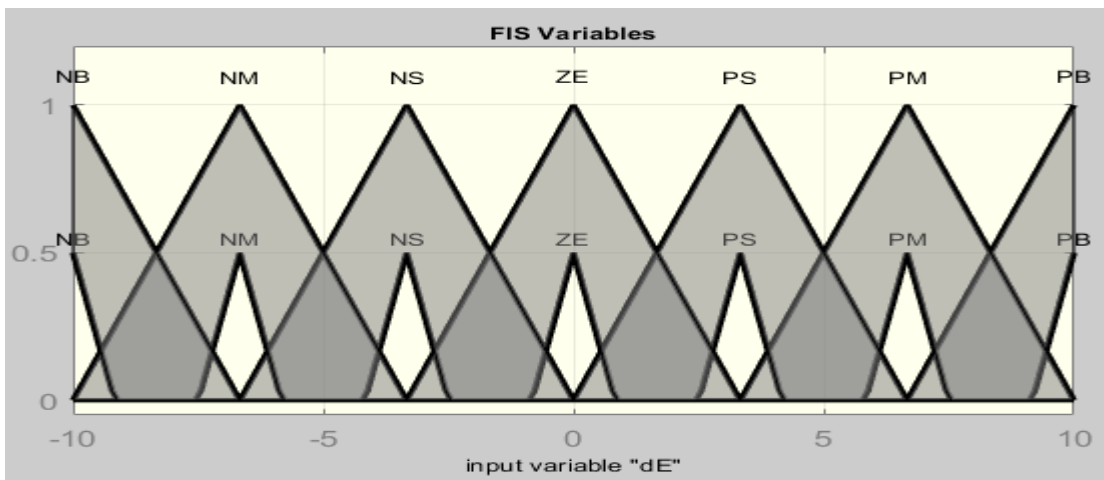


Figure 3.11. Fonction floue de type 2 : appartenance à l'entrée dE : variation de l'erreur

Tableau 3.5: Fonction floue de type 2 : appartenance des sorties

ZE	S	M	B
0	0.3	0.7	1

3.4.5 Opérations sur les ensembles flous type-2 :

Dans la présente section, nous nous proposons de décrire les opérations théoriques sur les ensembles flous de type 2. Notre étude se concentre sur les ensembles flous de type 2, \tilde{A}_i ($i = 1, \dots, r$), dont les fonctions d'appartenance secondaires sont des ensembles flous de type 1. Afin de déterminer l'union, l'intersection et le complément d'ensembles flous de type 2, il est impératif d'étendre les opérations binaires de

Chapitre 03 : Commande d'un système photovoltaïque par la logique floue

minimum (ou produit) et de maximum, ainsi que l'opération unaire de négation, des nombres crispés aux ensembles flous de type 1. En effet, à chaque x , $u_{\tilde{A}i}(x, u)$ est une fonction (contrairement au cas de type 1, où $u_{\tilde{A}i}(x)$ est un nombre crispé). Dans le cadre de la modélisation des ensembles flous de type 2, l'outil de calculs préconisé est le principe d'extension de Zadeh [35]. Celui-ci permet de déterminer l'union, l'intersection et le complément de ces ensembles.

$$\tilde{A1} = \int x u_{\tilde{A1}}(x) \quad (30)$$

$$\tilde{A2} = \int x u_{\tilde{A2}}(x) \quad (31)$$

Notre approche se concentre sur les opérations de la théorie des ensembles pour ces ensembles flous généraux de type 2.

3.5 La commande floue de type 2 :

3.5.1 Structure d'un régulateur flou type 2 :

Il existe quatre modules pour un régulateur à logique floue :

- La fuzzification des entrées et sorties.
- L'inférence floue selon une base de règle.
- La réduction de type.
- La défuzzification des sorties.

L'architecture d'un contrôleur flou est donnée par le schéma suivant :

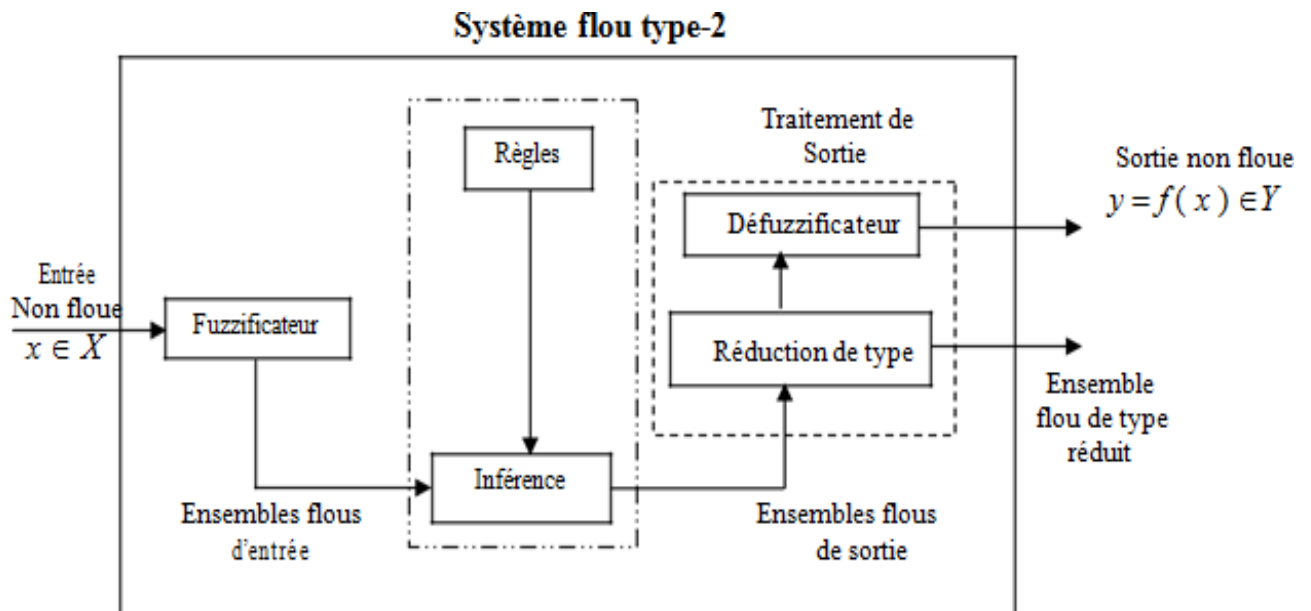


Figure 3.1 Schéma synoptique d'un contrôleur flou type-2. [47]

Chapitre 03 : Commande d'un système photovoltaïque par la logique flou

- *Fuzzification*

Dans le cadre de la modélisation des systèmes, l'interface de fuzzification joue un rôle crucial dans la transformation des entrées déterministes en ensembles flous. Ces derniers, qui peuvent être représentés par un EFT-2, offrent une flexibilité et une adaptabilité qui sont essentielles pour la compréhension des systèmes complexes. Cependant, dans la suite de cette étude, nous n'avons considéré que la fuzzification par singleton, pour laquelle l'ensemble flou d'entrée possède un seul degré d'appartenance non nul [37].

- *Base des règles*

La structure des règles reste exactement la même dans le cas des SFT-1. La $l^{i\text{eme}}$ règle dans un SFT-2 à la forme suivante

" R^l : si x_1 est F_1^l et x_2 est F_2^l et ... et x_p est F_p^l , Alors y est G^l "

Où les x_i sont des entrées, F_i^l sont des ensembles antécédents ($i = 1 \dots, p$), y est la sortie, et G^l est l'ensemble conséquent.

- **EXEMPLE 5 [38]**

Tableau 3.6: Tableau des règles

<i>dele</i>	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NB	B	M	S	ZE	S	M	B
NM	B	M	M	S	M	M	B
NS	B	B	M	M	M	B	B
ZE	B	B	B	B	B	B	B
PS	B	B	M	M	M	B	B
PM	B	M	M	S	M	M	B
PB	B	M	S	ZE	S	M	B

- *Mécanisme d'inférence*

La distinction entre le type 1 et le type 2 repose exclusivement sur la nature des fonctions d'appartenance. Par conséquent, la structure des règles demeure inchangée pour le type 2. La seule variation réside dans le fait que certaines (ou toutes) les fonctions d'appartenance appartiennent au type 2.

Il n'est pas nécessaire que toutes les fonctions d'appartenance des prémisses et des conséquences soient de type 2. Il a été démontré qu'une seule fonction d'appartenance, qu'elle soit dans une prémisse ou dans une conséquence, suffit à caractériser l'ensemble du système comme étant de type 2 [39].

Chapitre 03 : Commande d'un système photovoltaïque par la logique flou

- *Module de traitement de la sortie :*

Le module de traitement de la sortie se compose de deux blocs : le réducteur de type et l'interface de défuzzification.

- *Réduction de type :*

Dans le cadre de cette étude, il apparaît que la réduction de type prend en considération un ensemble d'informations supplémentaires relatives aux incertitudes inhérentes aux règles, par rapport à la valeur défuzzifiée, qui est quantifiée par un nombre. Néanmoins, la mise en œuvre de cette opération requiert des calculs intensifs, à l'exception notable du SFT-2 type intervalle pour lequel une procédure spécifique a été élaborée pour faciliter la réduction de type [31].

Parmi les méthodes de réduction de type utilisées, nous pouvons citer :

- 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.

- *Défuzzification :*

Afin d'obtenir une sortie ordinaire (et non floue) du système flou de type 2, il est nécessaire de procéder à la défuzzification de l'ensemble de type réduit. Dans le cadre de cette étude, nous procéderons à la transformation de l'ensemble flou type-2 en ensemble flou type-1, et la sortie s'effectuera comme suit [38] :

$$YCG = \frac{Y_l + Y_r}{2} \quad (32)$$

3.6 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté l'approche de la logique floue en matière de suivi du point de puissance maximale (MPPT) dans les systèmes photovoltaïques.

En effet, contrairement aux méthodologies traditionnelles telles que la planification et l'organisation (P&O), la logique floue favorise une prise de décision plus judicieuse en prenant en compte l'incertitude et l'imprécision inhérentes aux grandeurs mesurées.

Cette approche s'appuie sur un ensemble de règles linguistiques et des fonctions d'appartenance, offrant ainsi une meilleure adaptabilité aux variations rapides de l'ensoleillement et de la température. Les résultats obtenus ont permis de mettre en évidence une amélioration significative en termes de stabilité et de rapidité de convergence vers le point de puissance maximale.

Chapitre 03 : Commande d'un système photovoltaïque par la logique flou

Cette approche s'avère particulièrement pertinente pour les environnements dynamiques, où elle contribue à l'optimisation des performances du système photovoltaïque.

Dans le cadre de notre étude, nous avons procédé à une analyse comparative des méthodes MPPT (Maximum Power Point Tracking) fondées sur la logique floue de type 1 et de type 2. La logique floue de type 1, malgré son utilisation généralisée, présente des limites en termes de précision dans les environnements caractérisés par une forte incertitude, notamment en présence de variations rapides de l'ensoleillement ou de la température. En revanche, la logique floue de type 2 introduit un niveau supplémentaire d'incertitude dans la définition des fonctions d'appartenance, ce qui lui confère une meilleure robustesse et une capacité accrue d'adaptation. Les résultats de la simulation ont démontré que l'intégration de la logique floue de type 2 dans le système a pour effet d'améliorer la stabilité globale, de réduire les oscillations autour du point de puissance maximale et d'assurer un rendement énergétique plus élevé. Cette comparaison souligne l'importance de recourir à des approches intelligentes de type 2 dans des environnements dynamiques et complexes.

CHAPITRE 04

Simulation et évaluation des
résultats

4.1 Introduction :

Dans le cadre de cette étude, nous avons utilisé le logiciel MATLAB/SIMULINK pour analyser les résultats de simulations d'un système photovoltaïque soumis à des variations d'irradiation solaire. L'objectif de cette analyse est de concevoir un suivi optimal du point de puissance maximale (MPPT), permettant ainsi d'optimiser l'efficacité énergétique du système. Dans le cadre de cette étude, trois approches de commande ont été mises en œuvre et comparées.

La méthode Perturb and Observe (P&O), qui s'appuie sur une perturbation périodique de la tension ou du courant afin de déterminer le point de puissance maximale, constitue une approche méthodologique pertinente dans le cadre de l'optimisation des systèmes électriques. Cette approche, bien que largement adoptée, peut afficher des variations autour du point d'optimum, en particulier lors de variations rapides de l'irradiation et la température.

Le contrôleur flou de type 1 est un dispositif qui utilise une base de règles floues pour garantir un suivi plus fluide du MPP, c'est-à-dire la gestion dynamique de la puissance moyenne d'un système électrique. Ce type de commande a pour effet d'améliorer la stabilité du système et de réduire les oscillations, notamment dans des conditions variables.

Le contrôleur flou de type 2, une innovation technologique de pointe, a été conçu pour optimiser la gestion des incertitudes inhérentes aux mesures et aux variations environnementales. Il convient de noter que ce dispositif se distingue par une robustesse et une précision accrue dans le suivi du MPP, notamment en présence de variations soudaines des conditions d'irradiation.

La simulation a été réalisée en considérant des profils d'irradiation dynamiques. Cette démarche a permis d'évaluer la capacité de chaque méthode à suivre efficacement le MPP en temps réel. Les résultats obtenus permettent de comparer les performances de chaque approche en termes de vitesse de convergence, de stabilité et de rendement énergétique global.

4.2 Simulation du système photovoltaïque :

La Figure 4.1 donne le schéma bloc de notre système photovoltaïque étudié avec l'ensemble des étages simulés : GPV, DC-DC et MPPT

Chapitre 04 : Simulation et évaluation des résultats

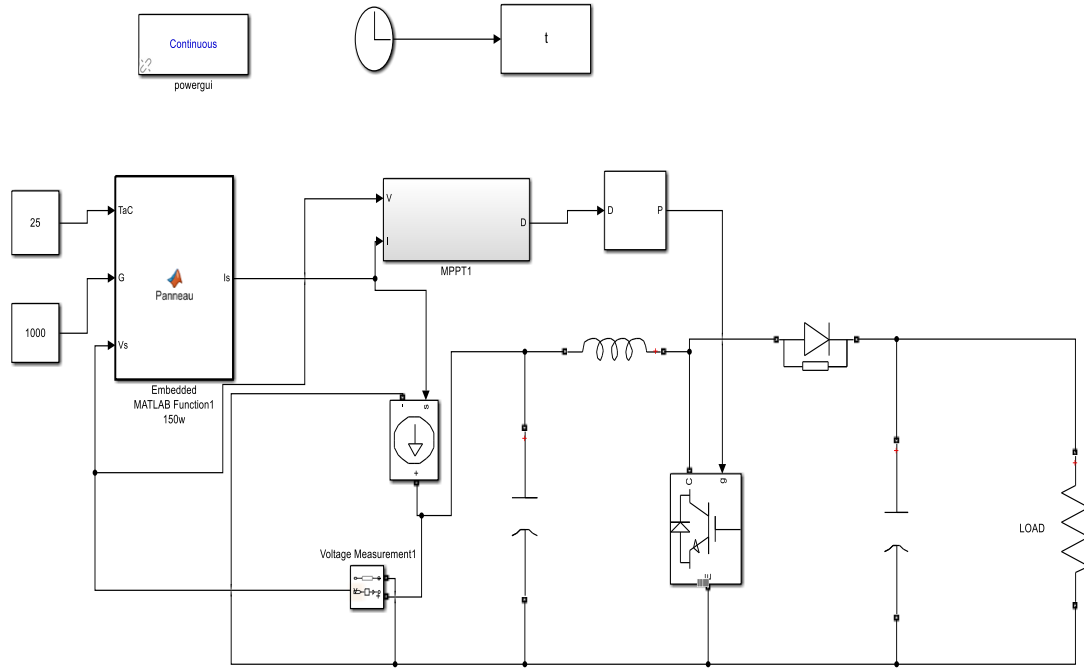


Figure 4.1 schéma bloc du système photovoltaïque avec la commande MPPT.

Tableau 4.1 Caractéristiques électriques du module photovoltaïque BP SX 150.

Paramètre	Valeur
Puissance maximale (P_{max})	150W
Tension à P_{max} (V_{mp})	34.5 V
Courant à P_{max} (I_{mp})	4.35 A
Tension à circuit ouvert (V_{oc})	43.5 V
Courant de court-circuit (I_{sc})	4.75 A
Coefficient de température de $I_{sc}(a)$	$0.065 \pm 0.015\% / C^{\circ}$

Tableau 4.2 Paramètres du hacheur boost.

Paramètres	Valeurs
Inductance L	0.006 H
Capacité C_{pv}	$10e-3$ F
Capacité C_{dc}	$3e-3$ F

Chapitre 04 : Simulation et évaluation des résultats

Tableau 4.3 Paramètres des MPPT méthodes.

Techniques	Paramètres	Valeurs
P and O	Delta D	0.001
FUZZY t1	k1	0.2
	k2	08
	k3	25
FUZZY t2	k1	0.9
	K2	0.4
	k3	67

4.2.1 Simulation de la méthode P and O :

Pour simuler le comportement du MPPT, nous avons utilisé le logiciel Matlab/Simulink en se basant sur la méthode P and O décrit dans le chapitre 2. L'implémentation sous Simulink du modèle mathématique du GPV est illustrée sur la Figure 4.1

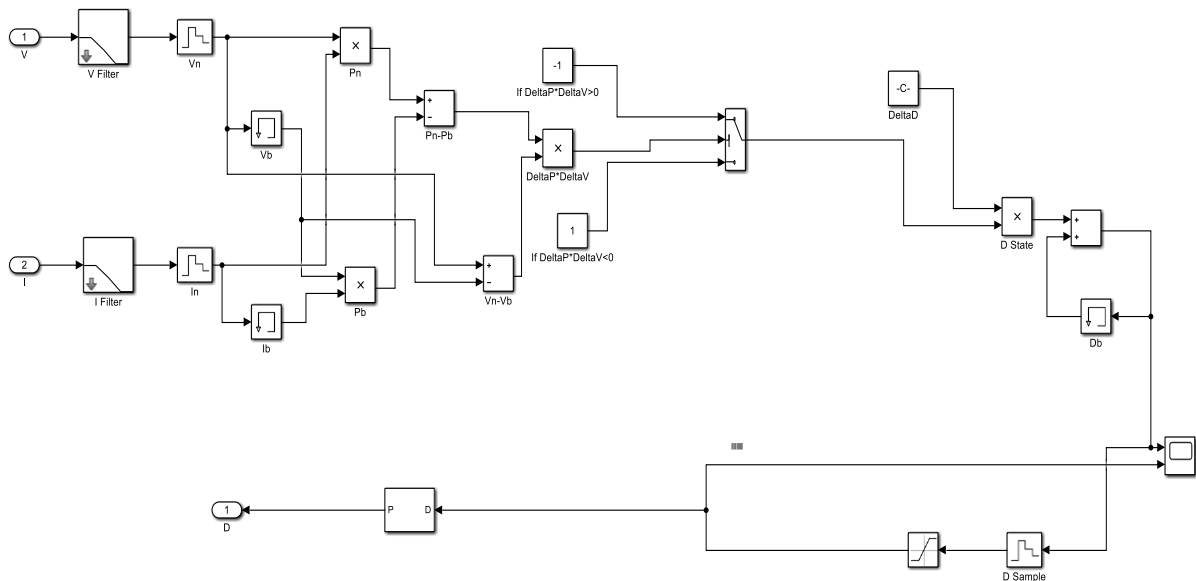


Figure 4.2 schéma bloc de la méthode P and O

- *Premier scénario*

Dans le premier scénario, l'irradiation est fixée (1000 W/m²) et la température est fixée (25 °C).

Chapitre 04 : Simulation et évaluation des résultats

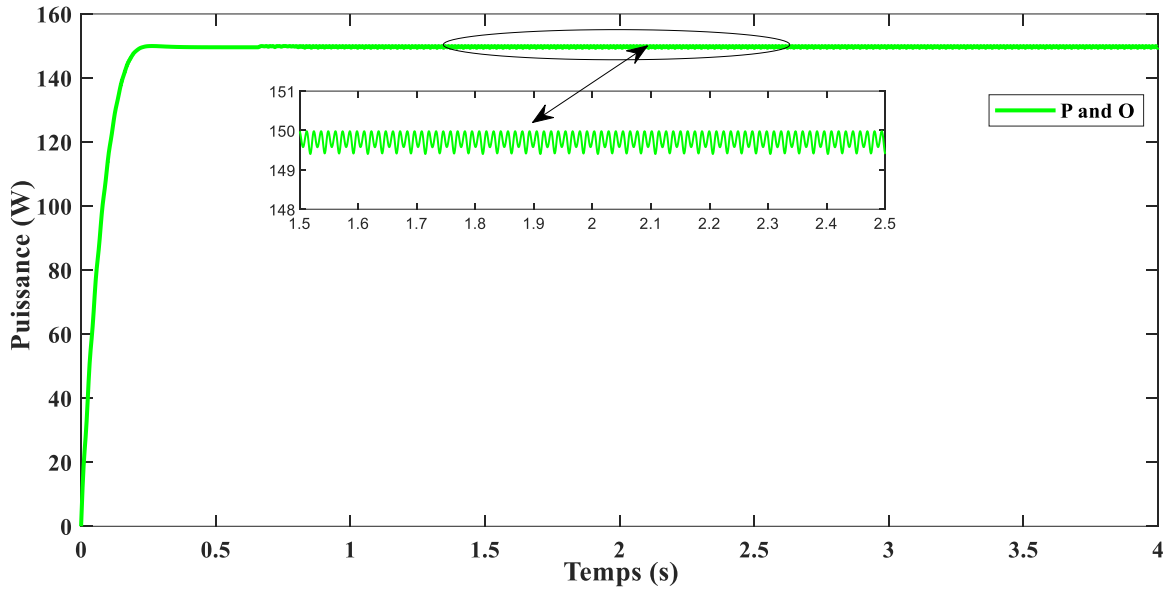


Figure 4.3 allures de puissance sous conditions stables ($G=1000 \text{ W/m}^2$, $T=25\text{C}^\circ$) par la méthode P and O

La figure 4.3 représente l'évolution de la puissance de sortie du générateur photovoltaïque en fonction du temps, lors de l'application de l'algorithme MPPT Perturb and Observe (P&O).

Il est ainsi observé que la puissance augmente rapidement à partir de $t = 0 \text{ s}$ pour atteindre une valeur maximale d'environ 150 W autour de 0,3 secondes. Ce résultat indique une convergence rapide vers le point de puissance maximale (MPP).

Au terme de la phase transitoire, la puissance atteint un état de stabilité caractérisé par de faibles fluctuations autour du MPP (Maximum Power Point), un phénomène qui est l'une des propriétés notables de la méthode P&O (Power and Optimization). Ces oscillations résiduelles sont attribuables au principe même de la méthode, qui s'appuie sur une perturbation continue de la tension afin de suivre le MPP (Maximum Power Point).

Cette réponse permet de conclure que l'algorithme P&O est capable de suivre efficacement le MPP, avec un temps de réponse court. Néanmoins, il a été observé que sa stabilité autour du point optimal est légèrement affectée par les oscillations dynamiques.

- *Deuxième scénario*

Dans le deuxième scénario, l'irradiation est variable en quatre étapes (1000, 700, 450 et 1000 W/m^2) et la température est fixée (25 $^\circ\text{C}$).

Chapitre 04 : Simulation et évaluation des résultats

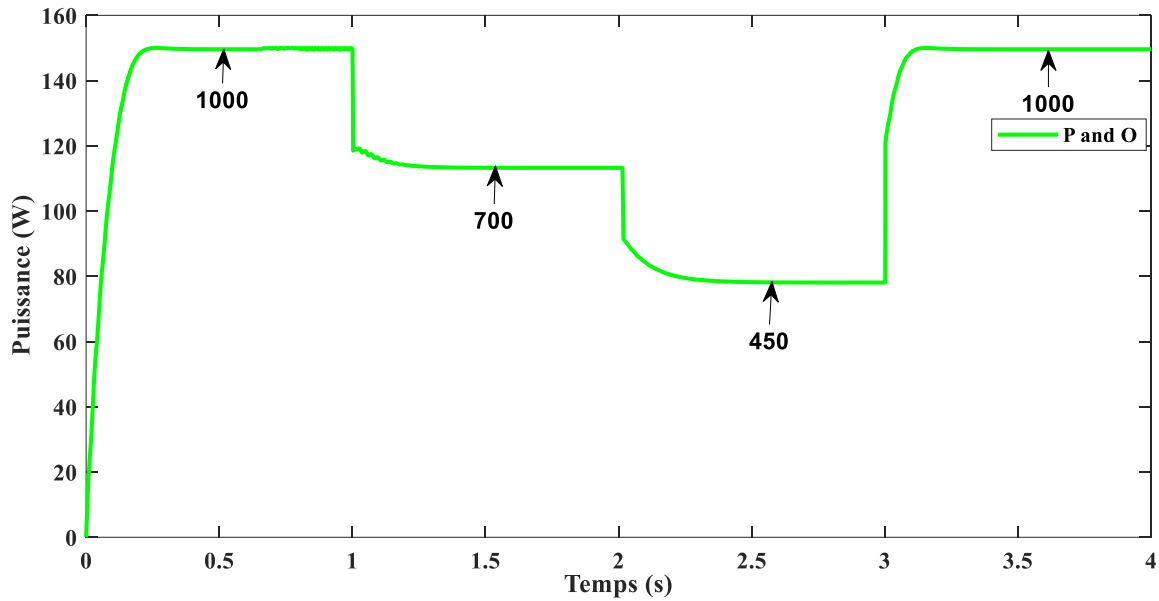


Figure 4.4 allures de puissance sous conditions d'irradiation variable par la méthode *P and O*

La figure 4.4 illustre l'évolution de la puissance de sortie du générateur photovoltaïque en fonction du temps, sous l'effet de changements progressifs de l'irradiation solaire, lors de l'utilisation de la méthode MPPT Perturb and Observe (P&O).

L'analyse met en exergue l'existence de trois niveaux d'irradiation successifs, appliqués à des instants prédéterminés.

- La puissance de 1000 W/m² est atteinte entre 0 et 1,2 s.
- La puissance de 700 watts par mètre carré est atteinte entre 1,2 et 2,2 secondes.
- La puissance de 450 watts par mètre carré est atteinte entre 2,2 et 3,2 secondes.
- Il est observé un retour à 1000 W/m² après 3,2 secondes.

À chaque transition, une augmentation ou une diminution rapide de la puissance est observée, ce qui correspond à l'adaptation du système à la nouvelle condition d'irradiation.

La méthode P&O démontre une capacité de suivi dynamique du MPP, avec un temps de réponse relativement court après chaque variation. Néanmoins, de subtiles variations persistent autour des nouveaux points de puissance maximale, caractéristique commune à la méthode P&O.

En outre, lorsque l'irradiation atteint 1000 W/m², la puissance se réajuste avec promptitude pour retourner à sa valeur initiale, validant ainsi la réversibilité et la robustesse de l'algorithme dans un contexte dynamique.

Chapitre 04 : Simulation et évaluation des résultats

- *Troisième scénario*

Dans le troisième scénario, la température est variable en quatre étapes (25, 50, 75 et 25 °C) et l'irradiation est fixée (1000 W/m²).

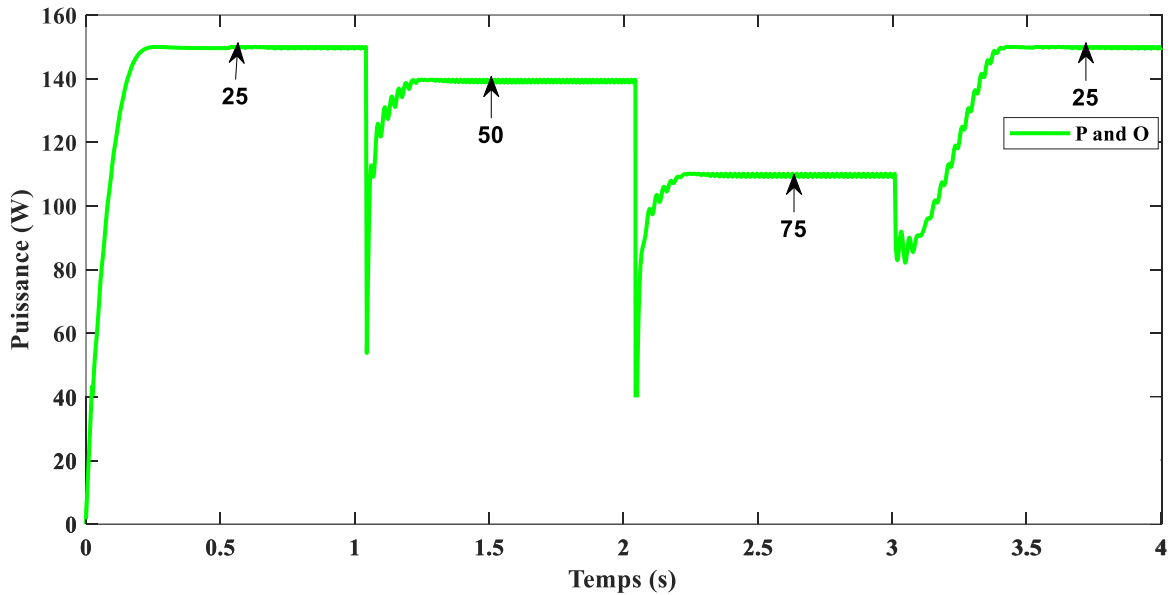


Figure 4.5 allures des puissances sous conditions d'irradiation variable par la méthode *P and O*

La figure ci-dessus illustre l'évolution de la puissance en fonction du temps pour un système utilisant l'algorithme P&O (Perturb and Observe), couramment appliqué dans les systèmes de suivi du point de puissance maximale (MPPT) pour les sources d'énergie renouvelable telles que les panneaux photovoltaïques.

La figure 1 présente l'évolution de la puissance de sortie, en watts, en fonction du temps, en secondes, d'un système photovoltaïque soumis à des variations de température. Ce système est contrôlé par l'algorithme MPPT de type P&O (Perturb and Observe).

L'analyse met en évidence trois étapes de variation de température, clairement identifiées à environ 1 seconde, 2 secondes et 3 secondes, et marquées par les annotations « 25 », « 50 » et « 75 », qui représentent probablement les températures en degrés Celsius. Ces changements induisent des modifications notables sur la puissance générée :

- Il a été observé qu'à une seconde près, lorsque la température subit une augmentation de 25 à 50 degrés Celsius, une baisse modérée de la puissance est enregistrée. Cette observation s'explique par le fait que l'augmentation de la température entraîne une diminution de la tension de sortie des cellules photovoltaïques, ce qui se traduit par une réduction de la puissance générée, malgré un courant qui peut demeurer inchangé.

Chapitre 04 : Simulation et évaluation des résultats

- Il a été observé qu'à une température initiale de 2 degrés Celsius, une augmentation significative de la température jusqu'à 75 degrés Celsius entraîne une diminution notable de la puissance des modules photovoltaïques. Cette observation met en évidence l'impact substantiel de la température sur les performances des modules PV. Cependant, le système retrouve progressivement un nouveau point de fonctionnement, démontrant l'efficacité de l'algorithme P&O dans le suivi du MPPT même en conditions thermiques extrêmes.
- Il est important de noter que, à environ trois secondes, la température chute à 25 °C.

Cette variation thermique induit une augmentation rapide de la puissance, qui se stabilise à environ 150 W. Ces observations valident la thèse d'une sensibilité du système à la température, ainsi que d'une récupération des performances à température modérée.

En résumé, cette figure met en exergue l'effet inversement proportionnel de la température sur la puissance de sortie d'un système photovoltaïque, tout en démontrant la capacité de l'algorithme P&O à s'adapter de manière dynamique aux variations thermiques afin de maximiser la puissance extraite.

4.2.2 Simulation de la méthode floue type 1 :

Cette figure met en exergue l'effet inversement proportionnel de la température sur la puissance de sortie d'un système photovoltaïque, tout en démontrant la capacité de l'algorithme P&O à s'adapter de manière dynamique aux variations thermiques afin de maximiser la puissance extraite.

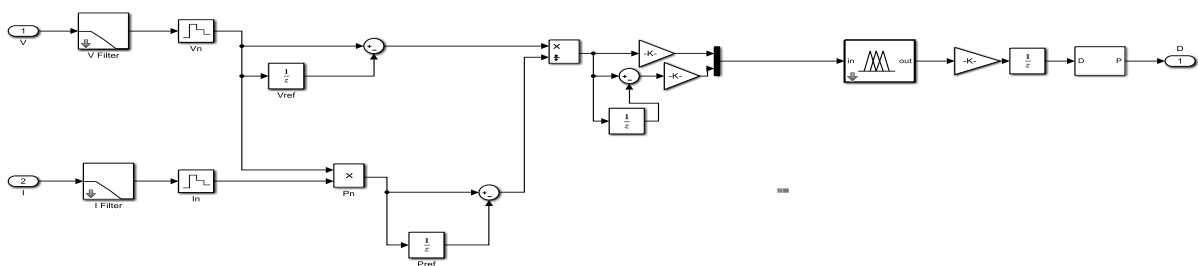


Figure 4.6 schéma bloc de la méthode de la logique floue type 1

Chapitre 04 : Simulation et évaluation des résultats

- *Premier scénario*

Dans le premier scénario, l'irradiation est fixée (1000 W/m^2) et la température est fixée ($25 \text{ }^\circ\text{C}$).

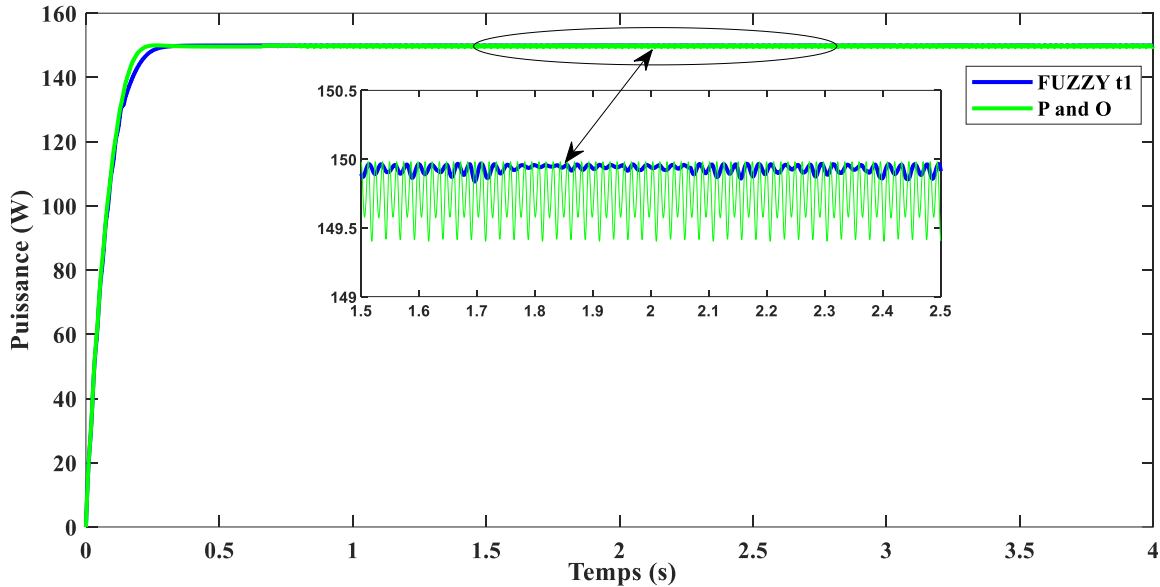


Figure 4.7 allures de puissance sous conditions stables ($G=1000 \text{ W/m}^2$, $T=25\text{C}^\circ$) par la méthode de la logique floue type 1 avec P and O

La figure 4.7 représente la variation de la puissance de sortie du générateur photovoltaïque en fonction du temps, en présence du contrôleur MPPT floue de type 1.

Il est à noter que la puissance augmente de manière exponentielle dès $t = 0 \text{ s}$, pour atteindre le point de puissance maximale (MPP) autour de $0,2 \text{ s}$, ce qui démontre un temps de réponse extrêmement court. Au terme de la phase transitoire, la puissance demeure pratiquement constante, avec de faibles fluctuations autour de la valeur maximale ($\sim 150 \text{ W}$).

L'encadré de la figure (zoom) permet de mettre en évidence les oscillations de faible amplitude, caractéristiques du comportement flou, mais nettement réduites par rapport à la méthode P&O. Cette observation met en exergue la supériorité du floue type 1 en termes de stabilité et de précision, notamment dans des conditions d'irradiation constantes.

Dans l'ensemble, cette approche se révèle efficace et fluide dans le cadre du suivi du MPP. Elle se caractérise par une stabilité accrue et une diminution des pertes par oscillation, ce qui en fait une option digne d'intérêt par rapport aux méthodes conventionnelles.

Chapitre 04 : Simulation et évaluation des résultats

- *Deuxième scénario*

Dans le deuxième scénario, l'irradiation est variable en quatre étapes (1000, 700, 450 et 1000 W/m²) et la température est fixée (25 °C).

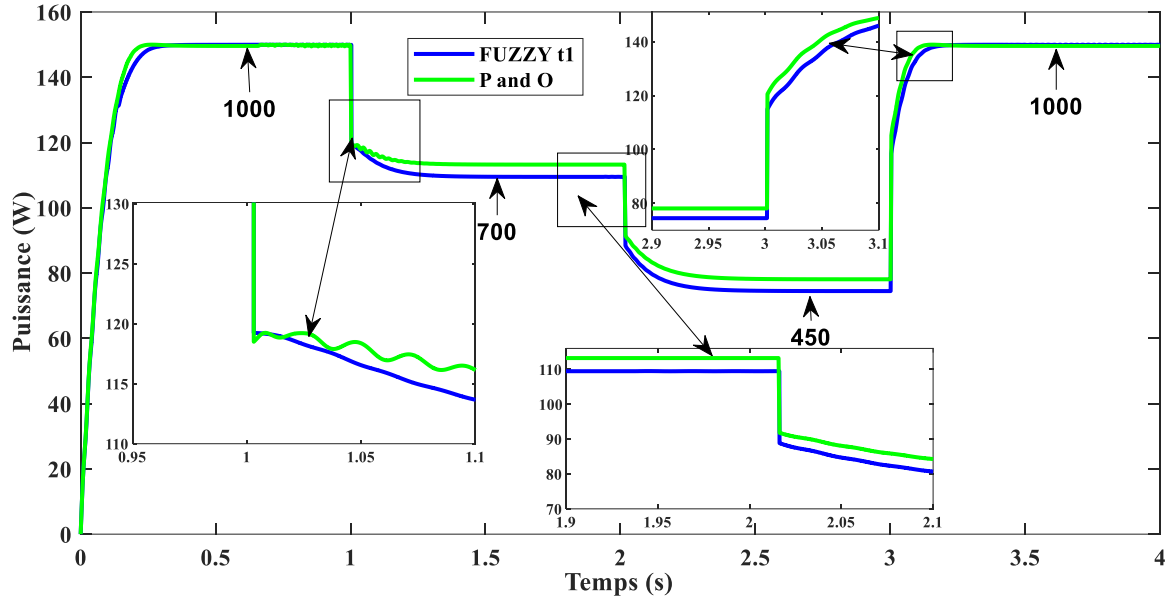


Figure 4.8 allures des puissances sous conditions d'irradiation variable par la méthode de la logique floue type 1 avec P and O

La figure 4.8 représente l'évolution de la puissance de sortie d'un générateur photovoltaïque en fonction du temps, en réponse à des variations successives de l'irradiation solaire, lors de l'utilisation d'un algorithme de commande floue (FUZZY). Les paliers d'irradiation appliqués sont les suivants :

- La puissance de 1000 W/m² est atteinte entre 0 et 1,2 s.
- La puissance de 700 watts par mètre carré est atteinte entre 1,2 et 2,2 secondes.
- La puissance de 450 watts par mètre carré est atteinte entre 2,2 et 3,2 secondes.
- Il est observé un retour à 1000 W/m² après 3,2 secondes.

Il est important de noter que chaque changement dans le niveau d'irradiation entraîne une variation nette de la puissance délivrée, suivie d'une stabilisation rapide. Le modèle de contrôleur flou démontre une bonne réactivité, avec un temps de réponse réduit et sans dépassement important. La transition entre les différents niveaux de puissance s'effectue de manière fluide, sans oscillations notables, ce qui atteste de la stabilité du système.

En effet, la commande floue, par rapport aux méthodes classiques telles que la P&O, présente l'avantage notable de réduire significativement les fluctuations autour du point de

Chapitre 04 : Simulation et évaluation des résultats

puissance maximale (MPP), garantissant ainsi un fonctionnement plus stable et efficace. Cette propriété est particulièrement manifeste durant les phases transitoires, au cours desquelles la puissance atteint rapidement sa nouvelle valeur sans instabilité majeure.

En outre, le retour à 1000 W/m² après 3,2 secondes illustre la capacité du système à retrouver son point de fonctionnement initial avec précision. Cette observation valide la robustesse et l'adaptabilité de la stratégie floue face aux variations environnementales.

- *Troisième scénario*

Dans le troisième scénario, la température est variable en quatre étapes (25, 50, 75 et 25 °C) et l'irradiation est fixée (1000 W/m²).

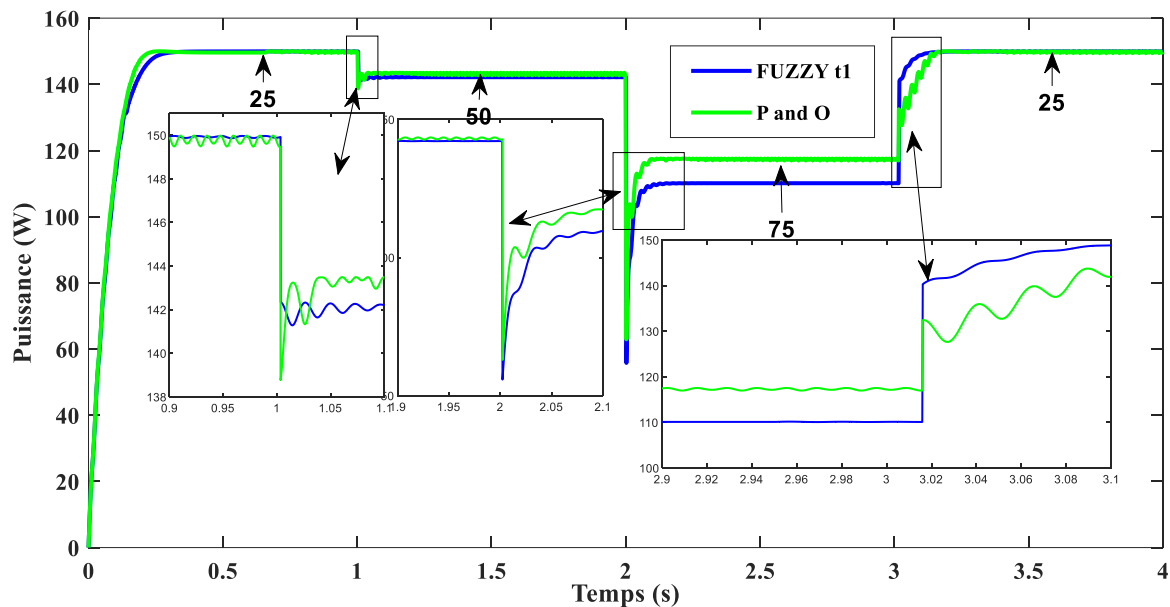


Figure 4.9 allures des puissances sous conditions de la température variable par la méthode de la logique floue type 1 avec P and O

La figure 4.9 illustre l'évolution de la puissance de sortie d'un système photovoltaïque en fonction du temps, avec l'implémentation d'un contrôleur MPPT de type de la logique floue (FLC), identifié ici par la légende « floue t1 ». Les variations de température, notées 25 °C, 50 °C, 75 °C et 25 °C, sont appliquées respectivement à environ 1 seconde, 2 secondes et 3 secondes.

L'analyse du comportement dynamique permet de mettre en exergue plusieurs points d'importance :

Chapitre 04 : Simulation et évaluation des résultats

- Il est observé une stabilité initiale, dont la durée s'étend de 0 à 1 seconde. Il est à noter que le système atteint rapidement une puissance maximale avoisinant les 150 W pour une température initiale de 25 °C. Cette augmentation rapide et sans fluctuation notable indique une performance transitoire satisfaisante du contrôleur flou.
- Il est à noter que la variation de température à 50 °C (environ 1 seconde) est une donnée pertinente pour la recherche. L'élévation de la température induit une diminution modeste de la puissance, validant ainsi la corrélation négative entre la tension PV et la température. Le système se caractérise par une réactivité optimale et une stabilisation de la puissance à un niveau proche de 140 W, avec une faible occurrence d'oscillations.
- Il a été observé que l'augmentation à 75 °C (environ 2 s) entraîne des résultats significatifs. Cette perturbation thermique significative induit une diminution de la puissance évaluée à environ 110 W. Le contrôleur flou parvient à retrouver un nouveau point de fonctionnement stable rapidement, ce qui démontre sa robustesse et sa capacité d'adaptation en conditions sévères.
- Le retour à la température de 25 °C s'effectue en approximativement 3 secondes. Le système se caractérise par une réactivité immédiate à la baisse de température, ce qui se traduit par un retour de la puissance à son niveau initial (~150 W). Cette capacité à rétablir l'équilibre de manière quasi instantanée, sans générer de délais ou d'oscillations, atteste d'une réponse dynamique remarquable.

En effet, comparée aux méthodes conventionnelles telles que le P&O, la méthode du contrôleur flou présente des avantages notables, à savoir : une réduction des oscillations autour du point de puissance maximale, une meilleure stabilité en régime permanent et une rapidité de convergence. Ces performances sont d'autant plus notables dans un contexte de variations des conditions environnementales, telles que les fluctuations de température.

4.2.3 Simulation de la méthode floue type 2 :

Pour simuler le comportement du MPPT, nous avons utilisé le logiciel Matlab/Simulink en se basant sur la méthode floue type 2 décrit dans le chapitre 3 et exemple 4 et exemple 5. L'implémentation sous Simulink du modèle mathématique du GPV est illustrée sur la Figure 4.1

Chapitre 04 : Simulation et évaluation des résultats

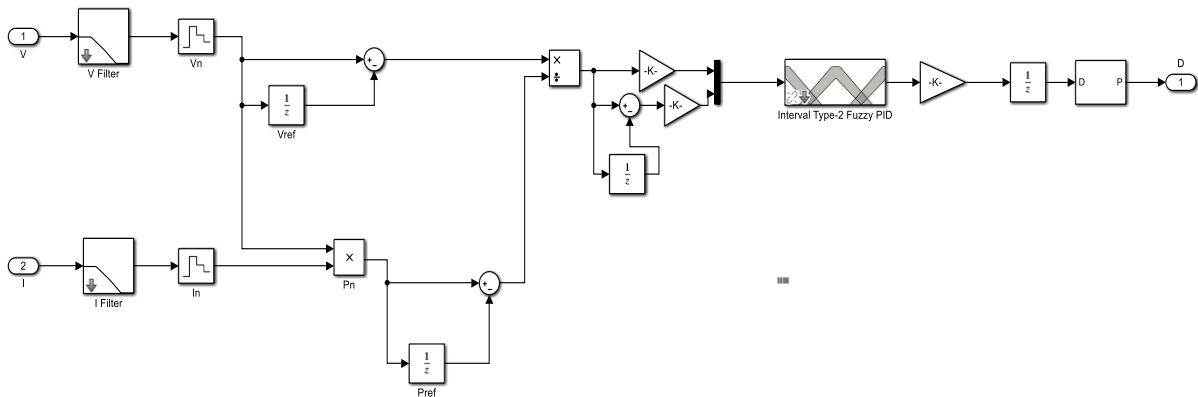


Figure 4.10 schéma bloc de la méthode de la logique floue type 2

- *Premier scénario*

Dans le premier scénario, l'irradiation est fixée (1000 W/m^2) et la température est fixée ($25 \text{ }^\circ\text{C}$).

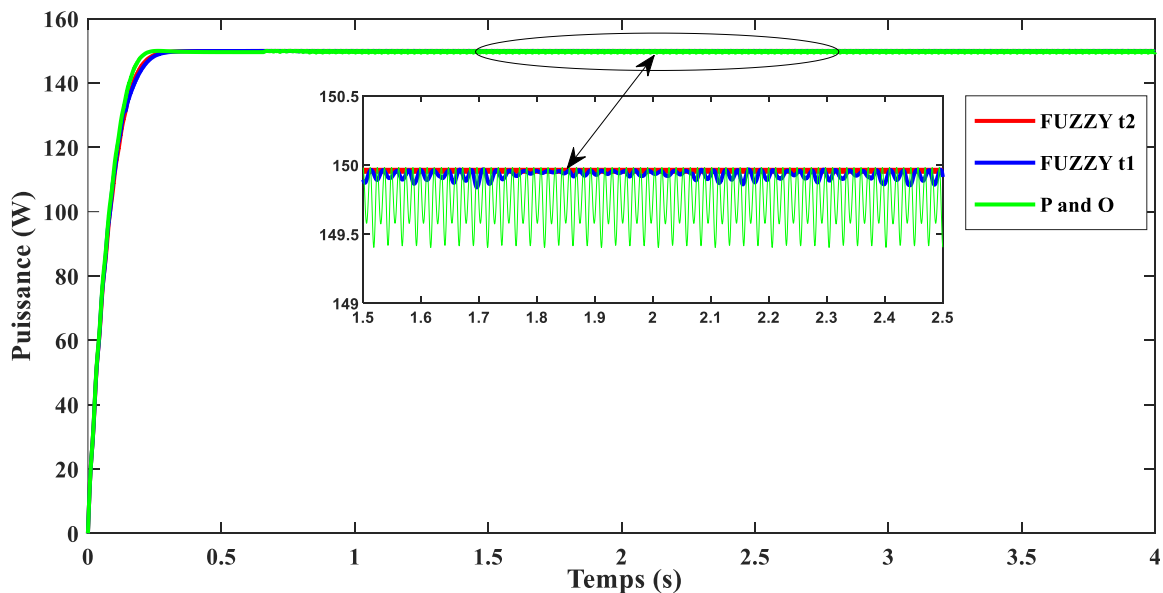


Figure 4.11 allures des puissances sous conditions stables ($G=1000 \text{ W/m}^2$, $T=25\text{C}^\circ$) par les trois méthodes

Dans le cadre de cette étude, nous allons procéder à une comparaison de la réponse en puissance de trois stratégies de commande. Ces dernières sont les suivantes : la première est dite « floue t2 », la deuxième est dite « floue t1 » et la troisième est une commande classique

Chapitre 04 : Simulation et évaluation des résultats

dite « P &O ». L'objectif de cette étude est d'évaluer la performance de ces méthodes en matière de suivi d'une consigne de puissance de 150 watts.

Il est à noter que :

Il ressort de l'analyse que les trois commandes permettent d'atteindre la consigne avec une montée rapide, le temps de réponse étant inférieur à 0,5 seconde. Ce résultat témoigne d'une bonne réactivité initiale.

Dans le cadre de l'analyse des données, il a été observé que les courbes floue t2 (rouge) et floue t1 (bleu) atteignent la puissance cible de manière très fluide. En effet, les résultats montrent un dépassement quasi inexistant et une excellente stabilité en régime permanent.

Par ailleurs, il a été observé que la commande P&O (verte) affiche une oscillation persistante autour de la consigne. Cette propriété est une caractéristique intrinsèque de la méthode basée sur un algorithme par perturbation. Ces fluctuations sont mises en exergue par le zoom situé dans la partie supérieure droite de la figure, avec une amplitude d'environ $\pm 0,2$ W autour de 150 W.

Cette observation met en exergue les limites de la commande P&O, malgré sa simplicité apparente, qui engendre des fluctuations permanentes préjudiciables à l'efficacité énergétique et à la stabilité du système, notamment dans le cadre d'applications sensibles.

En comparaison, les commandes floues t1 et t2 offrent une meilleure précision et moins de ripples, ce qui les rend plus adaptées aux environnements exigeant une régulation fine.

- *Deuxième scénario*

Dans le deuxième scénario, l'irradiation est variable en quatre étapes (1000, 700, 450 et 1000 W/m²) et la température est fixée (25 °C).

Chapitre 04 : Simulation et évaluation des résultats

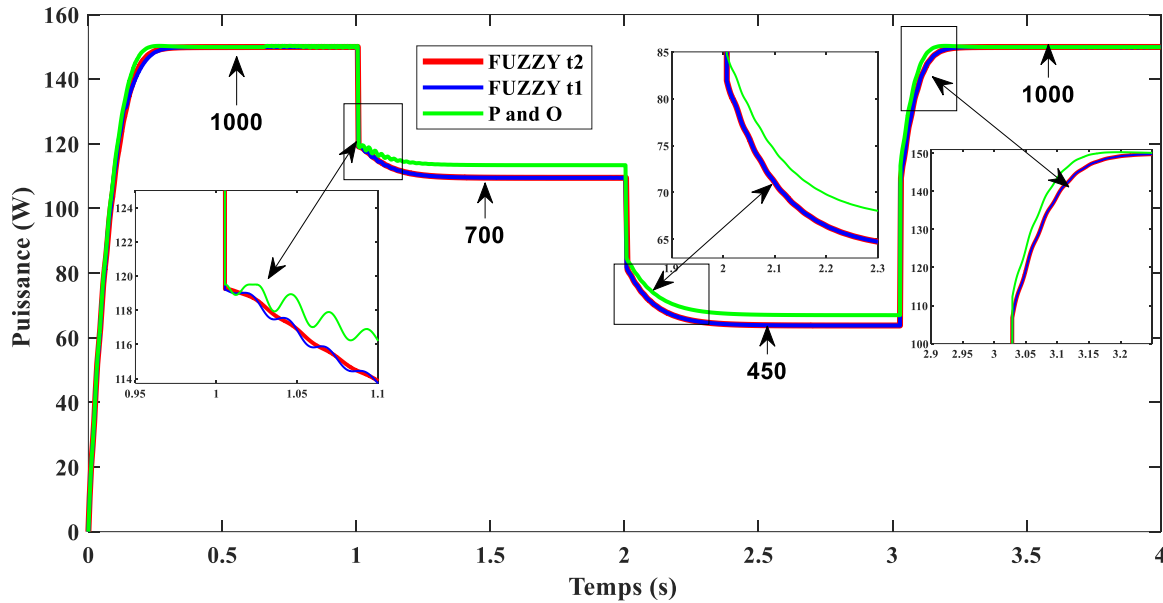


Figure 4.12 allures des puissances sous conditions d'irradiation variable par les trois méthodes

Dans le cadre de cette étude, nous avons procédé à une analyse comparative de la puissance de sortie, exprimée en watts (W), en fonction du temps, mesuré en secondes, pour trois algorithmes de suivi du point de puissance maximale (MPPT). Les algorithmes étudiés sont les suivants : floue t1, floue t2 et P&O. L'étude de l'évolution de la puissance est réalisée en variant les conditions d'ensoleillement, avec des valeurs de 1 000 W/m², 800 W/m², 600 W/m², et enfin une reconduction à 1 000 W/m².

Dans un premier temps, il est observé que les trois méthodes étudiées permettent une augmentation rapide de la puissance jusqu'à une valeur stable avoisinant les 150 W lorsque l'irradiance est de 1 000 W/m².

Il a été observé qu'à partir d'un certain seuil de temps, correspondant à une durée d'environ une seconde, une diminution de l'irradiance à une valeur de 700 watts par mètre carré entraîne une réduction immédiate de la puissance. Les trois méthodes mentionnées précédemment réagissent à ce changement, mais il a été observé que floue t2 (courbe rouge) présente une transition plus douce, avec une réponse plus rapide et moins d'oscillations que les autres méthodes.

Une nouvelle diminution de l'irradiance à 450 watts par mètre carré, sur une durée d'environ deux secondes, révèle une réponse comparable. Dans le cadre de cette étude, nous avons pu constater que floue t2 continue de surpasser légèrement les autres algorithmes en termes de stabilité et de rapidité à retrouver le nouveau point de puissance maximale.

Chapitre 04 : Simulation et évaluation des résultats

En définitive, lorsque l'irradiance est égale à $1\ 000\ \text{W/m}^2$ (vers $t \approx 3\ \text{s}$), FUZZY t2 récupère avec célérité la puissance maximale, validant ainsi sa robustesse et sa capacité d'adaptation rapide. Le dispositif de zoom intégré à la figure permet de faciliter la visualisation des performances dynamiques de chaque méthode lors des transitions.

Cette figure met en exergue l'efficacité supérieure du contrôleur flou t2 par rapport au contrôleur flou t1 et à l'algorithme P&O, notamment en termes de vitesse de convergence, de stabilité et de réponse transitoire face aux variations d'ensoleillement.

- *Troisième scénario*

Dans le troisième scénario, la température est variable en quatre étapes (25, 50, 75 et 25 °C) et l'irradiance est fixée ($1000\ \text{W/m}^2$).

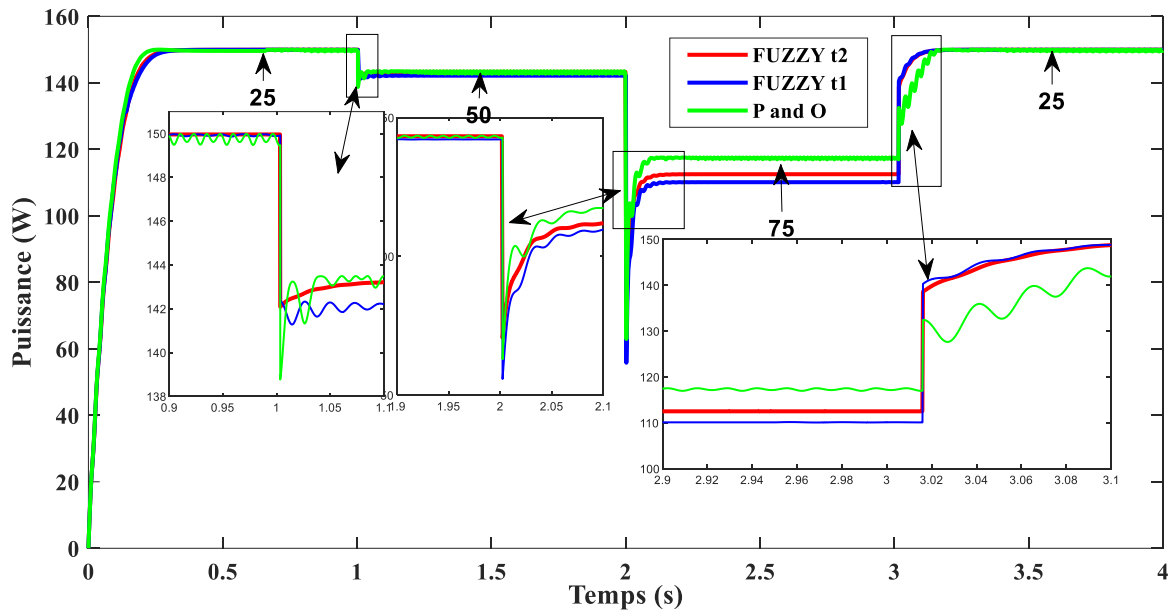


Figure 4.13 allures des puissances sous conditions de la température variable par les trois méthodes

La figure ci-dessus illustre l'évolution de la puissance de sortie (en watts) obtenue à l'aide de trois algorithmes MPPT différents : Dans le cadre de cette étude, nous avons mis en œuvre un protocole expérimental impliquant les systèmes P&O, la logique floue type 1 et la logique floue type 2. Ce protocole s'inscrit dans un scénario où la température subit une variation en quatre étapes distinctes (25°C, 50°C, 75°C, puis retour à 25°C), tandis que l'irradiance demeure constante.

Il a été observé que tous les algorithmes sont capables de suivre le point de puissance maximale (MPPT), bien que leurs performances en termes de stabilité et de rapidité puissent

Chapitre 04 : Simulation et évaluation des résultats

varier. À la température initiale de 25 °C, les trois méthodes atteignent une puissance proche de 150 W. Lors de l'augmentation graduelle de la température, initialement à 50°C puis à 75°C, une diminution de la puissance maximale est observée. Ce résultat est en accord avec les prévisions concernant le comportement des panneaux photovoltaïques, où une hausse de la température conduit à une baisse de la puissance de sortie.

Les encadrés zoomés offrent une visualisation améliorée des variations entre les algorithmes lors des transitions de température. Il en ressort que l'algorithme floue t2 offre une réponse plus stable et moins oscillatoire, en particulier lors du retour à 25°C (vers 3 secondes). L'analyse des résultats montre que floue t1 présente des performances supérieures à celles de l'algorithme P&O. En effet, ce dernier présente des oscillations plus marquées et une convergence plus lente.

Cette simulation démontre ainsi l'avantage des approches fondées sur la logique floue, notamment le type 2, pour la détermination du point de puissance maximale dans des conditions de température variable.

4.3 Conclusion :

Cette étude a permis d'évaluer et de comparer les performances de trois techniques de suivi du point de puissance maximale (MPPT) — à savoir P&O, floue t1, et floue t2 — dans trois scénarios environnementaux distincts :

- *Scénario 1 : Irradiation et température fixes*

Dans un environnement stable, où l'irradiation et la température sont constantes, les trois méthodes convergent efficacement vers le point de puissance maximale (MPP). Toutefois :

- P&O montre de légères oscillations autour du MPP dues à sa nature perturbative.
- floue t1 et t2 présentent un comportement plus stable avec une réduction significative des oscillations, grâce à leur logique de décision adaptative.
- floue t2 montre une légère supériorité en termes de temps de réponse plus rapide et régime permanent plus stable.

Conclusion : Dans des conditions stables, les contrôleurs flous surpassent P&O en termes de stabilité, avec un avantage pour floue t2.

Chapitre 04 : Simulation et évaluation des résultats

- *Scénario 2 : Irradiation variable et température fixe*

Lorsque l'irradiation varie brusquement (comme cela peut se produire avec des passages nuageux), les performances dynamiques deviennent critiques :

- P&O souffre d'un temps de réponse plus lent et présente des pertes transitoires plus marquées lors des changements d'irradiation.
- floue t1 réagit plus rapidement aux variations, avec un recalage du MPP plus fluide.
- floue t2 montre la meilleure performance, en minimisant les perturbations et en rétablissant rapidement la puissance maximale, ce qui le rend particulièrement adapté à des environnements instables.

Conclusion : En condition d'irradiation variable, floue t2 offre une réactivité et une stabilité supérieures, suivi de près par floue t1, tandis que P&O devient moins performant.

- *Scénario 3 : Température variable et irradiation fixe*

Dans ce scénario, la température varie tandis que l'irradiation reste constante, ce qui affecte la tension de sortie des panneaux PV :

- P&O s'adapte difficilement aux variations rapides de température, avec des pertes de puissance transitoires et une lente récupération.
- floue t1 montre une bonne capacité d'adaptation, réduisant les effets négatifs des variations thermiques.
- floue t2 se distingue à nouveau par sa rapidité de stabilisation et sa robustesse même lors de variations thermiques importantes (ex. passage à 50 °C).

Conclusion : Face à la température variable, floue t2 conserve la meilleure stabilité et précision, confirmant sa supériorité globale. floue t1 reste performant, alors que P&O montre ses limites.

Chapitre 04 : Simulation et évaluation des résultats

Sur l'ensemble des scénarios, les résultats démontrent clairement que les méthodes basées sur la logique floue (floue t1 et t2) surpassent la méthode P&O en termes de rapidité de convergence, stabilité en régime permanent, et robustesse face aux perturbations. floue t2, en particulier, offre la meilleure performance globale, ce qui en fait un excellent candidat pour des applications photovoltaïques en environnements dynamiques et changeants.

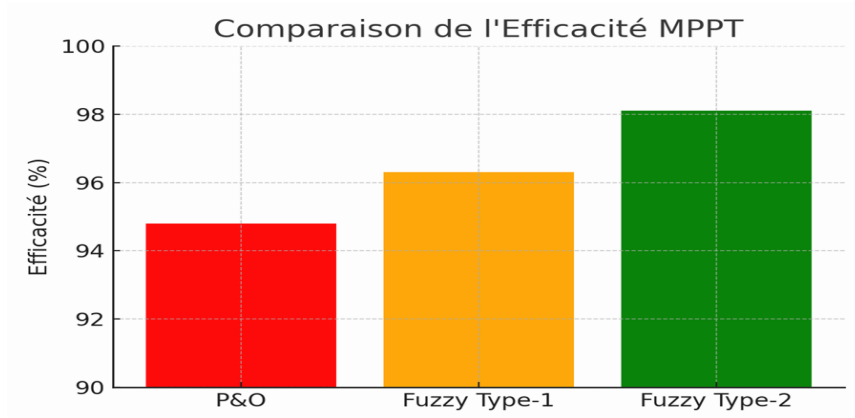


Figure 4.17 Comparaison de l'efficacité des méthodes du MPPT

Conclusion générale

Conclusion générale :

Dans le cadre de cette thèse, une étude comparative a été réalisée sur trois méthodes de suivi du point de puissance maximale (MPPT) dans un système photovoltaïque. Les approches analysées incluent la méthode classique P&O (Perturb and Observe), ainsi que les logiques floues de type 1 et de type 2. Ces approches ont été analysées en profondeur dans le cadre de cette étude visant à optimiser l'extraction de l'énergie solaire, en tenant compte des fluctuations de l'ensoleillement et des variations de température.

Premièrement, une exposition des principes fondamentaux de la conversion photovoltaïque a été présentée. Dans un second temps, chaque méthode de MPPT a été mise en œuvre, puis des simulations ont été réalisées afin d'évaluer leurs performances respectives. Les résultats de cette étude permettent de tirer les conclusions suivantes :

La méthode P&O, malgré son aspect simple et sa facilité d'implémentation, est sujette à des fluctuations autour de sa puissance maximale et manifeste une sensibilité notable aux variations climatiques rapides.

La commande floue de type 1 présente l'avantage d'une meilleure adaptabilité et d'une réduction significative des oscillations, avec des performances supérieures en conditions dynamiques par rapport à la méthode P&O.

La commande floue de type 2, qui se distingue par son niveau de sophistication supérieur, permet une gestion plus fine de l'incertitude et du flou inhérents aux données d'entrée. Cette avancée se traduit par une amélioration notable de la robustesse et de la stabilité du système, notamment dans des conditions climatiques extrêmes ou extrêmement variables.

Les résultats obtenus démontrent que l'approche par logique floue, en particulier de type 2, améliore significativement l'efficacité énergétique du système PV. En effet, cette approche permet de maximiser la puissance extraite tout en maintenant une bonne qualité de la commande.

En conclusion, cette étude permet d'envisager plusieurs perspectives, dont les suivantes :

Deuxièmement, nous nous sommes intéressés à l'intégration de ces techniques MPPT (Maximum Power Point Tracking) dans des systèmes hybrides PV-batterie ou PV-SMES (système hybride photovoltaïque-batterie).

Cette étude à également exploré, nous nous penchons sur l'implémentation en temps réel sur des plateformes embarquées.

Dans le cadre de cette étude, une approche novatrice est proposée, combinant des méthodes d'intelligence artificielle telles que la logique floue, les réseaux de neurones ou les algorithmes d'optimisation pour la conception de systèmes adaptatifs.

En effet, cette thèse s'inscrit dans une démarche d'amélioration de l'efficacité des systèmes photovoltaïques et de promotion de l'intégration des énergies renouvelables dans le réseau électrique.

Références Bibliographiques

- [1]: Nzotcha, U., Kenfack, J., & Manjia, M. B. (2019). Integrated multi-criteria decision making methodology for pumped hydro-energy storage plant site selection from a sustainable development perspective with an application. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 112, 930-947.
- [2] : Abdelkader, S., & Radhwane, Z. Commande par mode glissant des systèmes photovoltaïques.
- [3]: Kenfack, J., Bossou, O. V., Voufo, J., Djom, S., & Crettenand, N. (2016). New renewable energy promotion approach for rural electrification in Cameroon. In *Renewable Energy in the Service of Mankind Vol II: Selected Topics from the World Renewable Energy Congress WREC 2014* (pp. 429-442). Springer International Publishing.
- [4] : Kenfack, J., Bossou, O. V., Voufo, J., & Djom, S. (2014). Addressing the current remote area electrification problems with solar and microhydro systems in Central Africa. *Renewable energy*, 67, 10-19.
- [5] : Di Piazza, M. C., Vitale, G., Di Piazza, M. C., & Vitale, G. (2013). Parameter identification for photovoltaic source models. *Photovoltaic Sources: Modeling and Emulation*, 83-129.
- [6] : Hassan, M. M., Refat, K. H., Baten, M. Z., & Sajjad, R. N. (2022). Energy saving potential of photovoltaic windows: Impact of shading, geography and climate. *Solar Energy*, 240, 342-353.
- [7] : Yang, B., Li, W., Zhao, Y., & He, X. (2009). Design and analysis of a grid-connected photovoltaic power system. *IEEE transactions on power electronics*, 25(4), 992-1000.
- [8] : Khanna, R., Zhang, Q., Stanchina, W. E., Reed, G. F., & Mao, Z. H. (2013). Maximum power point tracking using model reference adaptive control. *IEEE Transactions on power Electronics*, 29(3), 1490-1499.
- [9] : Dorahaki, S. (2015). Evaluating the radiation and temperature effect on photovoltaic systems. *Bulletin of Electrical Engineering and Informatics*, 4(1), 1-6.

- [10] : Kokrdová, B. M. (2011). L'énergie solaire. *mémoire de Master*.
- [11] :Djalab, Aicha. "Diagnosis Of Faults In A Renewable Energy System Based On Artificial Intelligence Techniques: Application On A Photovoltaic System." *Ziane Achour University–Djelfa, This De Doctorate* (2020).
- [12] : Villalva, Marcelo Gradella, Jonas Rafael Gazoli, and Ernesto Ruppert Filho. "Comprehensive approach to modeling and simulation of photovoltaic arrays." *IEEE Transactions on power electronics* 24.5 (2009): 1198-1208.
- [13] :Learreta, Alain Bilbao, Corinne Alonso, and Cedric Cabal. "Réalisation de commandes MPPT numériques." *Report. Tarragona, Spain: Rovira i Virgili University* (2006): 3.
- [14] : Kaabeche, Abdelhamid, et al. "Optimisation d'un système hybride (éolien–photovoltaïque) totalement autonome." *Journal of Renewable Energies* 9.3 (2006): 199-209.
- [15] : Lasnier, France. *Photovoltaic engineering handbook*. Routledge, 2017.
- [16] :Djarallah, Mohamed. *Contribution à l'étude des systèmes photovoltaïques résidentiels couplés au réseau électrique*. Diss. Batna, Université El Hadj Lakhdar. Faculté des sciences de l'ingénieur, 2008.
- [17] : Diaf, S. (2009). *Intégration des systèmes à sources renouvelables d'énergie pour la production décentralisée d'électricité en site isolé* (Doctoral dissertation, Alger, Ecole Nationale Supérieure Polytechnique).
- [18] : M'hamed, Mr BIRAME. *Magister en Électrotechnique*. Diss. Université de Batna, 2003.
- [19] : SAHRAOUI, H. (2017). *Modélisation et commande des convertisseurs DC-DC utilisés dans les systèmes photovoltaïques (théorie et expérimentation)* (Doctoral dissertation, Université de Batna 2).

- [20] : BELGASMI, Zeineb. "Modélisation et contrôle d'un système photovoltaïque connecté à un réseau électrique."
- [21] : Belkaid, Abdelhakim. *onception et implémentation d'une commande MPPT de haute performance pour une chaine de conversion photovoltaïque autonome*. Diss. 2018.
- [22] : Gottschalg, R., Rommel, M., Ineld, D. G., & Ryssel, H. (1997, June). Comparison of different methods for the parameter determination of the solar cell's double exponential equation. In *14th European photovoltaic science and engineering conference (PVSEC), Barcelona, Spain*.
- [23] : Liu, X., & Lopes, L. A. (2004, June). An improved perturbation and observation maximum power point tracking algorithm for PV arrays. In *2004 IEEE 35th Annual Power Electronics Specialists Conference (IEEE Cat. No. 04CH37551)* (Vol. 3, pp. 2005-2010). IEEE.
- [24] : Ait, C., & Salah, M. (2007). *Etude, investigation et conception d'algorithmes de commande appliqués aux systèmes photovoltaïques* (Doctoral dissertation, Ecole Nationale Polytechnique).
- [25] : Boudia, A., Messalti, S., Harrag, A., & Boukhnifer, M. (2021). New hybrid photovoltaic system connected to superconducting magnetic energy storage controlled by PID-fuzzy controller. *Energy Conversion and Management*, 244, 114435.
- [26] : Zadeh, L. A. (1994). Soft computing and fuzzy logic. *IEEE software*, 11(6), 48-56.
- [27] : Mamdani, E. H., & Assilian, S. (1975). An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller. *International journal of man-machine studies*, 7(1), 1-13.
- [28] : Yurkovich, S., & Passino, K. M. (1999). A laboratory course on fuzzy control. *IEEE Transactions on Education*, 42(1), 15-21.
- [29] : Castillo, O. (2012). *Type-2 fuzzy logic in intelligent control applications* (Vol. 272). Heidelberg: Springer.
- [30] : Zadeh, L. A., Klir, G. J., & Yuan, B. (1996). *Fuzzy sets, fuzzy logic, and fuzzy systems: selected papers* (Vol. 6). World scientific.

- [31] : Karnik, N. N., & Mendel, J. M. (1998, May). Introduction to type-2 fuzzy logic systems. In *1998 IEEE international conference on fuzzy systems proceedings. IEEE world congress on computational intelligence (Cat. No. 98CH36228)* (Vol. 2, pp. 915-920). IEEE.
- [32] : Liang, Q., Karnik, N. N., & Mendel, J. M. (2002). Connection admission control in ATM networks using survey-based type-2 fuzzy logic systems. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews)*, 30(3), 329-339.
- [33] : Karnik, N. N., Mendel, J. M., & Liang, Q. (1999). Type-2 fuzzy logic systems. *IEEE transactions on Fuzzy Systems*, 7(6), 643-658.
- [34] : Zadeh, L. A., Klir, G. J., & Yuan, B. (1996). *Fuzzy sets, fuzzy logic, and fuzzy systems: selected papers* (Vol. 6). World scientific.
- [35] : Liang, Q., Karnik, N. N., & Mendel, J. M. (2002). Connection admission control in ATM networks using survey-based type-2 fuzzy logic systems. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews)*, 30(3), 329-339.
- [36] : Kayacan, E. (2011). Interval type-2 fuzzy logic systems: theory and design
- [37] : Karnik, N. N., & Mendel, J. M. (2001). Centroid of a type-2 fuzzy set. *information Sciences*, 132(1-4), 195-220.
- [38] : Boudia, A., Messalti, S., Zeghlache, S., & Harrag, A. (2025). Type-2 fuzzy logic controller-based maximum power point tracking for photovoltaic system. *Electrical Engineering & Electromechanics*, (1), 16-22.
- [39] : Liang, Q., & Mendel, J. M. (2000). Interval type-2 fuzzy logic systems: theory and design. *IEEE Transactions on Fuzzy systems*, 8(5), 535-550.

- [40] : Zerouga H., Gouadria A., Aimeur H., Ziani S., (2023). *Étude d'un système photovoltaïque* (mémoire, Université de m'sila).
- [41] :Boudia A.(2021). *Contribution à l'étude d'un système photovoltaïque connecté au réseau électrique avec un système de stockage à base d'une inductance supraconductrice (SMES)* (Doctoral dissertation, Université de m'sila).
- [42] : Malki S.(2011).*Maximum Power Point Tracking (MPPT) For Photovoltaic System* (magister, Université de M'HAMED BOUGARA BOUMERDES).
- [43] : TAIBI A.(2012). *Implémentation d'un model du convertisseur DC-DC «Buck» sur FPGA appliqué aux systèmes photovoltaïques* (mémoire de master, Université SAAD DAHLAB de BLIDA).
- [44] : SAHRAOUI H.(2016). *Modélisation Et Commande Des Convertisseurs DC-DC Utilisés Dans Les Systèmes Photovoltaïques (Théorie et Expérimentation)* (Doctoral dissertation, Université de Batna 2).
- [45] : SALAH MOHAMED A.(2007). *Etude, Investigation et conception d'algorithmes de commande appliqués aux systèmes photovoltaïques* (Doctoral dissertation, Ecole Nationale Polytechnique).
- [46] : MOKHTARI M., BAGHDADI Z.(2020). *Commande Non Linéaire D'un Système Hydraulique à Réservoirs Couplés (CE105)* (mémoire de master, Université de MOHAMED BOUDIAF - M'SILA).
- [47] : ZAIDI T.(2014). *COMMANDE FLOUE D'UN SIMULATEUR D'HELICOPTERE TRMS* (mémoire de master, Université de m'sila).
- [48] : SALID k.,AZZOUZ S.(2017). *La commande par logique floue* (mémoire de master, Université 8 Mai 1945 Guelma).
- [49] : AGUENI K., BEZOUH A.(2021). *Optimisation de la commande MPPT par les algorithmes compacts* (mémoire de master, Université A MIRA-BEJAIA).

RÉSUMÉ :

L'efficacité des systèmes photovoltaïques (PV) dépend fortement de leur capacité à fonctionner au point de puissance maximale (MPP), malgré les variations constantes des conditions environnementales telles que l'irradiance et la température. Les algorithmes classiques de suivi du point de puissance maximale (MPPT) présentent souvent des limites en termes de rapidité de réponse, de précision et de stabilité. Dans ce travail, nous proposons une méthode optimisée de MPPT basée sur un contrôleur flou de type 2 (Interval Type-2 Fuzzy Logic Controller – IT2FLC), capable de mieux gérer les incertitudes et les non-linéarités du système.

Le contrôleur conçu ajuste dynamiquement le rapport cyclique d'un convertisseur DC-DC pour assurer un fonctionnement optimal en permanence au niveau du MPP. L'optimisation des paramètres du système flou est réalisée à l'aide d'algorithmes méta-heuristiques avancés, permettant d'améliorer la précision et la vitesse de convergence. Les résultats de simulation montrent que la méthode proposée surpasse les approches classiques, telles que le contrôleur flou de type 1 et la méthode Perturb & Observe, en termes d'efficacité de suivi, rapidité de réponse et de robustesse.

Cette étude met en évidence le potentiel de la logique floue de type 2 pour un MPPT fiable et performant dans les systèmes photovoltaïques, avec une application prometteuse dans le domaine des énergies renouvelables.

Mots-clés : Suivi du Point de Puissance Maximale, Systèmes Photovoltaïques, Logique Floue de Type 2, Optimisation, Énergies Renouvelables.

Abstract:

the efficiency of photovoltaic (PV) systems strongly depends on their ability to operate at the Maximum Power Point (MPP), despite constant variations in environmental conditions such as irradiance and temperature. Traditional Maximum Power Point Tracking (MPPT) algorithms often exhibit limitations in terms of response speed, accuracy, and stability. In this work, we propose an optimized MPPT method based on an Interval Type-2 Fuzzy Logic Controller (IT2FLC), which is capable of better handling system uncertainties and nonlinearities.

The designed controller dynamically adjusts the duty cycle of a DC-DC converter to ensure continuous optimal operation at the MPP. The fuzzy system parameters are optimized using advanced meta-heuristic algorithms, enhancing both precision and convergence speed. Simulation results demonstrate that the proposed method outperforms classical approaches such as Type-1 Fuzzy Controllers and the Perturb & Observe method in terms of tracking efficiency, response time, and robustness.

This study highlights the great potential of Type-2 Fuzzy Controllers for reliable and high-performance MPPT in photovoltaic systems, with promising applications in the field of renewable energy.

Keywords: Maximum Power Point Tracking, Photovoltaic Systems, Type-2 Fuzzy Logic, Optimization, Renewable Ener

الملخص:

تعتمد كفاءة الأنظمة الكهروضوئية (PV) بشكل كبير على قدرتها على العمل عند نقطة القدرة القصوى (MPP) ، على الرغم من التغيرات المستمرة في الظروف البيئية مثل الإشعاع الشمسي ودرجة الحرارة. غالبًا ما تُظهر الخوارزميات التقليدية لتتبع نقطة القدرة القصوى (MPPT) محدودية في سرعة الاستجابة، الدقة، والاستقرار. في هذا العمل، نقترح طريقة مُحسَّنة لتتبع نقطة القدرة القصوى تعتمد على متحكم ضبابي من النوع الثاني (Interval Type-2 Fuzzy Logic Controller – IT2FLC)، قادر على التعامل بشكل أفضل مع حالات عدم اليقين واللاخطية في النظام.

يعمل المتحكم المصمم على ضبط نسبة التشغيل لمحول تيار مستمر – تيار مستمر (DC-DC) بشكل ديناميكي لضمان التشغيل الأمثل بشكل دائم عند مستوى MPP. ويتم تحسين معاملات النظام الضبابي باستخدام خوارزميات ميتا-استكشافية متقدمة، مما يؤدي إلى تحسين الدقة وسرعة التقارب. وتُظهر نتائج المحاكاة أن الطريقة المقترحة تتفوق على الأساليب التقليدية مثل المتحكم الضبابي من النوع الأول وطريقة الاضطراب والمراقبة (Perturbe & Observe) ، من حيث كفاءة التتبع، وسرعة الاستجابة، والمتانة.

تُبرز هذه الدراسة الإمكانيات الكبيرة للتحكمات الضبابية من النوع الثاني لتوفير MPPT موثوق وعالي الأداء في الأنظمة الكهروضوئية، مع أفاق واعدة في مجال الطاقات المتجددة.

الكلمات المفتاحية: تتبع نقطة القدرة القصوى، الأنظمة الكهروضوئية، المنطق الضبابي من النوع الثاني، التحسين، الطاقات المتجددة.