

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de L'Enseignement Supérieur et de la
Recherche Scientifique

Université Mouloud Mammeri De Tizi-Ouzou



Faculté De Génie Electrique Et D'informatique
DEPARTEMENT D'AUTOMATIQUE

**Mémoire de Fin d'Etude
de MASTER ACADEMIQUE**
Spécialité : **Automatique et système**

Présenté par
Mr Lyazid BOUZELHA
Mémoire dirigé par **Melle Wassila ISSAADI**

Thème

**Méthode de l'intelligence artificielle
(floue) appliqué aux panneaux
photovoltaïque**

Mémoire soutenu publiquement le 27 septembre 2018 devant le jury composé de :

Mr Boualem SALHI

MAA, UMMTO, President

Melle Wassila ISSAADI

MCB, UMMTO, Rapporteur

Mr Boussad IDJRI

MCB, UMMTO, Examineur

Remerciements

La réalisation de ce mémoire a été possible grâce au concours de plusieurs personnes à qui je voudrais témoigner toute ma reconnaissance.

Je voudrais tout d'abord adresser toute ma gratitude à la directrice de ce mémoire, Melle Wassila ISSAADI, pour sa patience, sa disponibilité et surtout ses judicieux conseils, qui ont contribué à alimenter ma réflexion.

Je désire aussi remercier les professeurs de l'Université Mouloud Mammeri De Tizi-Ouzou et spécialement ceux du département Automatique qui m'ont accompagné tout au long de mon cursus et qui m'ont fourni les outils nécessaires à la réussite de mes études universitaires.

Mes respectueux remerciements à l'ensemble des membres du jury pour l'intérêt porté sur mon travail.

Je remercie mes très chers parents, qui ont toujours été là pour moi et m'ont toujours soutenus. Je remercie mon frère pour tous ses encouragements.

Enfin, je remercie mes amis qui ont toujours été là pour moi. Leur soutien inconditionnel et leurs encouragements ont été d'une grande aide.

À tous ces intervenants, je présente mes remerciements, mon respect et ma gratitude.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail en premier lieu à mes parents qui m'ont toujours soutenus pour me permettre de réaliser tous mes objectifs et qu'ils trouvent ici toute ma reconnaissance et ma gratitude.

A mon frère, mes cousins et a toute ma famille

A tous mes enseignants depuis le primaire jusqu'à maintenant surtout nos enseignants du département
Automatique

A tous mes camarades et mes amis.

Lyazid

Liste des figures

Chapitre : 1

Figure 1.1 : Principe d'effet photovoltaïque.

Figure 1.2 : structure d'une cellule photovoltaïque

Figure 1.3 : principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

Figure 1.4 : module photovoltaïque

Figure 1.5 : panneau photovoltaïque

Figure 1.6 : modèle électrique de la cellule photovoltaïque a une
Seule diode

Figure 1.7 : Le schéma bloc équivalent d'une cellule photovoltaïque

Figure 1.8 : caractéristique I(V) de modules connectés
Serie/parallèle

Figure 1.9 : le facteur de forme

Figure 1.10 : spécification de la caractéristique I(V)

Figure 1.11 : caractéristique I(V) d'une générateur PV et d'une charge
résistive

Figure 1.12 : système photovoltaïque

Figure 1.13 : Schéma électrique équivalent d'un convertisseur DC/DC
de type boost

Figure 1.14 : Schéma électrique équivalent d'un convertisseur DC/DC
de type boost

Figure 1.15 : Schéma électrique équivalent d'un convertisseur DC/DC
de type boost

Figure 1.16 : forme de la tension de charge

Figure 1.17 : architecture d'un système photovoltaïque

Chapitre : 2

- Figure 2.1.** : algorithme MPPT
- Figure 2.2.** : MPPT par contre réaction de tension
- Figure 2.3.** intervalle de variation de la tension et du courant de fonctionnement optimal pour des ensoleillements et des températures variables
- Figure 2.4.** : MPPT par contre réaction de tension par $V_{ref} = f(V_{OC})$
- Figure 2.5.** Tension de la puissance maximale du panneau en fonction de la tension de court ouvert d'un panneau photovoltaïque
- Figure 2.6.** : schéma explicatif de l'MPPT à implantation analogique
- Figure 2.7.** : algorithme MPPT perturbé et observe (P&O)
- Figure 2.8.** : caractéristique P-V (Puissance-Tension)
- Figure 2.9.** : algorithme de la commande MPPT Méthode d'incrémental de conductance

Chapitre : 3

- Figure (3.1) :** classification selon logique classique (booléenne)
- Figure (3.2):** classification selon logique floue
- Figure (3.3) :** représentation graphique des formes de bases des fonctions d'appartenance
- Figure (3.4) :** représentation graphique d'un ensemble classique et d'un ensemble flou
- Figure (3.5) :** structure interne d'un régulateur flou
- Figure (3.6) :** fonction d'appartenance des deux variables linguistiques d'entrées x_1 et x_2
- Figure (3.7) :** fonction d'appartenance de la variable linguistique de sortie normalisée (y)
- Figure (3.8)** schéma de base d'un contrôleur flou
- Figure (3.9) :** méthode d'inférence max-min

Chapitre : 4

- Figure 4.1.** caractéristiques $I(V)$ et $P(V)$ face à différentes températures
- Figure 4.2.** caractéristiques $I(V)$ et $P(V)$ face à différents ensoleillements
- Figure 4.3.** variation de l'ensoleillement de 1000w/m^2 jusqu'à 500w/m^2
- Figure 4.4.** tension du générateur PV, tension de la charge, et du rapport cyclique face à une diminution d'ensoleillement avec un MPPT P&O
- Figure 4.5.** puissance du générateur PV et la puissance de la charge face à une diminution d'ensoleillement avec un MPPT P&O

- Figure 4.6. variation de température de 25°C jusqu'à 10°C
- Figure 4.7. tension du générateur PV et de la charge face à un changement de température avec la commande MPPT P&O
- Figure 4.8. variation du rapport cyclique face à un changement de température avec la commande MPPT P&O
- Figure 4.9. puissance de la charge et la puissance du générateur PV face à une diminution de température avec le MPPT P&O
- Figure 4.10. variation d'ensoleillement de 1000w/m² jusqu'à 500w/m²
- Figure 4.11. variation de la tension du générateur PV, tension de la charge, et du rapport cyclique face à une diminution d'ensoleillement avec un MPPT flou
- Figure 4.12. variation puissance de la charge et du générateur PV face à une diminution d'éclairement avec la commande MPPT flou
- Figure 4.13. variation de température de 25°C jusqu'à 10°C
- Figure 4.14. tension du générateur PV et de la charge face à un changement de température avec la commande MPPT flou
- Figure 4.15. variation du rapport cyclique face à un changement de température avec la commande MPPT flou
- Figure 4.16. puissance de la charge et la puissance du générateur PV face à une diminution de température avec la commande MPPT flou
- Figure 4.17. variation de la tension du générateur PV et tension de la charge face à une diminution d'éclairement de 1000w/m² jusqu'à 500w/m²
- Figure 4.18. agrandissement de variation de la tension du générateur PV et tension de la charge face à une diminution d'éclairement de 1000w/m² jusqu'à 500w/m²

Liste des tableaux

Tableau. 3.1 : exemple de quelques règles floues

Tableau 3.2 : règles d'inférence

Nomenclature

I_{ph} : Photo-courant de la cellule.

I_0 : Courant de saturation inverse de la diode.

$V_t = \frac{nkT}{q}$: Tension thermique de la diode.

n : Facteur d'idéalité de la diode ($1 < n < 3$).

q : Charge de l'électron ($1,6 \cdot 10^{-19} C$).

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

T : Température de la cellule (en kelvin)

T_{fn} : Température de fonctionnement normal des cellules PV ($^{\circ}C$)

T_a : Température ambiante ($^{\circ}C$)

I_{ph0} : Courant de court-circuit pour une irradiation solaire standard de $1000W/m^2$

I_d : courant de diode

I_{sc} : courant de court-circuit

V_{oc} : tension de circuit ouvert

I_{scr} : courant de court-circuit de référence

R_{sh} : résistance en parallèle

R_s : résistance en serie

Ψ : Ensoleillement

Table des matières

Introduction générale	1
1. Chapitre 1 : Généralité sur les systèmes photovoltaïque	3
1.1. Introduction	3
1.2. La cellule photovoltaïque.....	3
1.2.1. Définition	3
1.3. Structure d'une cellule photovoltaïque	4
1.4. Modèle électrique de la cellule photovoltaïque	8
1.4.1. Modèle électrique de la cellule photovoltaïque à une seule diode...8	
1.5. Paramètres de la cellule photovoltaïque.....	13
1.5.1. Rendement de la cellule	13
1.5.2. Facteur de forme FF.....	14
1.6. Spécification du générateur photovoltaïque	14
1.6.1. La caractéristique I(v)	14
1.7. Point de fonctionnement d'un panneau photovoltaïque	15
1.8. Principe de conversion dans le système PV.....	16
1.8.1 Couplage direct d'une générateur PV et une charge résistive.....	16
1.8.2. Étage d'adaptation entre un générateur PV et une charge	16
1.8.3. Exemple d'interface de puissance	17
1.8.3.1. Convertisseur boost (convertisseur survolteur)	17
1.9. La charge	20
1.10. Étude et présentation d'un système de captage photovoltaïque.....	20
1.10.1. Architecture générale d'un système photovoltaïque (PV).....	20
1.11. Conclusion	21

2.	chapitre 2 : Commandes spécifiques en poursuite du point de puissance maximum (MPPT).....	22
2.1.	introduction	22
2.2.	principe de fonctionnement d'un générateur PV à sa puissance maximale.....	22
2.3.	Synthèse des différentes MPPT rencontrées dans la littérature.....	22
2.3.1.	Les premiers types de commande MPPT.....	23
2.3.2.	Commandes MPPT destinées aux applications spatiales.....	23
2.3.3.	Commande MPPT par contre réaction de tension.....	24
2.3.3.1.	Contre réaction de tension par V_{ref} fixe.....	24
2.3.3.2.	Contre réaction de tension par $V_{ref} = f(VOC)$	25
2.3.3.3.	Contre réaction de tension par une cellule pilote.....	26
2.3.4.	Commande MPPT par contre réaction de courant.....	27
2.3.4.1.	Contre réaction de courant par $I_{ref} = f(ICC)$	27
2.3.4.2.	Contre réaction par maximisation de courant de sortie...	27
2.3.5.	Contre réaction de puissance.....	28
2.3.6.	Les MPPT à implantation analogique.....	28
2.3.7.	Algorithme perturbation et observation (P&O).....	29
2.3.8.	Amélioration de l'algorithme perturbation et observation (P&O).....	31
2.3.9.	Méthode d'incrémentación de conductance.....	31
2.3.10.	Méthode améliorée d'incrémentación de conductance.....	34
2.4.	Conclusion	34
3.	Chapitre 3 : logique floue.....	35
3.1.	Introduction	35
3.2.	introduction à la logique floue	35
3.3.	principe et définition de la logique floue	36
3.3.1.	les sous-ensembles flous	38

3.3.2.variables linguistiques.....	39
3.3.3.operateurs flous	40
3.4. Description et structure d'une commande par logique floue.....	40
3.4.1.Interface de fuzzification.....	41
3.4.2.Mécanisme d'inférence	42
3.4.3.interface de défuzzification.....	43
3.5. MPPT floue	43
3.5.1.Principe de la commande MPPT flou.....	44
3.5.1.1. Fuzzification	44
3.5.1.2. Méthode d'inférence.....	45
3.5.1.2.1. Méthode d'inférence max-min	46
3.5.1.3. Défuzzification	47
3.6. Conclusion	47
4. Chapitre 4 : Simulation et évaluation des résultats.....	48
4.1. Introduction	48
4.2. Caractéristique d'un panneau photovoltaïque face à différentes températures et d'ensoleillement.....	48
4.2.1. Caractéristique d'un panneau photovoltaïque face à différentes températures.....	48
4.2.2.Caractéristique d'un panneau photovoltaïque face à différents ensoleillement.....	49
4.3. Résultat de simulation pour la commande MPPT P&O (perturber et observer).....	49
4.3.1.Comportement face à une variation d'ensoleillement	49
4.3.2. Comportement face à une variation de température.....	52
4.4. Résultats de simulation pour la commande MPPT basé sur la logique floue	55
4.4.1.Comportement face à une variation d'ensoleillement.....	55
4.4.2.Comportement face à une variation de température	57

4.5. Comparaison des deux commande MPPT P&O et MPPT à base de logique floue.....	60
4.6. Conclusion	62

Introduction générale

L'énergie a toujours joué un rôle primordial dans les activités journalières de la vie humaine et de son développement. Avec le développement la production d'énergie devenait indispensable à toutes les activités et un besoin accru en énergie se fait ressentir dans les pays développés et en voie de développement et beaucoup plus au cours de ces dernières années, un besoin de plus en plus grand qui incite une production d'énergie de plus en plus forte, cette production a été triplée depuis les années 60 à nos jours. Essentiellement l'énergie produite provenait de sources fossiles comme le charbon, le pétrole et le gaz.

La consommation d'énergie provenant de ces sources donne lieu à des émissions de gaz à effet de serre qui engendrent une pollution croissante parallèlement avec la croissance de la consommation d'énergie. Une consommation excessive de ces ressources engendrerait un épuisement prématuré des réserves disponibles, ce qui constitue un danger pour les générations à venir, en les mettant face à une crise énergétique à l'exemple de celle qui a frappé le monde dans les années 70, mais de plus grande ampleur, vu la dépendance quotidienne à l'énergie électrique que connaît le monde de nos jours.

Toutes ces raisons nous poussent à chercher d'autres alternatives à ces énergies fossiles, et à nous intéresser plus aux énergies renouvelables telles que l'eau, le vent, le soleil, la biomasse et la géothermie. Par leurs avantages par rapport aux énergies fossiles les énergies renouvelables constituent une solution prometteuse face aux désagréments des autres sources d'énergies. Ces dernières permettraient à l'homme de subvenir à ses besoins en énergie tout en protégeant son environnement.

Avec sa forte exposition solaire tout au long de l'année, l'Algérie possède tous les atouts pour développer l'énergie solaire et en faire l'un de ses atouts majeurs pour son développement et pour sortir de sa dépendance au pétrole et au gaz. De ce fait, l'énergie solaire a connu un fort engouement et une croissance exponentielle ces dernières années dans notre pays, ce qui a conduit à la création et la spécialisation de plusieurs entreprises dans le domaine. Dans le même contexte ce mémoire se penche sur l'étude d'un système photovoltaïque autonome qui assure la conversion de l'énergie solaire en énergie électrique. Constitué d'un générateur photovoltaïque à plusieurs cellules, une interface de puissance qui est un simple circuit de convertisseur DC/DC et d'une charge résistive. Le modèle de notre système a été développé à l'aide du logiciel de simulation Matlab/Simulink, il nous permettra d'étudier le comportement statique et dynamique de notre système avec ou sans commande MPPT (maximum power point tracking). Dans un premier temps nous allons étudier le comportement de notre système vis-à-vis des perturbations externes, ensuite nous nous pencherons sur le système commandé par une commande MPPT de type P&O (perturbe and observe), puis nous ferons une approche basée sur l'intelligence artificielle en l'occurrence une commande MPPT à base de logique

floue, qui est mise en œuvre pour améliorer les performances du contrôleur ce qui est l'objet de notre études dans ce mémoire.

Le présent mémoire est subdivisé en quatre chapitres.

Dans le premier on présente et on explique le principe de fonctionnement d'un système photovoltaïque et d'une cellule photovoltaïque ainsi que son modèle mathématique. On s'intéressera aussi au convertisseur DC/DC et son principe de fonctionnement.

Le deuxième chapitre sera consacré à la commande MPPT, où on présente les origines ainsi que les différents types de commande MPPT qui existe.

Quant au troisième chapitre il sera entièrement consacré à la logique floue, dans lequel nous présenterons et expliquerons son principe. Ensuite on présentera la commande MPPT à base de logique floue.

Enfin dans le quatrième chapitre nous allons exposer et discuter les résultats de simulation obtenue.

Nous terminons notre travail par une conclusion générale.

Chapitre 1

Généralités sur les systèmes photovoltaïques

1.1. Introduction

Le soleil est une source d'énergie quasi inépuisable, et pour pouvoir recueillir cette énergie et de la transformé en énergie électrique on doit recourir à l'utilisation d'une cellule photovoltaïque, cette dernière transforme les rayons du soleil en énergie électrique via un phénomène physique appelé l'effet photovoltaïque, construit à partir de matériaux semi-conducteur qui réagissent à la lumière, l'énergie fournit par la cellule peut varier en fonction des condition climatique et du matériau utilisé pour la fabrication de celle-ci, une seule cellule fournit un courant assez faible avec une faible tension, pour obtenir une tension d'utilisation convenable avec un courant adéquat on doit assembler plusieurs cellules entres elle en série/parallèle ce qui forme un générateur photovoltaïque

Pour bien comprendre l'effet photovoltaïque et le principe de fonctionnement des panneaux photovoltaïques, nous avons rappelé dans ce chapitre quelques notions de base sur l'effet photovoltaïque la conception et la composition d'une cellule photovoltaïque et son principe de fonctionnement, et aussi d'un générateur photovoltaïque et présenter le fonctionnement d'un convertisseur statique.

1.2. La cellule photovoltaïque

1.2.1. Définition

Les cellules photovoltaïques transforment l'énergie solaire en énergie électrique par un processus appelé « effet photovoltaïque », ce dernier a été découvert par Edmond Becquerel en 1839.

Les cellules photovoltaïques sont des composants optoélectronique fabriqué à partir de matériaux semi-conducteur le plus connu d'entre eux est le silicium

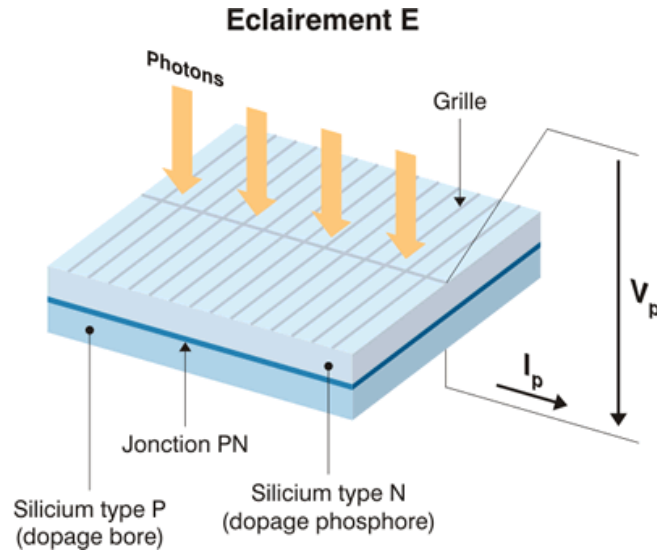


Figure.1.1. Principe d'effet photovoltaïque.

Dans un semi-conducteur exposé à la lumière, un photon d'énergie suffisante qui est supérieure à l'énergie du matériau arrache un électron créant au passage un « trou ». Si les photons incidents ont une énergie inférieure ils ne seront pas absorbés et de même leurs énergies ne contribuent pas à la conversion photovoltaïque.

1.3. Structure d'une cellule photovoltaïque

Il existe plusieurs types de cellules photovoltaïques qui se différencient entre elles par la matière dont elles sont fabriquées et les plus utilisées sont les cellules à base de silicium, parmi celles qui sont fabriquées à base de silicium on distingue les monocristallin les polycristallin et les amorphes, vu leurs rendements les cellules à silicium monocristallin sont les plus largement utilisées et commercialisées malgré leur coût élevé, tandis que les cellules à base de silicium polycristallin ont un coût moins élevé mais un rendement moindre que sa devancière, enfin les cellules à silicium amorphe sont les moins chères et les plus faciles à fabriquer. Cependant ces cellules ont un rendement limité, de ce fait les cellules à silicium amorphe sont beaucoup utilisées pour l'alimentation de petits appareils solaires. [1]

Une cellule photovoltaïque est constituée de plusieurs couches. On trouve au centre de cette cellule, une couche de silicium qui contient une quantité d'électrons libre supérieure à une couche de silicium pur, donc elle sera chargée négativement N, en contact avec une autre couche qui a une quantité d'électrons libre inférieure à une couche de silicium pur à son tour elle sera chargée positivement P. De part et d'autre du cœur de la cellule, on a une couche conductrice autrement dit une grille métallique, puisqu'il faut que cette couche soit conductrice et ne subisse pas des phénomènes de corrosion. Aussi le silicium est très réfléchissant, on place donc un revêtement anti-

réflexion sur le dessus de la cellule. Enfin on trouve une couche de verre qui protège la cellule. Ces couvertures de protections sont indispensables car la cellule est très fragile. L'épaisseur totale de la cellule est de l'ordre du millimètre. Pour finir, on relie les cellules entre elles, constituant alors le panneau solaire, afin d'obtenir une puissance suffisante. [2]

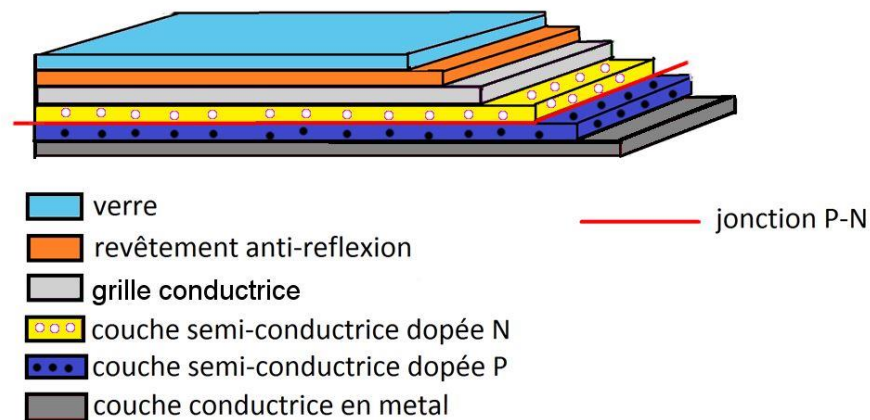


Figure.1.2. Structure physique d'une cellule photovoltaïque.

Au moment de la création de la jonction PN, les électrons libres de la couche N migrent vers la couche P pour se recombiner avec les trous majoritaires dans celle-ci.

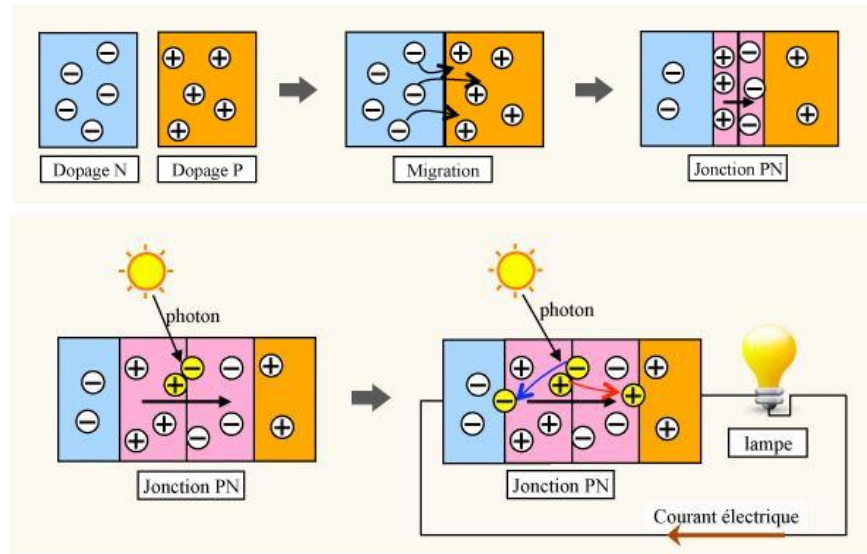


Figure.1.3. Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque.

Chaque matériau possède sa propre bande d'énergie interdite. Lorsqu'un photon pénètre le matériau semi-conducteur il arrache un électron et crée un couple libre d'électron-trou. Sous l'effet du champ électrique, les électrons s'accumulent dans la couche dopée N, alors que les trous s'accumulent dans la couche dopée P. cette réaction entraîne alors une différence de répartition de charges créant ainsi une différence de potentiel électrique, c'est ce qu'on appelle l'effet photovoltaïque. [3]

Cependant tout photon pénétrant possédant une énergie inférieure au GAP du matériau n'aura pas assez d'énergie pour arracher un électron à ce dernier. De ce fait l'énergie produite par une cellule photovoltaïque est beaucoup plus faible que l'énergie solaire arrivant sur la cellule car plusieurs facteurs entrent en considération. [4]

La puissance électrique produite par une cellule photovoltaïque est très faible, typiquement de 1 à 3W avec une tension de 1 Volt.

Pour produire plus de puissance, les cellules photovoltaïques sont alors assemblées afin de former un module (figure1.4).

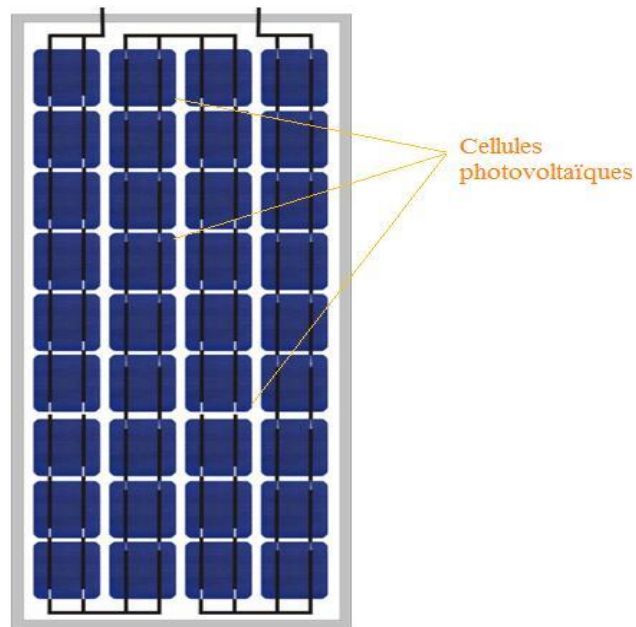


Figure.1.4. Module photovoltaïque.

Le passage d'un module à un panneau se fait par l'ajout de diodes de protection : une diode en série pour éviter les courants inverses, et une autre en parallèle dit diode by-pass qui n'intervient qu'en cas de déséquilibre d'un ensemble de cellules pour limiter la tension inverse aux bornes de cet ensemble et minimiser la perte de production associée.



Figure.1.5. Panneau photovoltaïque.

1.4. Modèle électrique de la cellule photovoltaïque

1.4.1. Modèle électrique de la cellule photovoltaïque à une seule diode

Lorsqu'une jonction P-N réalisée à partir de matériaux photosensible est atteinte par un rayon de lumière, elle présente la capacité de produire de l'énergie et devient un générateur d'énergie.

Cependant ce comportement peut être décrit par l'équation électrique définissant le comportement d'une diode classique.

Le schéma électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque est représenté par la figure 1.6 qui est constitué d'une source de courant idéal, branchée en parallèle avec une diode, une résistance série R_s , et une résistance parallèle R_{sh} . [3]

La source de courant délivre un courant I_{ph} , directement proportionnel à l'intensité de la lumière reçu par la cellule, alors que la diode D décrit les propriétés semi-conductrices de la cellule photovoltaïque.

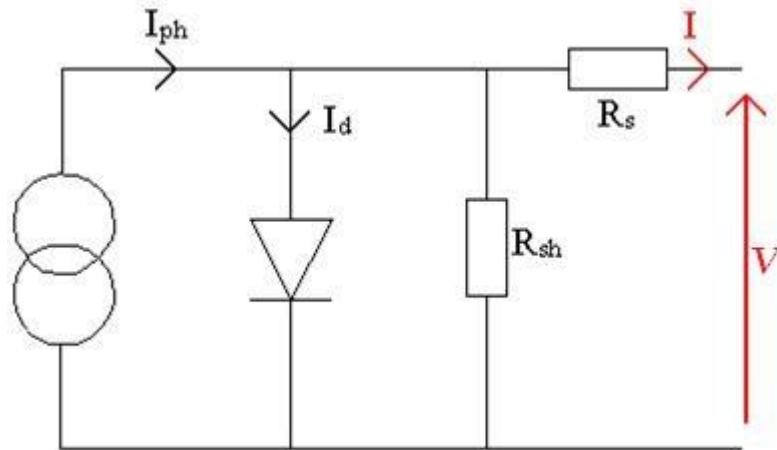


Figure.1.6. Modèle électrique de la cellule photovoltaïque à une seule diode.

L'équation (1.1) du schéma de la figure 1.6 qui est déduite directement à partir de la loi de Kirchhoff est la suivante :

$$I = I_{ph} - I_0 \left[\exp\left(\frac{V + R_s I}{V_t}\right) - 1 \right] - \frac{V + R_s I}{R_{sh}} \quad (1.1)$$

Avec :

I_{ph} : Photo-courant de la cellule.

I_0 : Courant de saturation inverse de la diode.

$V_t = \frac{nkT}{q}$: Tension thermique de la diode.

n : Facteur d'idéalité de la diode ($1 < n < 3$).

q : Charge de l'électron ($1,6 \cdot 10^{-19} C$).

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

T : Température de la cellule (en kelvin) variant en fonction de l'éclairement et de la température ambiante selon la relation linéaire suivante :

$$T - T_a = \frac{T_{fn} - 25}{\Psi} \quad (1.2)$$

T_{fn} : Température de fonctionnement normal des cellules PV (°C) dans les conditions suivantes :

Un ensoleillement de $1000 W/m^2$, une température ambiante de $25^\circ C$ et une masse d'air optique AM égale à 1.5.

La valeur de T_{fn} est généralement donnée par le constructeur et est située autour de $45^\circ C$.

T_a : Température ambiante (°C), et Ψ (W/m^2) l'ensoleillement global du lieu considéré et reçu par le module photovoltaïque.

Toutes les constantes dans les équations ci-dessus peuvent être déterminées en utilisant les données du fabricant des panneaux photovoltaïques et à partir des courbes $I=f(V)$ mesurées.

A partir de ces équations, une méthodologie simple a été développée pour la détermination des caractéristiques d'une cellule ou d'un panneau photovoltaïque. [3]

On introduit les deux paramètres externes de la cellule (facilement mesurables), tels que le courant de court-circuit et la tension du circuit ouvert, pour en déduire l'expression mathématique implicite du courant délivré par une cellule photovoltaïque, ainsi que sa caractéristique I(V).

L'expression approchée du courant de court-circuit est donnée comme suit :

$$I_{cc} = \frac{I_{ph}}{1 + \frac{R_s}{R_{sh}}} \quad (1.3)$$

A des niveaux d'éclairements usuelles, le photo-courant est proportionnel à l'irradiation solaire ou au flux lumineux Ψ (W/m²) tel que :

$$I_{ph} = I_{ph0} \frac{\Psi}{1000} \quad (1.4)$$

Où I_{ph0} est le courant court-circuit pour une irradiation solaire standard de 1000W/m²

Idealement la tension de circuit ouvert s'exprime comme suit :

$$V_{oc} = V_t \ln\left(\frac{I_{ph}}{I_0} + 1\right) \quad (1.5)$$

A partir de l'équation (1.5) on peut déduire le courant de saturation de la diode qui sera donnée comme suit :

$$I_0 = \frac{I_{ph}}{\exp\left(\frac{V_{oc}}{V_t}\right) - 1} \quad (1.6)$$

Calcule de la résistance série :

Au point optimal (maximum power point) (V_{mpp} , I_{mpp}) de fonctionnement on peut écrire la relation suivante :

$$I_{mpp} = I_{ph} - I_0 \exp\left(\frac{V_{mpp} + R_s I_{mpp}}{V_t} - 1\right) \quad (1.7)$$

$$\text{Or que : } I_0 = \frac{I_{ph}}{\exp\left(\frac{V_{oc}}{V_t}\right) - 1} \quad (1.8)$$

En remplaçant I_0 dans l'équation (1.7) on obtient :

$$I_{mpp} = I_{ph} \left(1 - \frac{\exp\left(\frac{V_{mpp} + R_s I_{mpp}}{V_t}\right) - 1}{\exp\left(\frac{V_{oc}}{V_t}\right) - 1}\right) \quad (1.9)$$

Et de ce fait on obtient :

$$R_s = \frac{V_t \ln\left[\left(1 - \frac{I_{mpp}}{I_{ph}}\right) \exp\left(\frac{V_{oc}}{V_t}\right) + \frac{I_{mpp}}{I_{ph}}\right] - V_{mpp}}{I_{mpp}} \quad (1.10)$$

En pratique la résistance shunt (parallèle) est très grande donc le terme $\frac{V + R I}{R_{sh}}$ tend vers zéro.

De ce fait l'équation (1.1) devient :

$$I = I_{ph} - I_0 \left[\exp\left(\frac{V + R_s I}{V_t}\right) - 1\right] \quad (1.11)$$

Le schéma bloc équivalent d'une cellule photovoltaïque sera alors :



Figure.1.7. Schéma bloc équivalent d'une cellule photovoltaïque.

Pour avoir les valeurs nominales requises en tension et en puissance, il faudrait brancher les modules photovoltaïques dans un groupement mixte formé de N_s modules en série et N_p modules en parallèle selon le besoin, sachant qu'un branchement en série augmente la tension et un branchement en parallèle augmente le courant [5]

De ce fait on obtient les deux équations suivantes :

$$V_p = N_s V_{cell} \quad I_{pv} = N_p I_{cell} \quad (1.12)$$

Et ces relations ne sont valables que si tous les modules constituant le générateur photovoltaïque sont identiques et reçoivent le même niveau d'irradiation.

Pour qu'un générateur PV ainsi constitué puisse fonctionner de façon optimale, il faut que les (N_s, N_p) Cellules se comportent toutes de façon identique.

Elles doivent pour cela être issues de la même technologie, du même lot de fabrication et qu'elles soient soumises aux mêmes conditions de fonctionnement (éclairage, température, vieillissement et inclinaison)

Comme le module se compose de groupe de cellules, le modèle d'un module photovoltaïque est basé sur le modèle de la cellule solaire.

Sa caractéristique I(V) est directement liée à la caractéristique de la cellule photovoltaïque de base.

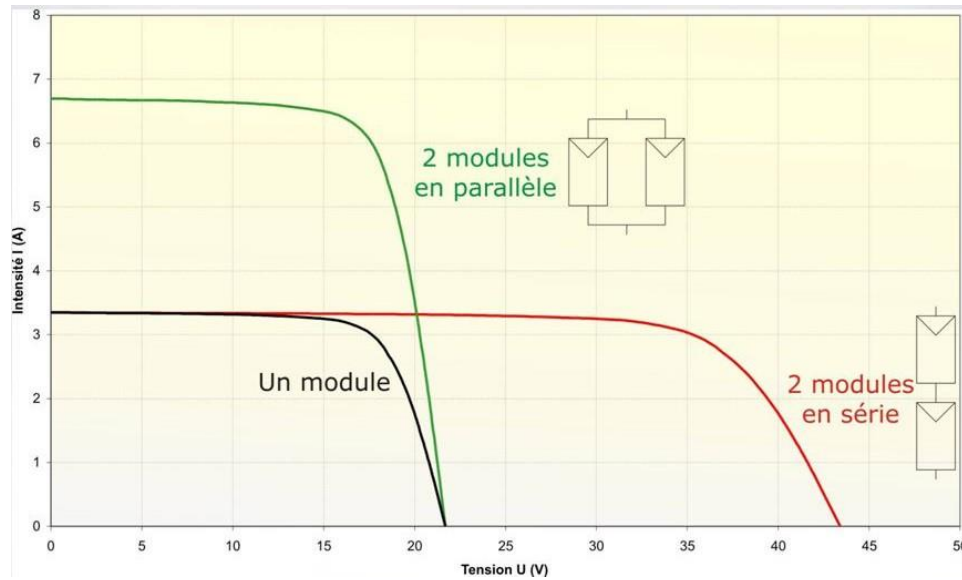


Figure.1.8. Caractéristique I(V) de modules connectés série/parallèle.

Si on veut avoir une puissance optimale du générateur PV, il faudrait que chaque cellule fonctionne à sa puissance maximale P_{\max}

Cette puissance P_{\max} est le maximum d'une caractéristique P(V) du générateur et correspond au produit d'une tension optimale notée V_{mpp} d'un courant optimal noté I_{mpp} .

1.5. Paramètres de la cellule photovoltaïque

1.5.1. Rendement de la cellule

C'est le paramètre le plus important d'une cellule photovoltaïque, Le rendement est défini comme le rapport de la puissance maximale fournie par la cellule à la puissance lumineuse d'incident et est décrit par l'équation suivante :

$$\eta = \frac{V_{mpp} I_{mpp}}{\psi S} \quad (1.13)$$

S est la surface génératrice en m^2 et ψ est l'ensoleillement en W/m^2 .

L'optimisation du rendement des cellules photovoltaïques est basée sur la compréhension et le développement du concept du dispositif.

1.5.2. Facteur de forme FF

Le facteur de forme représente l'efficacité de la cellule ou encore, il peut nous renseigner sur le vieillissement de la cellule.

Ce coefficient représente le rapport entre la puissance maximale que peut délivrer la cellule notée P_{max} et la puissance formée par le rectangle $I_{sc} * V_{oc}$. Plus la valeur de ce facteur sera grande, plus la puissance exploitable le sera également. [6]

Dans le cas d'une cellule idéale le facteur de forme FF ne peut pas être supérieur à 0.89 du fait de la relation exponentielle liant courant et tension.

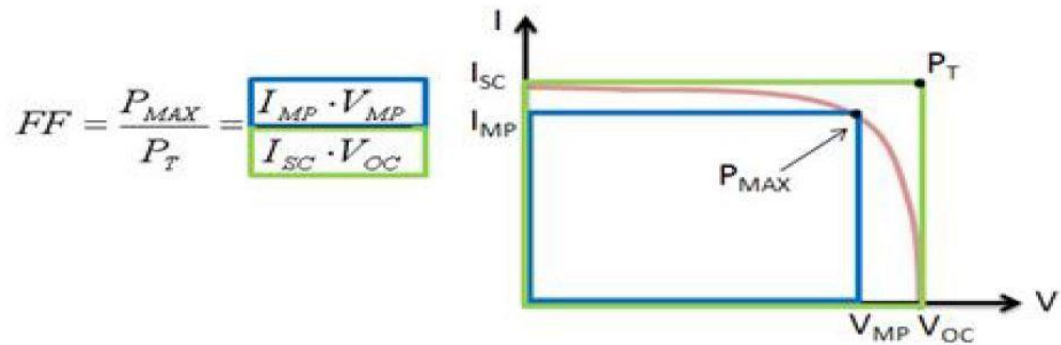


Figure.1.9. Facteur de forme.

Ce paramètre dépend de la conception de la cellule, de la qualité de la jonction p-n et du matériau, de la résistivité des contacts métalliques, etc.

1.6. Spécification du Générateurs photovoltaïque

1.6.1. La caractéristique I(V) représente les trois zones essentielles :

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

La zone (2) : représente la région préférée pour le fonctionnement du générateur, où le point optimal (caractérisé par une puissance maximale) peut être déterminé.

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

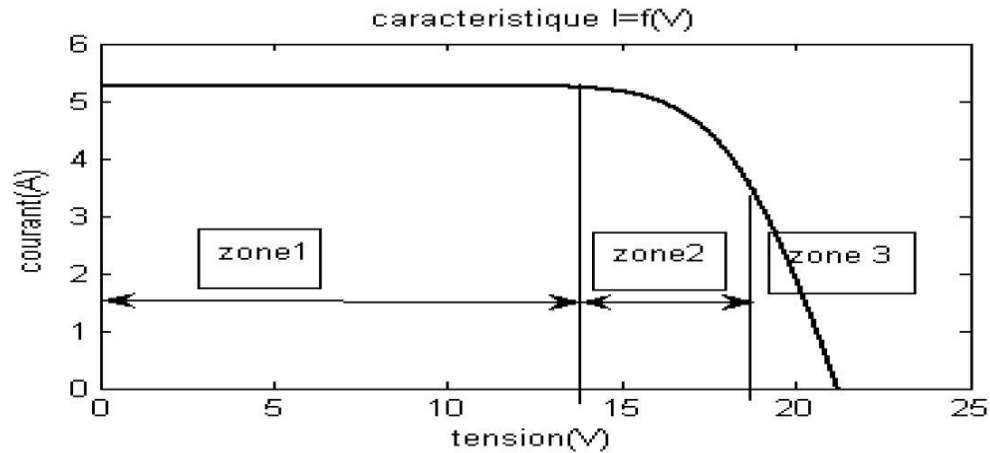


Figure.1.10. Spécification de la caractéristique I(V).

1.7. Point de fonctionnement d'un panneau photovoltaïque

Les systèmes PV devraient être conçus pour fonctionner à leurs niveaux de puissance maximum de rendement pour n'importe quelle température et niveau solaire d'irradiation à tout moment.

Le dernier facteur significatif qui détermine la puissance de sortie PV est l'impédance de la charge. [5]

Cependant, on devrait noter qu'une telle impédance n'est pas constante.

Lorsqu'un générateur photovoltaïque est directement couplé à une charge, le point de fonctionnement du générateur photovoltaïque sous un rayonnement constant sera l'intersection de sa courbe caractéristique $I = f(V)$ avec la courbe caractéristique $I_{ch} = f(V)$ de la charge, donc la charge est présentée avec un point quelque part sur la caractéristique de cellules I(V).

Généralement ce point de fonctionnement est rarement au MPP (Maximum Power Point) du générateur photovoltaïque, de ce fait il ne produit pas la puissance maximum.

Quand la charge augmente, le point de fonctionnement se déplace le long de la caractéristique vers la droite. De ce fait, une diminution de la charge fait monter le point de fonctionnement de la caractéristique vers la gauche de la direction.

Pour atténuer ce problème, un traqueur maximum de point de puissance (MPPT) peut être employé pour maintenir le point de fonctionnement du générateur photovoltaïque au MPP. Avec une MPPT

on peut extraire plus de 97% de la puissance de générateur photovoltaïque une fois correctement optimisé.

1.8. Principe de conversion dans les systèmes PV

Le générateur PV est le cœur d'un système PV, cependant pour une application pratique, on a besoin d'autres éléments, des convertisseurs et des charges

1.8.1. Couplage direct d'un générateur PV et une charge résistive

Dans le cas où une charge purement résistive est directement connectée à une source linéaire, les valeurs du courant et de la tension pour chaque point de fonctionnement sont facilement calculées en utilisant la loi d'Ohm. Par contre, lorsque la source est de nature non linéaire, comme c'est le cas pour un générateur PV, une méthode graphique est nécessaire. Le point de fonctionnement est alors l'intersection de la caractéristique $I(V)$ du générateur PV et de la droite de charge comme le montre la figure 1.11

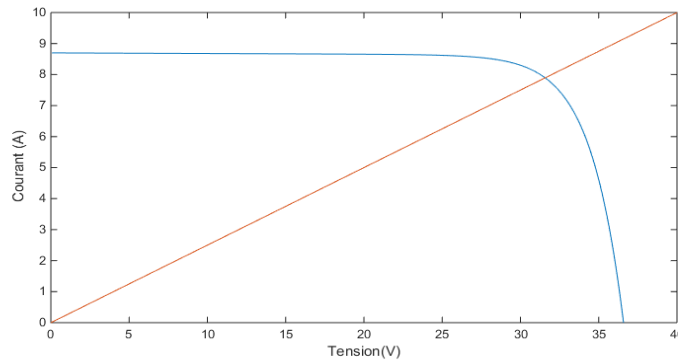


Figure 1.11. Caractéristique $I(V)$ d'un générateur PV et d'une charge résistive.

1.8.2. Etage d'adaptation entre un générateur PV et une charge

Afin d'extraire à chaque instant, le maximum de puissance disponible aux bornes du générateur PV et la de la transférer à la charge, un étage d'adaptation est nécessaire. Cet étage joue le rôle d'interface entre les deux éléments. Il assure à travers une action de contrôle, le transfert du maximum de puissance fournie par le générateur. [3]

L'adaptateur communément utilisé pour un générateur PV est un convertisseur statique (convertisseur DC/DC). La structure de conversion est choisie en fonction de la charge à alimenter. Il pourra s'agir d'un circuit survolteur ou bien dévolteur.

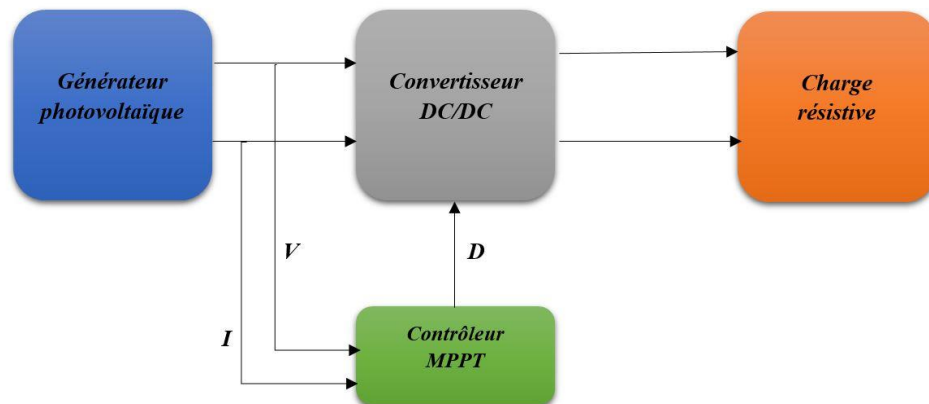


Figure 1.12. Système photovoltaïque.

1.8.3. Exemple d'interface de puissance

Un convertisseur DC/DC est utilisé comme adaptateur entre la charge et la source, pour obtenir la puissance maximale du panneau photovoltaïque, ceci en maintenant le point de fonctionnement tout près du point de puissance maximum pour n'importe quel condition de fonctionnement (rayonnement, température,... etc.)

Dans ce qui suit, on présente le principe de fonctionnement du convertisseur boost.

1.8.3.1. Convertisseur boost (convertisseur survolteur)

Le convertisseur boost, appelé aussi hacheur parallèle est une alimentation à découpage qui converti une tension continue en une tension continue de plus grande intensité, il peut être utilisé comme adaptateur entre la charge et la source, lorsque le point de fonctionnement en couplage direct est à droite du MPP (point de puissance maximum).

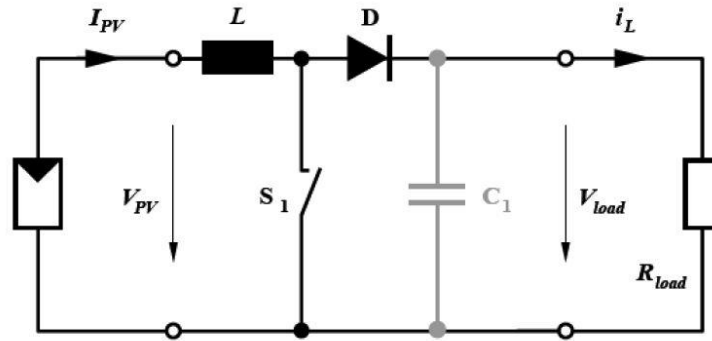


Figure. 1.13. Schéma électrique équivalent d'un convertisseur DC/DC de type boost.

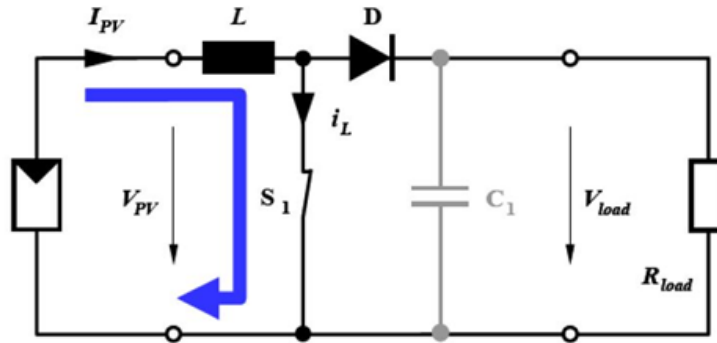


Figure. 1.14. Schéma électrique équivalent d'un convertisseur DC/DC de type boost

A t_0 si le commutateur est ouvert et si la chute de tension aux bornes de la diode est négligée alors V_{load} est égale à V_{PV} (figure 1.11)

A commutateur fermée (figure 1.12), et si le condensateur C1 est omis la tension de la charge chute immédiatement à zéro. Le courant du circuit i_L circule à travers l'inductance L et augmente suivant l'équation suivante :

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_{pv}}{L}$$

A commutateur ouvert (figure 1.13), l'inductance se retrouve en série avec le générateur et sa F.E.M s'additionne à celle du générateur (effet survolteur). Le courant i_L traversant l'inductance et ensuite la diode D, le condensateur C1 et la charge. De ce fait résulte un transfert d'énergie

accumulée dans l'inductance vers le condensateur. Ensuite le courant décroît progressivement, du fait que $V_{load} > V_{pv}$

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_{pv} - V_{load}}{L}$$

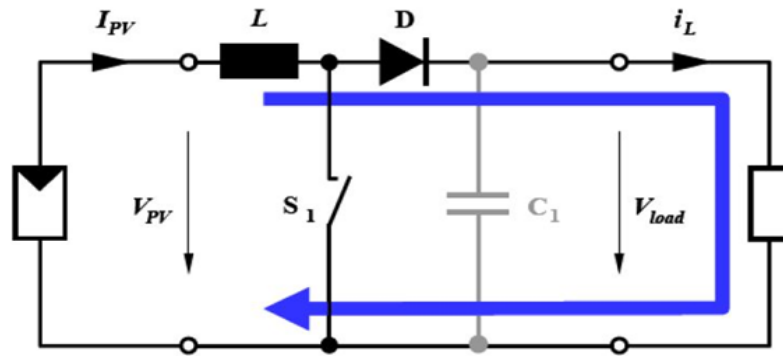


Figure 1.15. Schéma électrique équivalent d'un convertisseur DC/DC de type boost.

La forme d'onde de la tension de la charge est représentée dans la figure 1.16, La diode D permet d'éviter la décharge du condensateur C1, lorsque le commutateur est fermé est supposé assez grand pour lisser la tension de la charge.

La tension de la charge sera donnée comme suit :

$$V_{load} = \frac{T}{T_{off}} V_{pv} = \frac{1}{1-d} V_{pv}$$

Avec :

$d = \frac{t_{on}}{T}$: est le rapport cyclique ($0 < d < 1$).

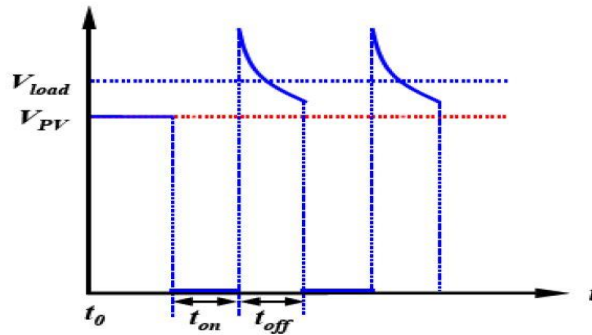


Figure 1.16. Forme d'onde de la tension de la charge.

1.9. La charge

La charge est l'équipement électrique alimenté par le système peut être de type continue comme des équipements (télécommunication, moteur à courant continue...) ou bien de type alternatif dans les cas d'usage domestique (maison solaire) ce cas nécessite un onduleur.

Dans notre travail on utilise une charge résistive qui servira de charge électrique alimentée par un système photovoltaïque PV.

1.10. Étude et présentation d'un système de captage photovoltaïque

1.10.1. Architecture générale d'un système photovoltaïque (PV)

L'intérêt essentiel des générateurs photovoltaïques est la possibilité d'autonomie énergétique qu'ils permettent. Les premiers générateurs ont été utilisés en 1958 pour les satellites, puis très largement par la suite pour l'exploration de l'espace. Les premières installations photovoltaïques utilisées au sol datent de 1956 et ont été conçues pour des applications en sites isolés et principalement dans les pays en voie de développement où les réseaux de distribution d'énergie sont généralement restreints aux grands centres urbains.

Un système photovoltaïque (PV) se compose dans son ensemble d'un champ de modules (générateur photovoltaïque) et d'un ensemble de composants qui adapte l'électricité produite par les modules aux spécifications des récepteurs, comprend tous les équipements entre le champ de modules et la charge finale.

Poser les modules, le câblage et un convertisseur continu/continu permettant d'alimenter le bus continu et de poursuivre le point de puissance maximum, et une charge. La figure I.17 montre le schéma de principe d'un système photovoltaïque (PV) autonome.

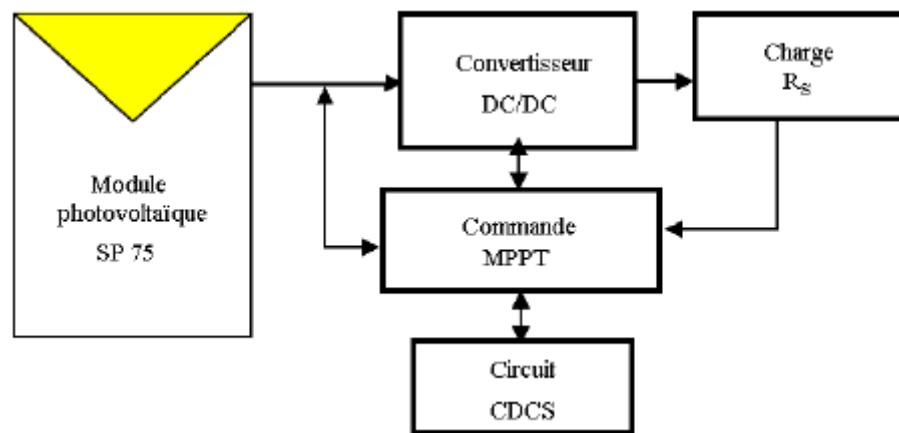


Figure 1.17. Architecture générale d'un système photovoltaïque (PV).

1.11. Conclusion

Cet état de l'art préliminaire a permis de présenter les points qu'il faut améliorer sur les systèmes de conversion photovoltaïque (PV). En effet, étant donnée la recrudescence d'intérêts sur les énergies renouvelables, il est nécessaire, si l'on souhaite que le PV connaisse l'essor espéré dans l'avenir, d'améliorer et de sécuriser ce type de conversion d'énergie.

Dans ce chapitre nous avons décrit la composition d'une cellule photovoltaïque au silicium ensuite nous nous sommes penché sur son principe de fonctionnement, pour la modélisation mathématique de la cellule on s'est basé sur le modèle électrique à une seule diode.

Les caractéristiques d'un module photovoltaïque montre bien que la puissance délivrée par ce dernier dépend fortement des conditions climatiques.

Dans le chapitre suivant, nous allons présenter le fonctionnement d'un générateur photovoltaïque à sa puissance maximal et différents MPPT rencontrés dans la littérature.

Chapitre 2

Commandes spécifiques en poursuite du point de puissance maximum (MPPT)

2.1. Introduction

Les cellules photovoltaïques sont utilisées pour fournir de l'énergie électrique dans divers applications, et qui dit divers applications dit divers conditions de fonctionnement.

Un panneau photovoltaïque doit fournir le maximum de sa puissance à tout moment et à n'importe quelles conditions de fonctionnement, et pour y parvenir le panneau ne peut être relié directement à la charge, il doit passer par un étage d'adaptation qui est un convertisseur statique, ce dernier sera commandé par une commande dite MPPT qui aura pour fonction de maintenir le point de fonctionnement du panneau dans la zone de puissance maximal.

Il existe plusieurs types de commandes MPPT toutes différentes les unes des autres. Dans ce chapitre nous allons essayer de présenter les différents types de commandes MPPT et de les classer selon leurs principe de fonctionnement et nous nous somme penché aussi sur leurs avantages et inconvénients.

2.2.Principe de fonctionnement d'un générateur PV à sa puissance maximale

Dans un système électrique comprenant une source et une charge, la recherche du point de fonctionnement optimal par des techniques d'optimisation représente ce qui est le plus important. Dans le cas du photovoltaïque, cette démarche est plus complexe du fait que la caractéristique des cellules dépend fortement de l'ensoleillement et de la température ambiante, entre autres. Il faut trouver un dispositif permettant de fonctionner à tout moment suivant le point de fonctionnement optimal.

2.3. Synthèse des différentes MPPT rencontrées dans la littérature

Depuis la première publication de la première loi de commande MPPT adapté à un générateur photovoltaïque en 1968, beaucoup de publications ont vu le jour sur ce domaine, vu le grand nombre on a fait une classification des différentes MPPT existantes.

2.3.1. Les premiers types de commande MPPT

Les premiers MPPT qui ont vu le jour avaient la particularité d'être des algorithmes simple et ceci dû à la faible capacité de calcul des microcontrôleurs de l'époque, la première commande MPPT appliqué aux photovoltaïques était réalisée par BOEHRINGER en 1968, c'était un algorithme simple qui était destiné aux applications spatiales qui avaient beaucoup moins de contraintes en variation de température et d'éclairement que les applications terrestres. [7]

La figure 2.1 montre le principe de cet algorithme.

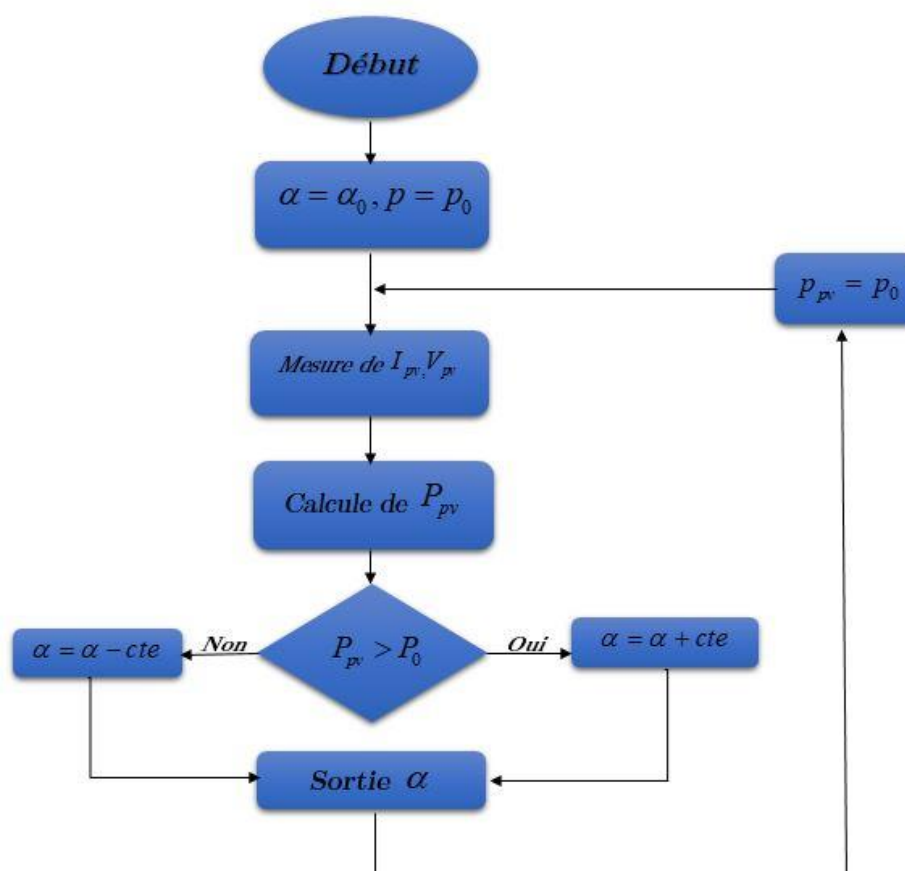


Figure 2.1. Algorithme MPPT.

2.3.2. Commandes MPPT destinées aux applications spatiales

Contrairement aux applications terrestres qui sont soumises aux changements climatiques et aux heures du jour, les applications spatiales présentent un comportement prévisible, de ce fait les MPPT dédiées à cet effet sont plus simple.

2.3.3. Commande MPPT par contre réaction de tension

Ce genre de mécanismes repose sur le contrôle de la tension de fonctionnement des panneaux, par la comparaison de cette tension avec une tension de référence. Cela génère une tension d'erreur qui fait varier le rapport cyclique de la PWM de commande afin d'annuler cette erreur. La figure 2.2 montre la structure de ce mécanisme. [8]

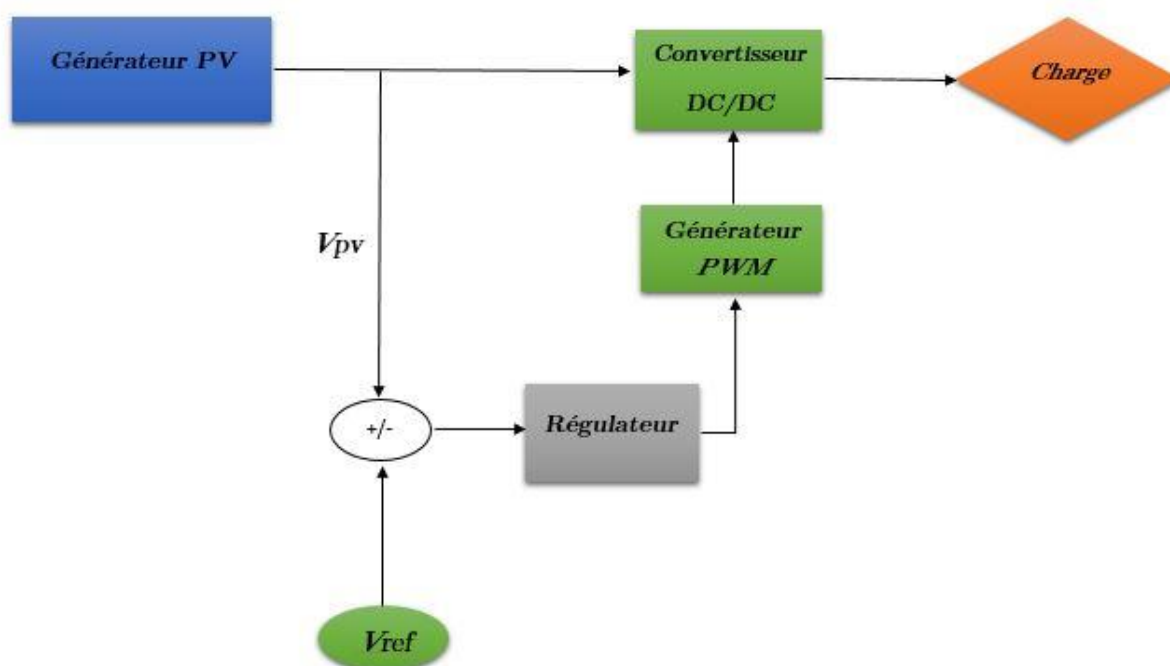


Figure 2.2. MPPT par contre réaction de tension.

On a plusieurs types de méthodes selon la nature de cette tension de référence (fixe ou variable).

2.3.3.1. Contre réaction de tension par V_{ref} fixe

A cause de la dépendance de la tension du panneau de l'ensoleillement et de la température, la tension de puissance maximale est déviée, alors la tension de référence doit être corrigée en continu pour différents ensoleillements et températures. [6]

Dans cette méthode la tension de référence est prédéfinie, comme on peut le voir sur la figure 2.3, elle correspond à la tension moyenne de l'intervalle des points des puissances maximales relevées par des tests sous différentes conditions d'ensoleillement et de température.

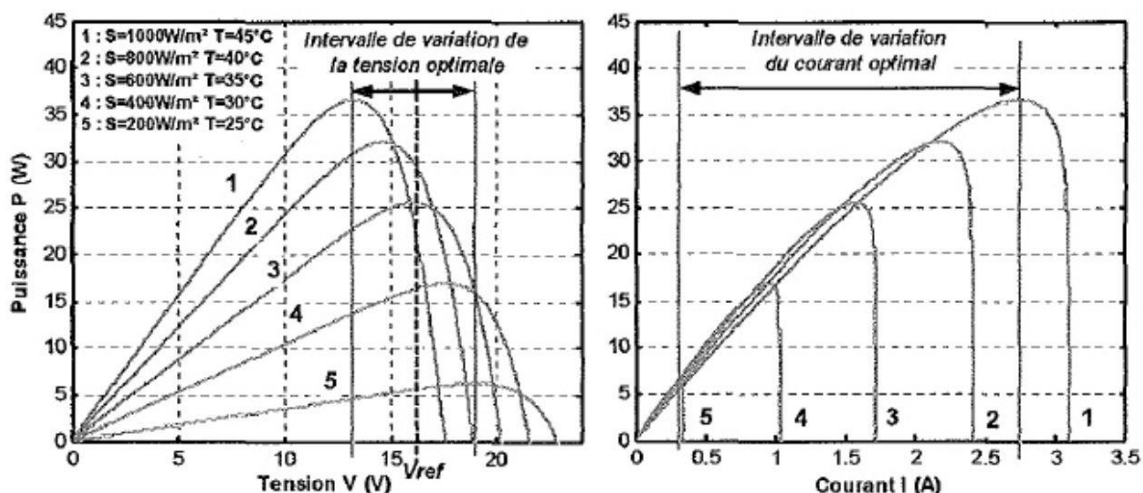


Figure 2.3. Intervalle de variation de la tension et du courant de fonctionnement optimal pour des ensoleillements et des températures variables.

Afin de générer le maximum de puissance on fait varier simplement les différents facteurs de pondération lors de la mise au point, comme on peut le voir sur la figure 2.3.

2.3.3.2. Contre réaction de tension par $V_{ref} = f(V_{OC})$

Cette méthode exploite la relation quasi linéaire entre la tension de fonctionnement en puissance maximale et la tension à circuit ouvert V_{oc} du GPV (générateur photovoltaïque). [9] Cette valeur est prélevée régulièrement par le débranchement du panneau pour une courte durée pour ajuster la tension de référence précédente par une certaine proportionnalité généralement égale à 0.77 comme illustré sur la figure 2.4 :

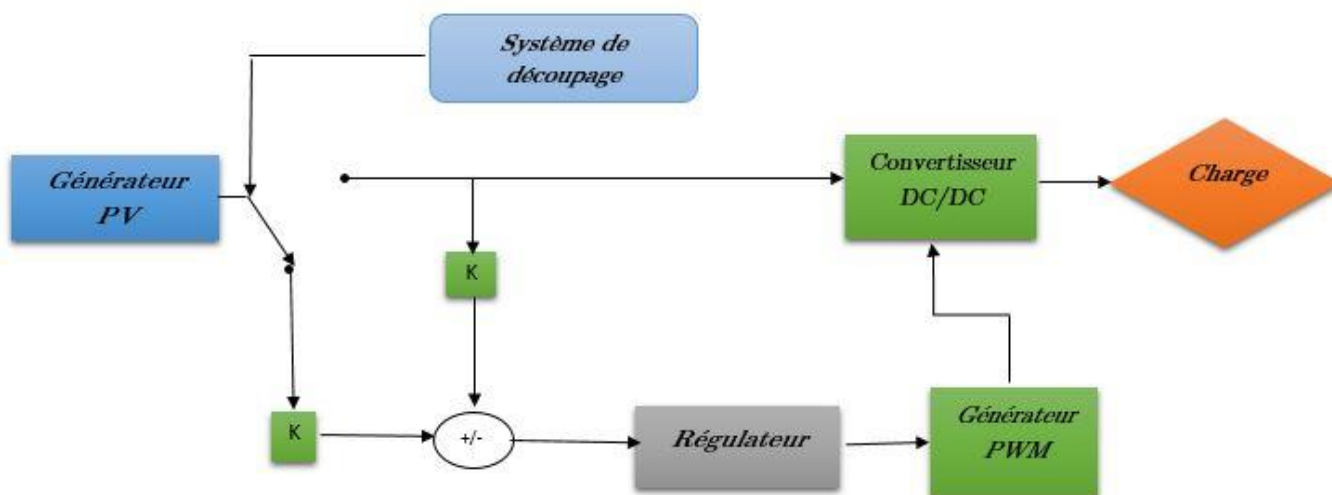


Figure 2.4. MPPT par contre réaction de tension par $V_{ref} = f(V_{OC})$.

En traçant la fonction $V_{mpp} = f(V_{oc})$, on remarque que cette fonction est pratiquement linéaire et elle est de forme $V_{mpp} = K * V_{oc}$. En exploitant cette propriété, on peut traquer en permanence le point de puissance maximale (MPP)

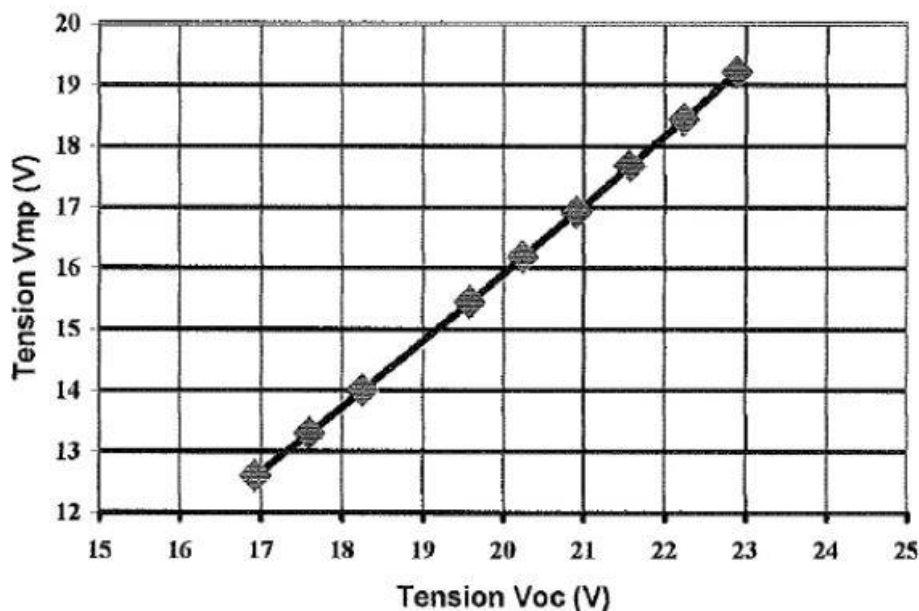


Figure 2.5. Tension de la puissance maximale du panneau en fonction de la tension de court-circuit d'un panneau photovoltaïque.

L'avantage est que la commande de la tension de fonctionnement du panneau photovoltaïque prend en considération l'insolation et la température, le vieillissement et l'accumulation de la poussière sur la surface de cellules. [9]

Mais l'inconvénient est que cette méthode ne peut pas être considérée comme un vrai moyen de poursuite du MPP. Car L'exactitude de l'ajustement de la tension de fonctionnement à la tension maximum V_{mpp} de puissance dépend du choix de cette fraction comparée au vrai

$$\text{rapport } \frac{V_{mpp}}{V_{oc}}$$

2.3.3.3. Contre réaction de tension par une cellule pilote

Dans la méthode précédente l'interruption du fonctionnement du circuit pour mesurer V_{oc} cause des pertes de puissance et un bruit dans les circuits électroniques. Pour éviter ces problèmes une cellule pilote est ajoutée au panneau solaire, c'est une cellule photovoltaïque simple qui est électriquement indépendante du reste de la rangée. La tension à circuit ouvert de

cette cellule qui est mesurée continuellement va nous donner une information implicite de la tension en circuit ouvert de l'ensemble des panneaux solaires, en multipliant cette tension avec le nombre de cellules en série.

Cette méthode évite l'interruption du système mais il existe des problèmes, car la cellule pilote utilisée comme référence pour le comportement de la rangée n'est pas facile à mettre en application. La superficie des modules photovoltaïques et l'emplacement de la cellule, font que celle-ci ne soit pas toujours fidèle à ce qui est ressentie par le panneau.

Pour limiter cet inconvénient, on place une cellule pilote individuelle pour chaque petit groupe de panneaux afin de pouvoir estimer le facteur pour le fonctionnement optimal. Et comme pour les méthodes précédentes, celle-ci utilise un facteur fixe pour estimer la tension V_{mpp} à partir de la tension V_{oc} ce qui fait que le MPP (Maximum Power Point) n'est pas suivi correctement. Par ce que, il est difficile de trouver un endroit idéal de la cellule pour qu'elle donne une information parfaite de la tension V_{oc} de l'ensemble pour différents ensoleillements et température.

2.3.4. Commande MPPT par contre réaction de courant

2.3.4.1. Contre réaction de courant par $I_{ref} = f(I_{CC})$

Conformément aux méthodes de contre réaction de tension, le courant de court-circuit du panneau PV permet de savoir la valeur du courant optimal dans lequel doit fonctionner le panneau pour avoir le maximum de puissance de la part du panneau PV. Le courant optimal est proportionnel au courant de court-circuit, et cette proportionnalité est presque constante en fonction des conditions climatique.

Dans ce cas on a deux types de fonctionnement, soit on choisit une valeur constante, désigné selon les conditions de fonctionnements fréquentes pour obtenir le maximum de puissance, soit on fait varier la valeur en fonction des conditions climatique.

2.3.4.2. Contre réaction par maximisation de courant de sortie

Cette méthode est basée sur le fait que si la charge est constituée par des batteries la tension de la charge est approximativement constante, de ce fait pour maximiser la puissance de sortie il faudra maximiser le courant de charge des batteries, et cela est vrais si le rapport $\frac{dP}{dI}$ est borné et strictement supérieur à zéro. [15]

On peut l'écrire sous la forme suivante : $0 < \frac{V}{I} + \frac{dV}{dI} < \infty$

Quoi que cette relation n'est pas vrais pour tous types de charges elle convient au charge à

faible résistance comme les batteries mais si il s'agit d'un moteur à courant continu ou bien possède un autre convertisseur la dérivée $\frac{dP}{dI}$ devient nulle au point de puissance maximal, de ce fait il serait impossible de trouver le MPP à partir du courant uniquement.

L'avantage de cette méthode réside dans sa simplicité de calcul, on a moins de calculs, mais cette méthode a tout de même des inconvénients vu qu'il existe un certain décalage entre le point de puissance maximum et le point obtenu par cette méthode.

2.3.5. Contre réaction de puissance

Son principe est basé sur la mesure des deux grandeurs principales, le courant I_{pv} et la tension V_{pv} de sortie du panneau. L'évaluation de la puissance instantanée de ce dernier est élaborée par une simple multiplication de ces deux composantes $P_{pv}=I_{pv}*V_{pv}$ par un algorithme de recherche itératif qui se charge de trouver la position du PPM, donc la puissance maximale, en effectuant la recherche dans un sens, L'algorithme maintien ce sens si la puissance de sortie augmente constamment et dans le cas contraire, il change le sens de la recherche. Le sens de la variation de la puissance P est connu par le calcul de manière approximative de la dérivée $dP \approx \Delta P(k) = p(k) - p(k-1)$ sur un temps d'échantillonnage qui représente la vitesse d'exécution du microprocesseur ou du microcontrôleur. [10]

A cause de l'approximation de la dérivée par des valeurs discrètes le MPP n'est jamais atteint mais le point de fonctionnement oscille au-dessous de ce point, ce qui engendrée des instabilités et qui ajoute des formes du bruit au circuit.

2.3.6. Les MPPT à implantation analogique

La commande MPPT analogique est une méthode qui ne fait intervenir que des composants analogiques et logiques ou aucun algorithme n'est nécessaire, la rapidité du système ne dépend que du temps de retard des composants analogiques qui est généralement faible.

Cette commande MPPT analogique utilise directement la tension et le courant du panneau photovoltaïque pour trouver le point de fonctionnement correspondant à la puissance maximale, et elle peut être appliquée aussi bien à des convertisseurs abaisseurs qu'à des élévateurs. L'image de la puissance du panneau est obtenue par la multiplication des grandeurs précédentes. Pour déduire le sens de variation de la puissance deux filtres RC de constante de temps différents créent un retard différent pour deux branches différentes, en association avec un comparateur de tension, ces deux signaux génèrent un signal qui représente la dérivée $\frac{dP}{dt}$.

[11]

Lorsque la puissance diminue la sortie du comparateur est négative, dans le cas contraire elle sera positive. Ces créneaux attaquent une bascule JK ou sa sortie bascule pour chaque front

montant ou descendant du comparateur, la sortie de la bascule est intégrée par un circuit RC passe bas pour générer une tension continue qui sert de tension de référence pour la génération du signal PWM.

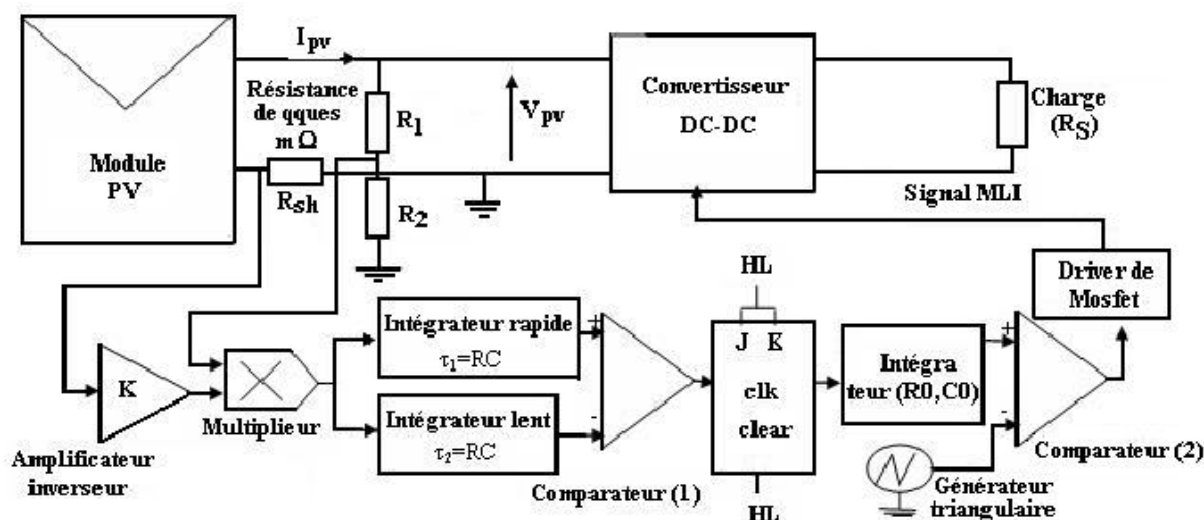


Figure. 2.6. Schéma explicatif de l'MPPT à implantation analogique.

Lorsqu'on a une augmentation brutale de l'ensoleillement le mécanisme de poursuite est incapable de déterminer la cause de l'augmentation de puissance si elle est causée par le déplacement du point de fonctionnement ou par des variations des conditions de fonctionnement. Cela cause la déviation du MPP ce qui engendre des pertes de puissance. Autres inconvénients, lorsqu'on a des changements rapides d'ensoleillement ou des parasites dans le courant, la bascule change d'état incorrectement et le point de fonctionnement s'éloigne de plus en plus du MPP jusqu'à ce que la sortie de la bascule se fixe sur le niveau bas, et le rapport cyclique se fixe à zéro, alors le système se bloque et aura besoin d'un redémarrage

2.3.7. Algorithme perturbation et observation (P&O)

Vu sa simplicité la méthode de perturbation et observation est une approche très répandue dans le domaine de poursuite du point de puissance maximum, la méthode de perturbe et observe peut suivre le point de puissance maximum même lors de variations de températures et d'ensoleillement, et elle ne nécessite que de mesurer la tension V_{pv} et le courant I_{pv} du panneau photovoltaïque.

Le principe de fonctionnement de cette méthode consiste à perturber le système en augmentant ou bien en diminuant la tension de fonctionnement du module et d'observer l'effet sur la puissance de sortie, à chaque cycle de l'algorithme la tension V_{pv} et le courant I_{pv} sont mesurés pour calculer la puissance P_{pv} et cette valeur P_{pv} est comparée à la valeur antérieure de P_{pv} qui a été calculée au cycle précédent. D'après la valeur obtenue, si la tension de sortie est plus grande, alors la tension V_{pv} est ajustée dans la même direction que dans le cycle précédent,

et si la tension de sortie est inférieure, alors la tension V_{pv} est ajustée dans le sens opposé que dans le cycle précédent, de ce fait la tension est perturbée à chaque cycle de l'algorithme

Quand le système atteint son point de puissance maximum, la tension V_{pv} oscille autour de la valeur optimale, ceci engendre une perte de puissance qui augmente avec l'augmentation du pas d'incrément de la perturbation. Plus le pas est grand plus l'algorithme répond rapidement aux changements soudains des conditions climatiques. [12]

Contrairement si le pas est petit, on minimise les pertes de puissance lors des changements climatiques lents ou stables, mais le système perdra de sa rapidité de réponse au changement de température et d'ensoleillement, et pour obtenir le pas idéal on doit le définir expérimentalement en fonction des conditions.

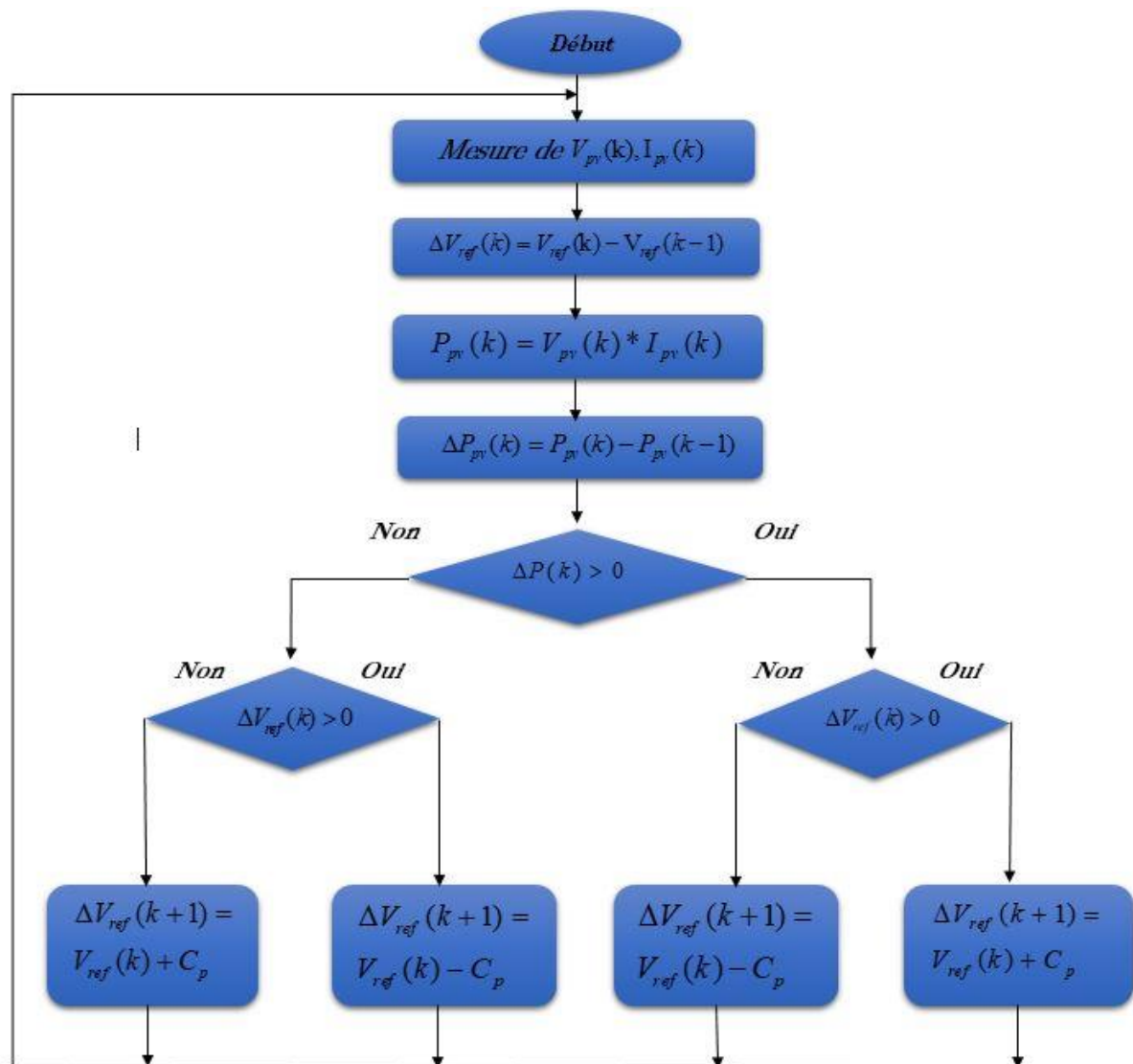


Figure. 2.7. Algorithme MPPT perturbé et observe (P&O).

Si une augmentation ou bien une diminution brutale de l'ensoleillement est produite, on aura une augmentation ou bien une diminution de la puissance du panneau selon les conditions de l'ensoleillement, l'algorithme réagit comme si cette augmentation est produite par l'effet de la perturbation précédente, du coup il continue dans la même direction qui est la mauvaise direction, ce qui l'éloigne du vrais point de puissance maximale.

Et c'est tout ceci qui cause des retard de repense de l'algorithme lors des changements brutale des conditions de fonctionnement et qui engendre des pertes de puissance.

2.3.8. Amélioration de l'algorithme perturbation et observation (P&O)

L'inconvénient majeur de l'algorithme perturbe et observe est la divergence de ce dernier lors des changements brutal des conditions de fonctionnement, et pour y remédier une version amélioré de cet algorithme a été proposer, cette amélioration se distingue par l'ajout d'une condition sur la branche « oui » de condition $\Delta P_{pv}(k) > 0$ dans la structure de l'organigramme de l'algorithme P&O. si la perturbation prenait la même direction pendant deux cycle consécutif, la direction de la perturbation suivante sera inversée par rapport à la direction précédente sans avoir à tenir compte de la puissance. [12]

2.3.9. Méthode d'incrémentation de conductance

Cette méthode se base sur la particularité de la pente de la courbe de puissance du panneau étant la dérivée de la puissance de sortie du PV par rapport à la tension V du PV est nulle au point de puissance maximum, positive à gauche, et négative à droite.

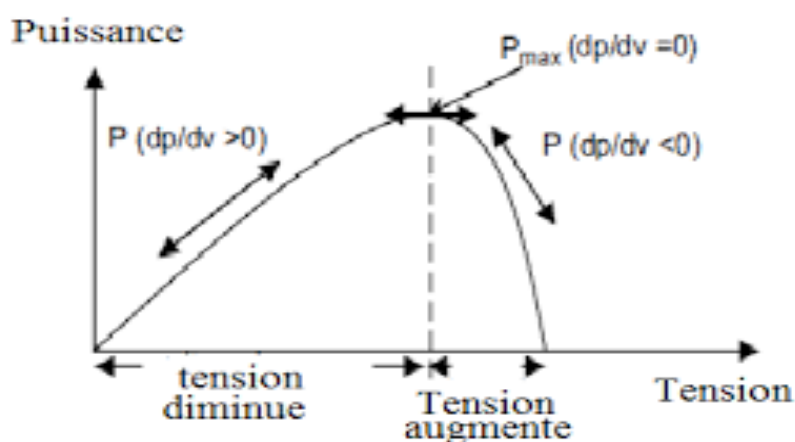


Figure 2.8 : caractéristique P-V (Puissance-Tension).

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dP}{dV} = 0 \quad \text{Au MPP} \\ \frac{dP}{dV} > 0 \quad \text{A gauche du MPP} \\ \frac{dP}{dV} < 0 \quad \text{A droite du MPP} \end{array} \right. \quad (2.1)$$

Puisque :

$$\frac{dP}{dV} = \frac{d(IV)}{dV} = I + V \frac{dI}{dV} \cong I + V \frac{\Delta I}{\Delta V}$$

Alors l'équation 1 peut être écrite comme suit :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\Delta I}{\Delta V} = -\frac{I}{V} \quad \text{Au MPP} \\ \frac{\Delta I}{\Delta V} > -\frac{I}{V} \quad \text{A gauche du MPP} \\ \frac{\Delta I}{\Delta V} < -\frac{I}{V} \quad \text{A droite du MPP} \end{array} \right. \quad (2.2)$$

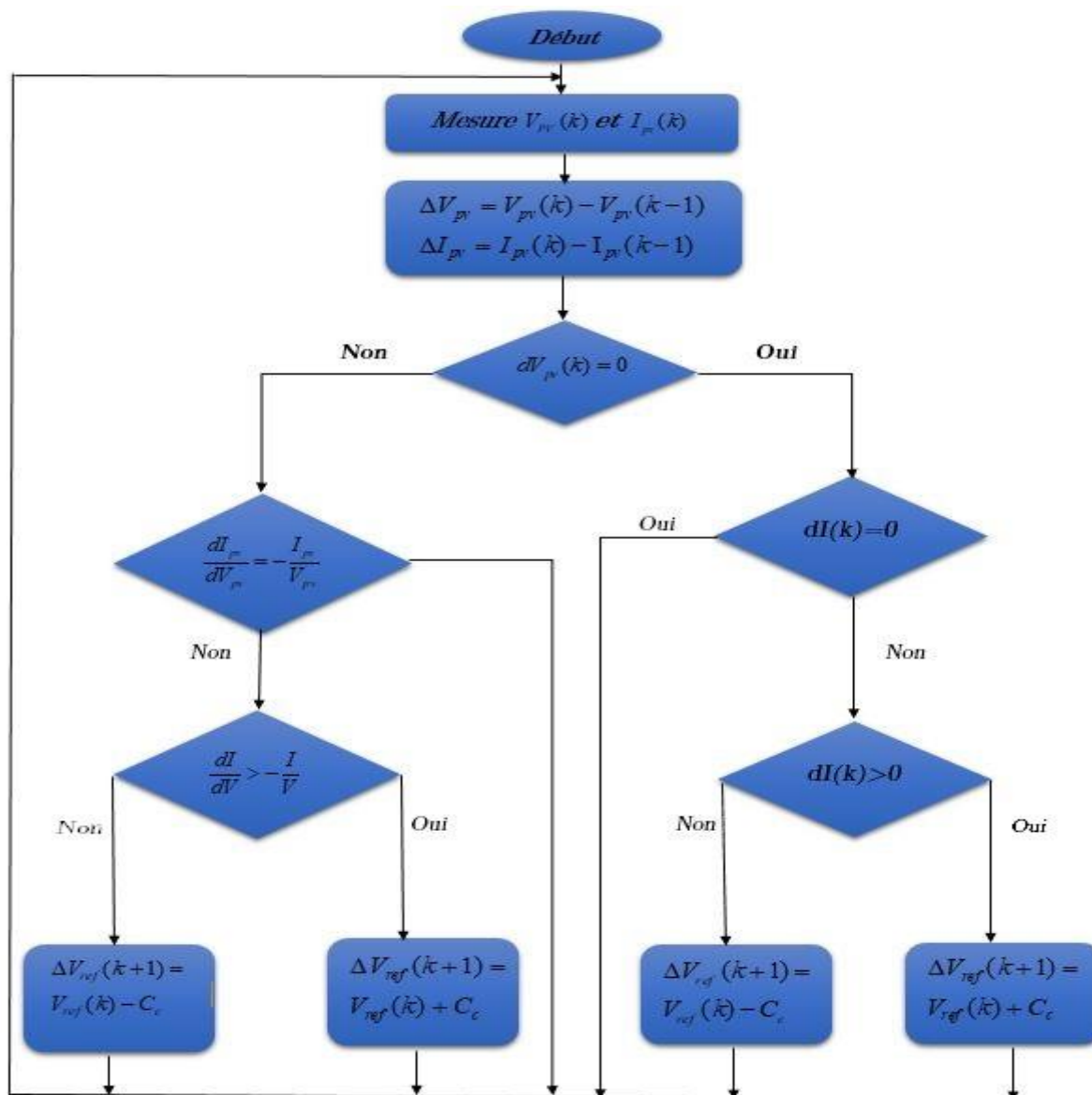


Figure. 2.9. Algorithme de la commande MPPT Méthode d'incrément de conductance.

En comparant la conductance ($G=I/V$) à l'incrément de la conductance ($\Delta G = \Delta I / \Delta V$) comme le montre l'algorithme de la figure 2.10 on peut suivre le point de puissance maximum. V_{ref} est la tension de référence pour laquelle le panneau photovoltaïque est forcé de fonctionner, au point de puissance maximum $V_{ref}=V_{mpp}$. Une fois que le système a atteint son point de fonctionnement maximum, le point de fonctionnement est maintenu sauf en cas de changement de ΔI qui indiquera un changement des conditions de fonctionnement, du coup l'algorithme augmente ou bien diminue V_{ref} pour suivre le point de puissance maximum. [13]

La taille de l'incrément détermine la rapidité de la poursuite du MPP. Une poursuite rapide peut être obtenue avec un incrément plus grand, mais le système ne pourrait pas fonctionner exactement au point de puissance maximum et oscille autour de celui-ci. Il y a donc, comme

pour la méthode P&O, un compromis entre rapidité et précision.

2.3.10. Méthode améliorée d'incrémentation de conductance

la méthode d'incrémentation de conductance peut être améliorée en amenant le point de fonctionnement près du MPP dans une première étape, puis d'utiliser l'algorithme Incrémentation de la Conductance pour suivre exactement le MPP dans une deuxième étape, ou bien par l'ajout d'un correcteur PI.

2.4. Conclusion

Comme nous l'avons vu dans ce chapitre les commandes MPPT réussissent à faire fonctionner les panneaux photovoltaïques à leurs puissance maximum, mais toutes fois ces commandes connaissent des inconvénients en terme de rapidité et de précision, plus on essaye d'améliorer la précision on perd en rapidité et vice versa, et c'est ce qui nous a amenés à nous pencher sur d'autres méthodes dites intelligentes telle que la méthode à base de logique floue.

Chapitre 3

Logique floue

3.1. Introduction

Créé en 1965 par Lotfi Zadeh en se basant sur sa théorie mathématique des ensembles flous. La logique floue est une extension de la logique classique qui permet la modélisation des imperfections des données, elle se rapproche dans une certaine mesure de la flexibilité du raisonnement humain, et récemment la commande à base de logique floue a été introduite dans les systèmes de poursuite de point de puissance maximal.

En 1973, le professeur Zadeh publie un article, il y mentionne pour la première fois le terme de variables linguistiques dont la valeur est un mot et non un nombre. En 1974, Mamdani réalise un contrôleur flou expérimental pour commander un moteur à vapeur. Dans les années 80, plusieurs applications commencent à immerger notamment au Japon. Elle a été utilisée dans plusieurs domaines variés de contrôle et de régulation.

Dans ce chapitre nous allons présenter la logique floue, son principe, les étapes, les constituants, aussi le principe de fonctionnement d'un régulateur flou et l'application de la logique floue dans une commande MPPT photovoltaïque.

3.2. Introduction à la logique floue

La logique floue est une extension de la logique booléenne, la logique floue est une méthode de traitement de connaissances imprécises basées sur des termes linguistiques, elle donne le moyen de convertir une commande linguistique basée sur le raisonnement humain, en une commande automatique, tout cela en introduisant la notion de degré dans la vérification d'une condition ainsi permettant à une condition d'être dans différent état, que vrai ou faux, de ce fait la logique floue procure une sorte de flexibilité ce qui donne la possibilité de prendre en compte certaines incertitudes est imprécisions, ce qui nous permet de commander des systèmes complexes dont les informations sont exprimées d'une façon vague et imprécise.

Un des intérêts de la logique floue pour formaliser le raisonnement humain est que les règles sont énoncées en langage naturel, et pour illustrer ceci nous présentons dans le tableau suivant un exemple de quelques règles qu'un conducteur de voiture devant un feu tricolore peut suivre :

Tableau. 3.1. Exemple de quelques règles floues.

Si le feu est rouge	Si ma vitesse est élevée	Et si le feu est proche	Alors je freine fort
Si le feu est rouge	Si ma vitesse est faible	Et si le feu est loin	Alors je maintiens ma vitesse
Si le feu est orange	Si ma vitesse est moyenne	Et si le feu est loin	Alors je freine doucement
Si le feu est vert	Si ma vitesse est faible	Et si le feu est proche	Alors j'accélère

Intuitivement notre cerveau interprète les variables d'entrée d'une manière approximative, ce qui correspond au degré de vérité de la condition en logique floue.

3.3. Principe et définition de la logique floue

L'être humain est capable de gérer des situations et de réagir face à des problèmes et de trouver la bonne solution malgré l'incertitude et l'inexactitude des données. Avec la méthode classique étudier de tels problèmes revient à avoir des notions mathématiques assez avancées et la connaissance de différents paramètres qui peuvent interagir avec le problème dit, une étude pareil est souvent parsemée d'erreurs et d'imprécisions qui accompagne inévitablement toute modélisation de processus. [14]

Grace aux méthodes dites robuste son peut résoudre ce genre de problèmes, et la logique floue en fait partie. Ce dernier est issu de la capacité de l'homme qui décide et agit de façon pertinente malgré le flou des connaissances disponibles. Pour simplifier le principe on présente un petit exemple : on souhaite classifier des personnes en trois ensembles, jeunes, entre deux âges et âgé.

Avec la logique booléenne qui n'admet que les valeurs 0 et 1 comme variables, notre classification se fera comme le montre la figure 3.1 :

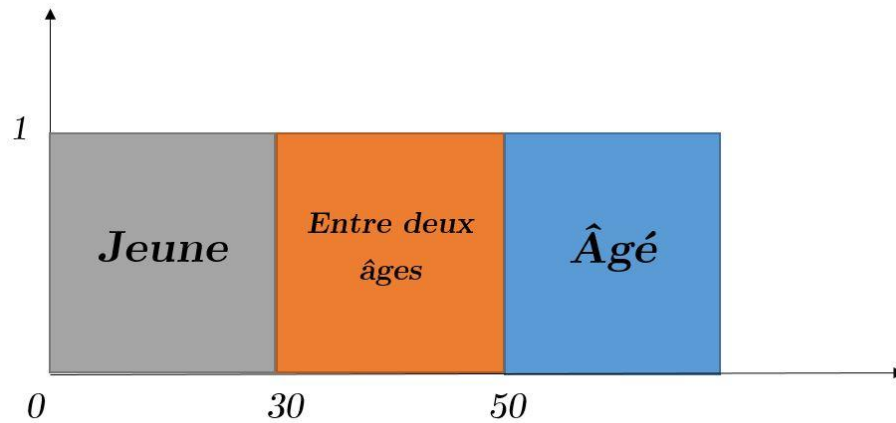


Figure 3.1. Classification selon la logique classique (booléenne).

Avec la logique booléenne une personne jeune est une personne qui a moins de 30 ans, et une personne qui en a entre 30 et 50 est entre deux âges, et celles qui dépassent 50 sont considérées comme âgées.

Contrairement à la logique classique les variables de la logique floue peuvent prendre n'importe quelle valeur entre 0 et 1, on parle alors de fonction d'appartenance, une personne âgée de 35 ans peut être classée jeune et entre deux âges avec des degrés de vérité du coup notre classification peut être exprimée comme le montre la figure 3.2 :

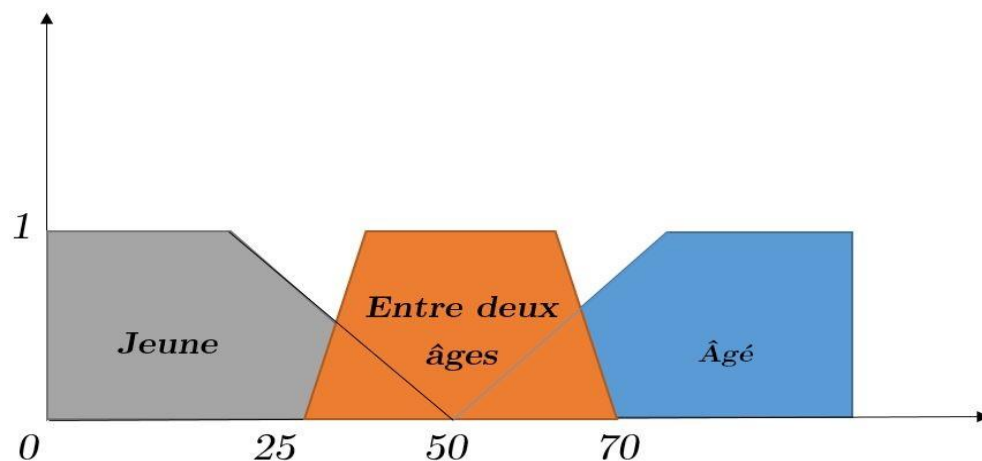


Figure.3.2. Classification selon la logique floue.

Pour représenter les fonctions d'appartenances on utilise plusieurs formes mais le plus souvent on utilise des formes triangulaires, gaussiennes, rectangulaires, et trapézoïdales. Il s'agit des formes les plus simples, et la figure 3.3 représente les formes de ces fonctions d'appartenances.

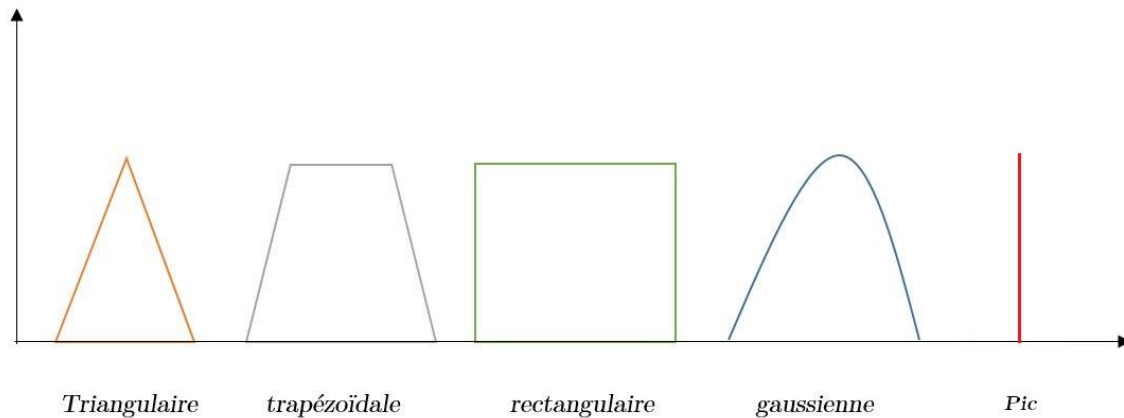


Figure. 3.3. Représentation graphique des formes de bases des fonctions d'appartenance.

Donc l'idée de la logique floue est de traduire le raisonnement humain pour un ordinateur, et de pouvoir traiter des problèmes avec des variables d'entrée imprécises et incomplètes. [15]

3.3.1. Les sous-ensembles flous

Contrairement aux sous-ensembles flous, les sous-ensembles classiques sont appelés sous-ensembles nets par opposition à flou, tandis que les sous-ensembles classiques ont une limite nette et précise les sous-ensembles flous ont une limite indéfinie, floue la figure.3.4 nous montre cette différence entre les deux sous-ensembles.

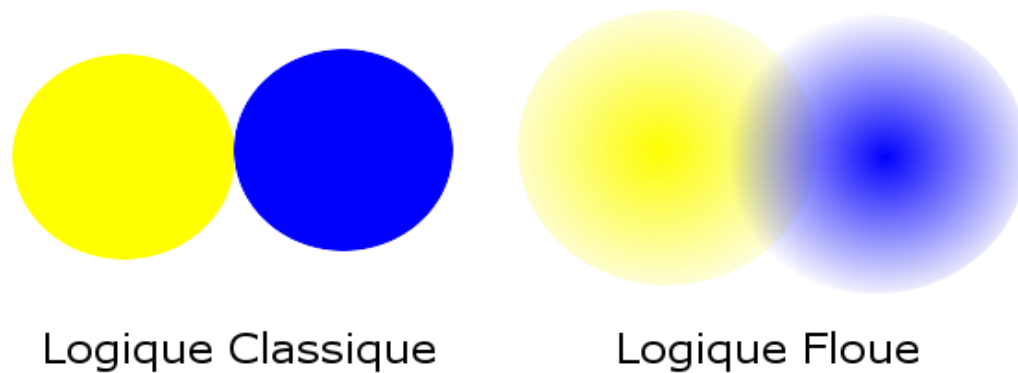


Figure.3.4. Représentation graphique d'un sous-ensemble classique et d'un sous-ensemble flou.

Pour mieux comprendre on reprend notre premier exemple du conducteur :

Première entrée : la couleur du feu. Sous-ensembles : vert, orange et rouge.

Deuxième entrée : la vitesse de la voiture. Sous-ensembles : élevé, moyenne et faible

Troisième entrée : la distance de la voiture du feu. Sous-ensembles : loin et proche

Sortie : la réaction du conducteur. Sous-ensembles : freiner fort, freiner doucement, maintenir sa vitesse et accélérée.

3.3.2. Variables linguistiques

L'imprécision de descriptions de certaines situations, de phénomènes ou de grandeurs physiques ne peut se faire que par des expressions relatives ou floues à savoir (chaud, froid, grand, petit, proche, loin, ...). Ces différentes classes d'expressions floues dites ensembles flous forment ce qu'on appelle des variables linguistiques.

Afin de pouvoir traiter numériquement ces variables linguistiques, il faut les soumettre à une définition mathématique à base de fonctions d'appartenance qui montrent le degré de vérification de ces variables linguistiques relativement aux différents sous-ensembles flous de la même classe.

3.3.3. Opérateurs flous

Plusieurs opérateurs sont utilisés dans la logique classique tel que l'union, l'intersection et le complément, pareillement dans la logique floue on utilise les mêmes opérateurs, cependant les opérations sur les ensembles flous ne peuvent pas être définies de la même manière que celle des

ensembles classiques, [16] et il existe plusieurs variantes de ces opérateurs mais les plus utilisées sont celle de « Zadeh » qu'on pourra décrire comme suit :

Soit deux ensembles A et B, l'union est définie comme étant le plus grand ensemble flou contenant A et B, l'intersection est définie comme le plus petit ensemble flou contenu dans A et dans B on peut écrire ça autrement :

$$\begin{aligned}\mu_{A \cup B} &= \max(\mu_A, \mu_B) \\ \mu_{A \cap B} &= \min(\mu_A, \mu_B)\end{aligned}\quad (3.1)$$

Le complément d'un ensemble flou A est défini comme suit :

$$\mu_{\bar{A}} = 1 - \mu_A \quad (3.2)$$

La base de règles floues est l'outil le plus utilisé dans la logique floue, une base de règles floues est composée de règles qui sont généralement décrites comme suit :

Opération : Si condition ET Condition, Alors Conséquence.

3.4. Description et structure d'une commande par logique floue

Contrairement aux commandes à base de logique classique, les commandes à base de logique floue n'utilisent pas de relations mathématiques bien précises, par contre elles s'appuient sur la manipulation des inférences avec plusieurs règles floues à base des opérateurs flous ET, OU, ALORS ... etc. Appliquées à des variables linguistiques. [16]

Dans un régulateur flou on peut retrouver trois parties principales constituant la structure de ce dernier (figure.3.5).

- ✓ Une interface de Fuzzification.
- ✓ Un mécanisme d'Inférence.
- ✓ Une interface de Défuzzification.

La figure 3.5 représente le schéma explicatif d'un régulateur flou à deux entrées et une sortie où x_1 et x_2 représentent les variables d'entrée et « y » la commande.

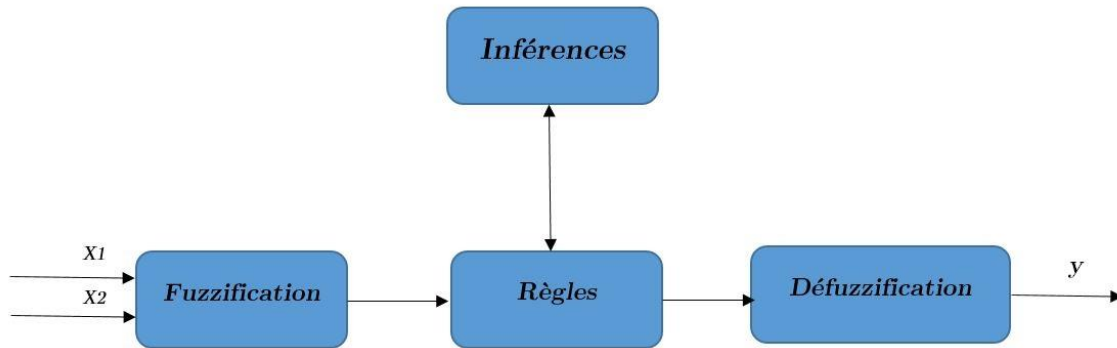


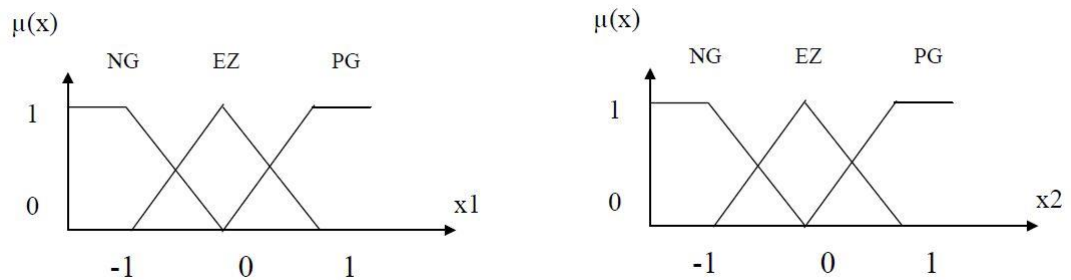
Figure.3.5. Structure interne d'un régulateur flou.

3.4.1. Interface de fuzzification

La fuzzification est une opération qui consiste à transformer les données numériques d'un phénomène en valeurs linguistiques sur un domaine normalisé pour faciliter le calcul. Grâce à ces domaines numériques qui sont appelés univers de discours, on pourra calculer les degrés d'appartenance des sous-ensembles flous de la variable linguistique pour chaque grandeur d'entrée ou de sortie. [17]

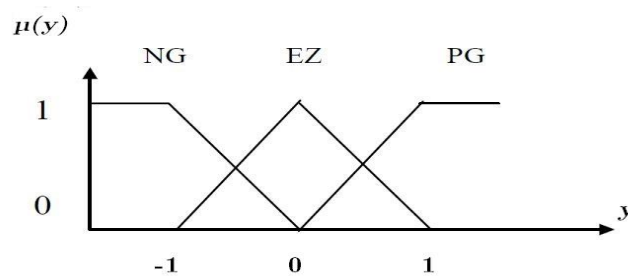
Considérons un contrôleur flou de la tension de sortie moyenne d'un hacheur qui possède deux entrées : l'erreur de la tension de sortie du convertisseur par rapport à la consigne qui est défini comme suit : $x_1 = e = v_{ref} - v_s$ et la variation de cette erreur est défini comme suit : $x_2 = \Delta e$

Les fonctions d'appartenance de ces deux variables linguistique normalisées est représenté dans la figure 3.6 qui est constitué de trois sous-ensembles flou {Négatif Grand(NG), Environ de Zéro(EZ) et positif grand(PG)}.

Figure.3.6. Fonction d'appartenance des deux variables linguistiques d'entrées x_1 et x_2 .

La variation du rapport cyclique du convertisseur est générée par la sortie du régulateur flou qui est la troisième variable linguistique du régulateur et qui est aussi normalisée. A titre d'exemple ses fonctions d'appartenance sont représentées dans la figure 3.7 :

Figure. 3.7. Fonction d'appartenance de la variable linguistique de sortie normalisée (y).



3.4.2. Mécanisme d'inférence

Cette étape consiste à relier les variables physiques d'entrée du régulateur (grandeurs mesurées ou estimées), qui sont transformées en variables linguistiques pendant l'étape de fuzzification, et la variable de sortie du contrôleur sous sa forme linguistique, par des règles mentales traduisant une action ou une décision linguistique sur la commande à la sortie du régulateur, face à toute situation se présentant à l'entrée de ce régulateur.

Ces inférences sont basées sur plusieurs règles établies par l'expertise et le savoir-faire humain concernant le système à régler. Elles sont structurées sous forme compacte dans une matrice multidimensionnelle dite matrice d'inférence.

On exprime les inférences généralement par une description linguistique et symbolique à base de règles pré définies dans la matrice d'inférence. Chaque règle est composée d'une condition précédée de l'opérateur 'SI' appelée prémisse, et d'une conclusion (action, décision, opération ou commande) précédée de l'opérateur 'ALORS'. [17]

Différentes méthodes existent pour le traitement numérique des règles d'inférences qui permet d'obtenir la sortie linguistique ou floue du régulateur et on cite principalement :

- ✓ La méthode d'inférence max-min.
- ✓ La méthode d'inférence max-prod.
- ✓ la méthode d'inférence somme-prod

Chacune de ces méthodes utilise un traitement numérique propre à elle, qu'on va essayer d'expliquer :

Pour la méthode d'inférence max-min, l'opérateur ET est réalisé par la formation du minimum, l'opérateur OU est réalisé par la formation du maximum, et ALORS (l'implication) est réalisée par la formation du minimum.

Pour la méthode d'inférence max-prod, l'opérateur ET est réalisé par la formation du produit, l'opérateur OU est réalisé par la formation du maximum, et ALORS (l'implication) est réalisée par la formation du produit.

Pour la méthode d'inférence somme-prod, on réalise au niveau de la condition, l'opérateur OU par la formation de la somme (valeur moyenne), et l'opérateur ET par la formation du produit. Pour la conclusion, l'opérateur ALORS est réalisé par un produit.

3.4.3. Interface de défuzzification

La défuzzification est une étape qui consiste à déduire une valeur numérique précise de la sortie du régulateur (y) à partir des résultats obtenus dans l'étape d'inférence. Il existe plusieurs méthodes et les plus couramment utilisées sont :

- ✓ La méthode du centre de gravité.
- ✓ La méthode du maximum.
- ✓ La méthode des surfaces.
- ✓ La méthode des hauteurs.

La méthode du centre de gravité étant la plus utilisée on va essayer de la présenter brièvement dans ce qui suit : la méthode consiste à déterminer le centre de gravité de la fonction d'appartenance résultante de la méthode d'inférence. Il suffira de calculer l'abscisse du centre de gravité, pour déterminer ce dernier on s'appuie sur la relation générale suivante :

$$CDG = y_g = \frac{\int y \cdot \mu(y) \cdot dy}{\int \mu(y) \cdot dy} \quad (3.3)$$

3.5. MPPT floue

Grace à l'évolution des microcontrôleurs les commandes à base de logique floue sont beaucoup plus utilisées dans plusieurs domaines et deviennent au fil du temps très populaires. L'avantage de cette technique qu'on a vu déjà est qu'elle peut fonctionner dans des systèmes avec des valeurs d'entrées peu précises et sans avoir besoin de modèle mathématique de grande précision, de plus elles peuvent traiter des non linéarités. [18]

Le principe d'une commande flou se base principalement sur deux variables d'entrées qui sont l'erreur E et la variation d'erreur ΔE et une variable de sortie ΔD (variation du rapport cyclique). La valeur de la variable de sortie qui pilote le convertisseur statique pour rechercher le point de puissance maximum est déterminé à l'aide d'une table de vérité et de l'évolution des paramètres d'entrée.

3.5.1. Principe de la commande MPPT flou

Dans ce qui suit nous allons détailler les étapes de la conception d'un contrôleur flou dans le but d'une poursuite du point de puissance maximum. Comme nous l'avons présenté précédemment le contrôleur flou comporte trois blocs, donc trois étapes qui consiste en la fuzzification des variables d'entrées par l'utilisation des fonctions d'appartenance, ensuite l'inférence ou les variables fuzzifiées sont comparées avec des ensembles prédéfinis pour déterminer la repense appropriée, et enfin la défuzzification pour convertir les sous-ensembles fuzzifiés en valeurs. La structure de base de notre contrôleur flou est présentée dans la figure 3.8.

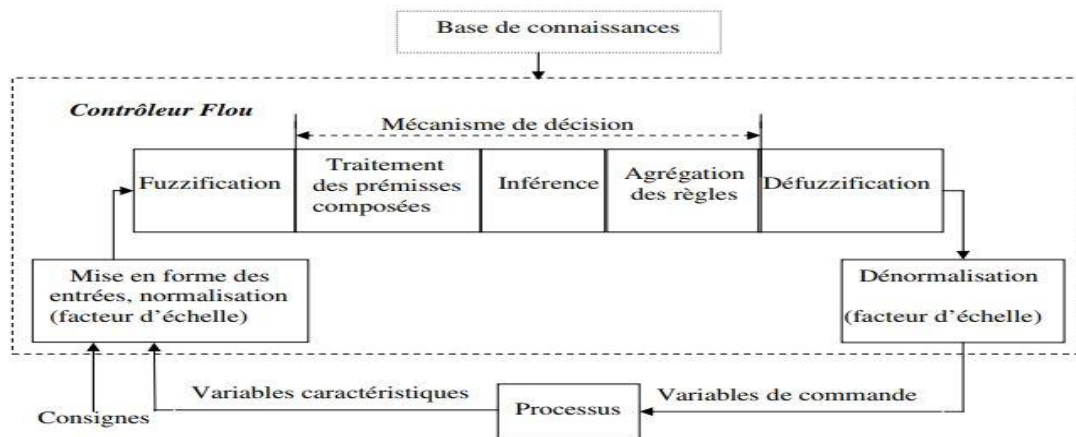


Figure. 3.8. Schéma de base d'un contrôleur flou.

3.5.1.1. Fuzzification

L'objectif de la fuzzification est de définir les fonctions d'appartenance pour les différentes variables qui permet de rendre flou les variables d'entrée. Une étape préliminaire consiste à définir un intervalle de variation maximale autorisée pour les variables d'entrées. Le but de la fuzzification est de transformer les variables d'entrée en variables linguistiques ou variables floues. Dans notre cas, on a deux variables d'entrées qui sont l'erreur $E(k)$ et la variation d'erreur $\Delta E(k)$ à l'instant d'échantillonnage k qui sont définis comme suit :

$$E(k) = \frac{P(k) - P(k-1)}{V(k) - V(k-1)} \quad (3.4)$$

$$\Delta E(k) = E(k) - E(k-1) \quad (3.5)$$

Où $P(k)$ est la puissance du générateur photovoltaïque et $V(k)$ la tension du générateur photovoltaïque par conséquent :

$E(k)$ est égal à zéro au niveau du point de puissance maximum du générateur photovoltaïque, ces variables d'entrée sont exprimées en termes de variables linguistiques telles que NG (négatif grand), NP (négatif petit), EZ (égale à zéro), PP (positif petit), PG (positif grand). [18]

3.5.1.2. Méthode d'inférence

La stratégie de réglage dépend des inférences adoptées. Elles lient les variables d'entrée à une variable de sortie. Cette étape consiste à définir un rapport logique entre les entrées et la sortie.

Le tableau suivant montre les règles du contrôleur flou, où toutes les entrées de la matrice sont les ensembles flous de l'erreur (E), la variation d'erreur (ΔE) et la variation du rapport cyclique (ΔD) du convertisseur statique.

La règle de commande doit être conçue pour que la variable d'entrée (E) soit toujours égale à zéro.

Tableau. 3.2. Règles d'inférence. [19]

ΔE					
E	NG	NP	EZ	PP	PG
NG	EZ	EZ	PG	PG	PG
NP	EZ	EZ	PP	PP	PP
EZ	PP	EZ	EZ	EZ	EZ
PP	NP	NP	NP	EZ	EZ
PG	NG	NG	NG	EZ	EZ

Alors que l'erreur permet de définir la position du point de fonctionnement de la manière suivante. A gauche du point de fonctionnement de la courbe l'erreur est toujours positive. Et à droite du point de fonctionnement il est toujours négatif.

La variation de l'erreur permet de définir le sens du déplacement du point de fonctionnement sur la courbe. Elle est positive au sens correct vers le MPP, et négative au sens inverse.

Dans les inférences on utilisera des opérateurs flous tel que ET, OU, l'opérateur ET est utiliser à l'intérieur d'une règle, tandis que l'opérateur OU lie les différentes règles, et dans notre étude on va s'appuyer sur la méthode d'inférence max-min.

3.5.1.2.1. Méthode d'inférence max-min

Pour cette méthode d'inférence l'opérateur ET est réalisé par la formation du minimum, l'opérateur OU est réalisé par la formation du maximum, et ALORS (l'implication) est réalisée par la formation du minimum.

Nous expliquerons le principe dans la figure suivante :

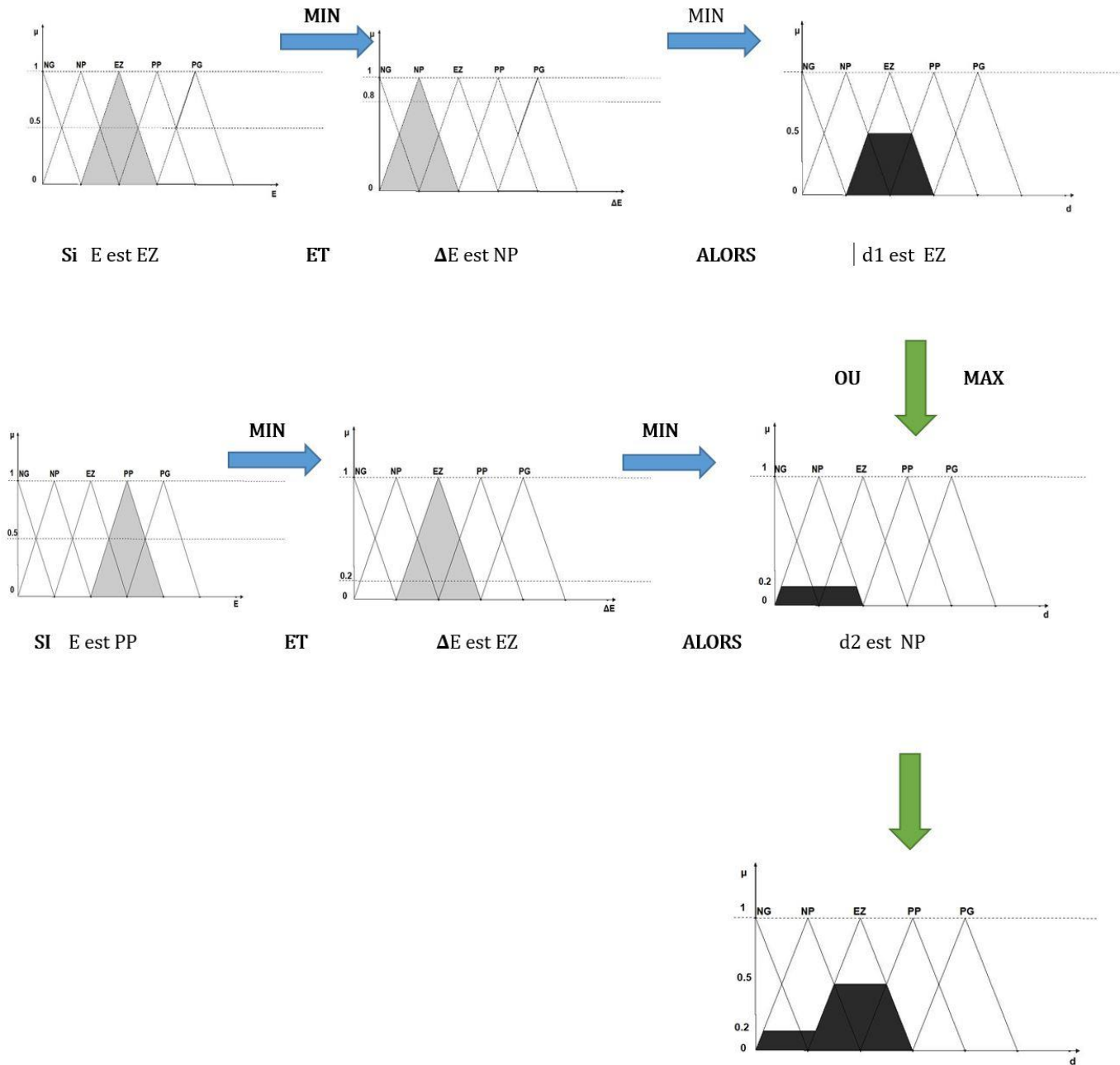


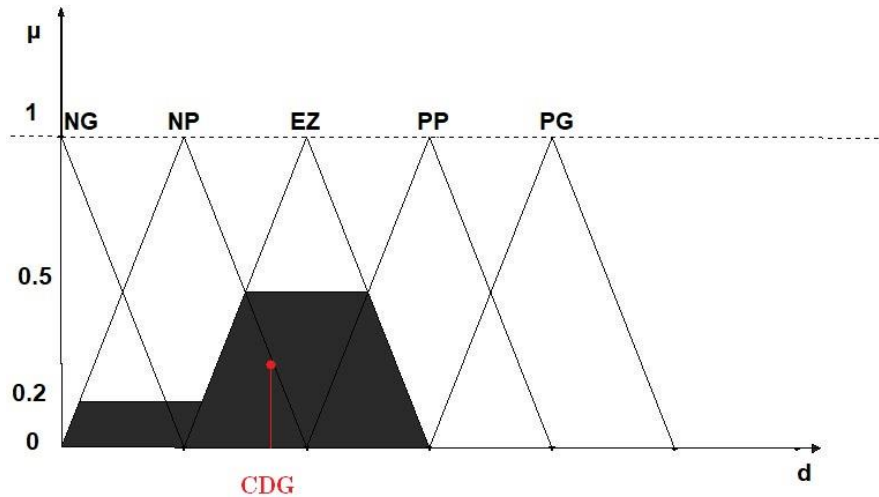
Figure. 3.9. Méthode d'inférence max-min.

3.5.1.3. Défuzzification

Enfin, il nous faut réaliser l'opération inverse de la fuzzification, ici nous devons calculer une valeur numérique compréhensible par l'environnement extérieur à partir d'une définition floue est c'est le but de la défuzzification

La défuzzification pourra être réalisé grâce à la méthode du centre de gravité cité précédemment

Figure. 3.10. Méthode du centre de gravité.



3.6. Conclusion

La logique floue étant un outil de l'intelligence artificielle elle présente de nombreux avantages que sa rapidité et sa précision aussi sa capacité d'adaptation à tout environnement, ce qui la distinguent de la logique classique et qui nous pousse à la choisir dans le traitement de données.

Dans ce chapitre on a introduit la logique floue et expliquer le principe de son fonctionnement ensuite on a présenté la commande MPPT à base de logique floue et son fonctionnement.

Chapitre 4

Simulation et évaluation des résultats

4.1. Introduction

Dans le présent chapitre nous allons montrer les différentes simulations effectuées sur un système photovoltaïque constitué d'un panneau PV, un convertisseur DC/DC et une charge résistive. Le convertisseur DC/DC est piloté par une commande MPPT permettant une meilleure adaptation source/charge, pour une extraction maximum de puissance.

Les résultats figurant dans ce chapitre proviennent de la simulation avec différentes méthode MPPT dont la méthode P&O (perturber et observer) présentée dans le chapitre 2 et la méthode à base de logique floue présentée dans le chapitre 3, donc on va faire une étude comparative entre les deux méthodes précédentes et de déterminer la méthode la plus appropriée à notre application qui doit répondre aux exigences de rapidité de convergence vers un nouveau MPP (point de puissance maximum) causé par un changement éventuel des conditions de fonctionnement de notre système soit un changement d'ensoleillement, de température ou bien de la charge.

4.2. Caractéristique d'un panneau photovoltaïque face à différentes températures et d'ensoleillement

4.2.1. Caractéristique d'un panneau photovoltaïque face à différentes températures

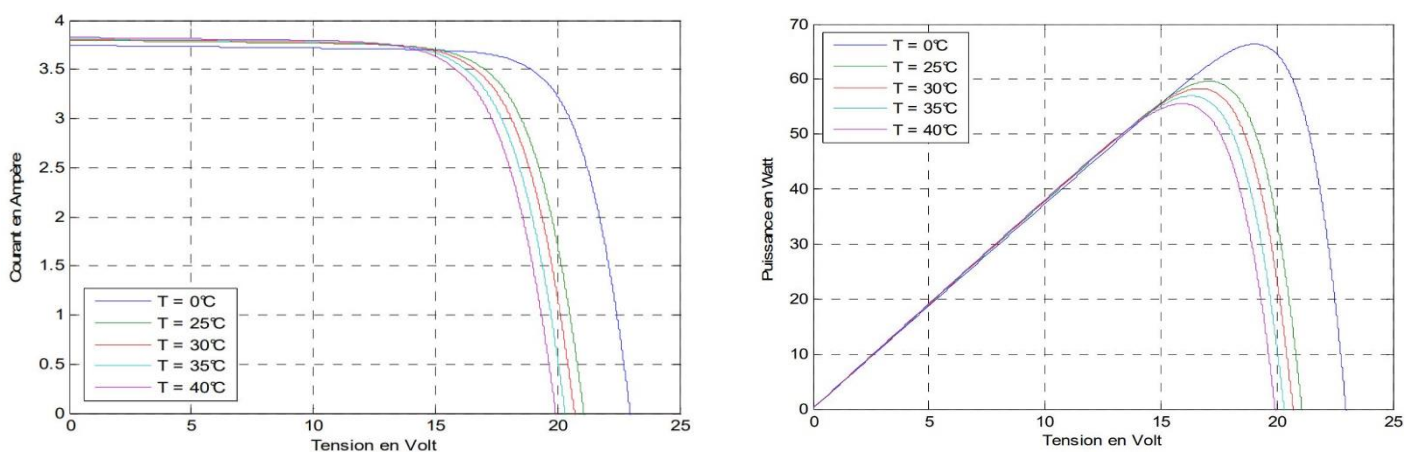


Figure 4.1 : caractéristiques I(V) et P(V) face à différentes températures

De la figure 4.1 on constat que le panneau photovoltaïque est sensible à la température de l'environnement de fonctionnement, aussi on remarque que la tension du PV varier beaucoup plus que son courant.

4.2.2. Caractéristique d'un panneau photovoltaïque face à différents ensoleillement

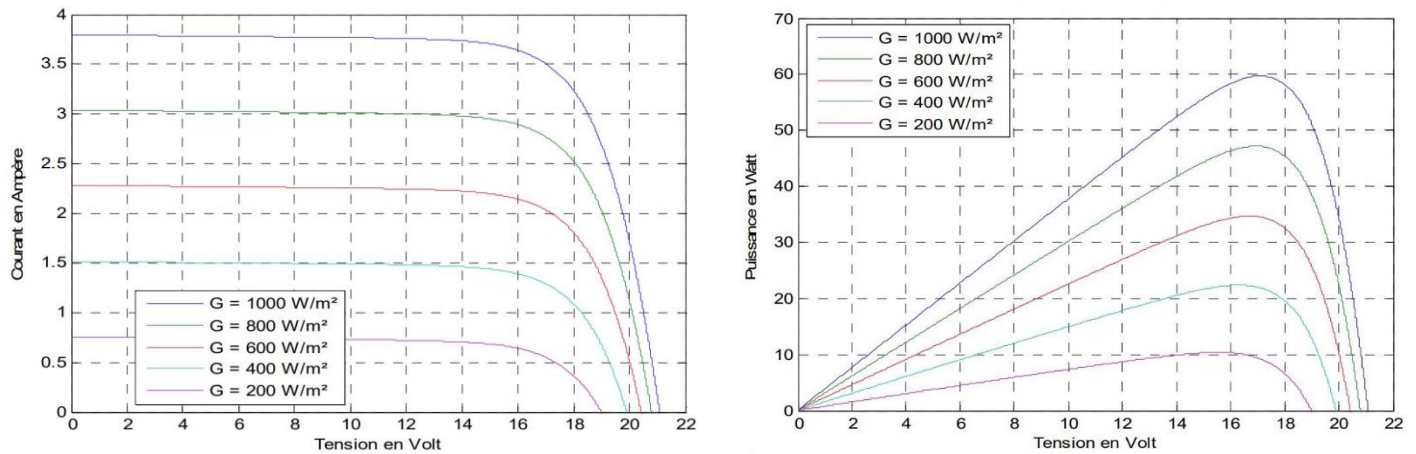


Figure 4.2 : caractéristiques I(V) et P(V) face à différentes ensoleillement

De la figure 4.2 on constat que le panneau photovoltaïque réagit différemment face à différents degrés d'ensoleillement, aussi on remarque que le courant du PV varier beaucoup plus que sa tension

4.3. Résultat de simulation pour la commande MPPT P&O (perturber et observer)

4.3.1. Comportement face à une variation d'ensoleillement

Dans un premier lieu on va étudier le comportement de notre système face à un changement d'ensoleillement géré par l'algorithme P&O, cette méthode a été simulé en utilisant un convertisseur DC/DC de type survolteur (BOOST) et relié a une charge résistive, avec une température constante de 25°C et une diminution d'ensoleillement progressive de 1000w/m² jusqu'à 500w/m² cette variation est illustré dans la figure 4.3, cette diminution d'ensoleillement cause évidemment une diminution de puissance.

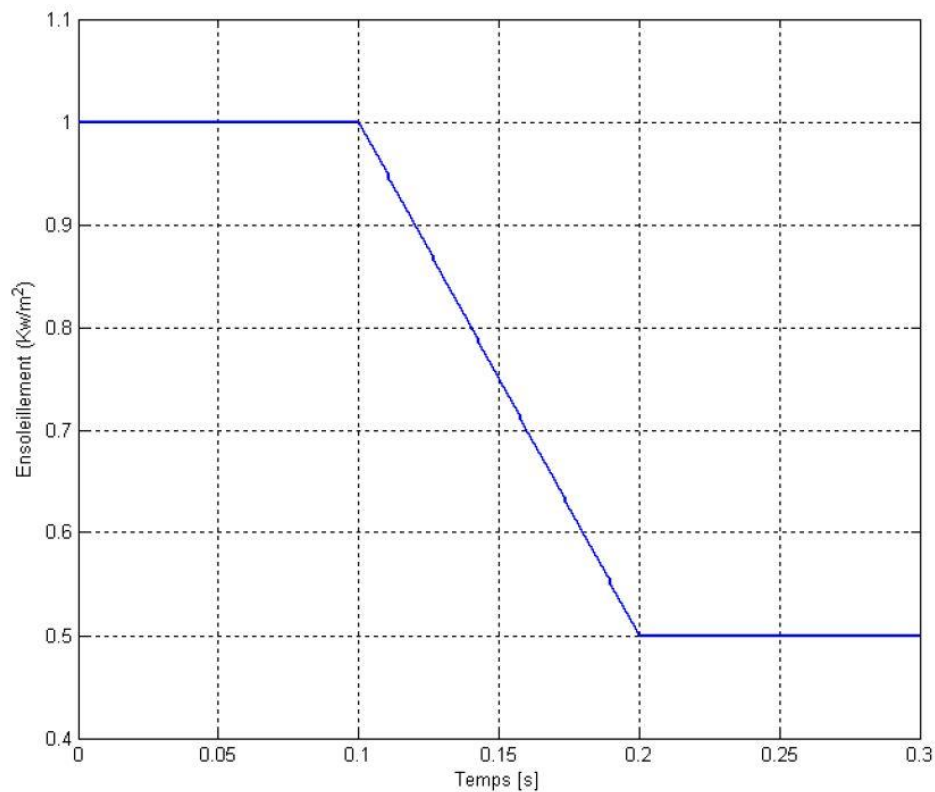


Figure 4.3 variation de l'ensoleillement de 1000w/m^2 jusqu'à 500w/m^2

Avec cette diminution d'ensoleillement on affiche la variation de la tension du panneau PV, la tension de la charge et le comportement du rapport cyclique D tout cela représenté dans la figure 4.2

De la figure 4.4 on remarque que la tension de la charge malgré une légère diminution du au changement d'ensoleillement elle reste plus élevée que la tension du générateur PV et ceci est dû à l'effet survolteur du convertisseur boost, quant au rapport cyclique du contrôleur P&O présente une fréquence d'oscillation plus importante suite à la diminution de l'ensoleillement.

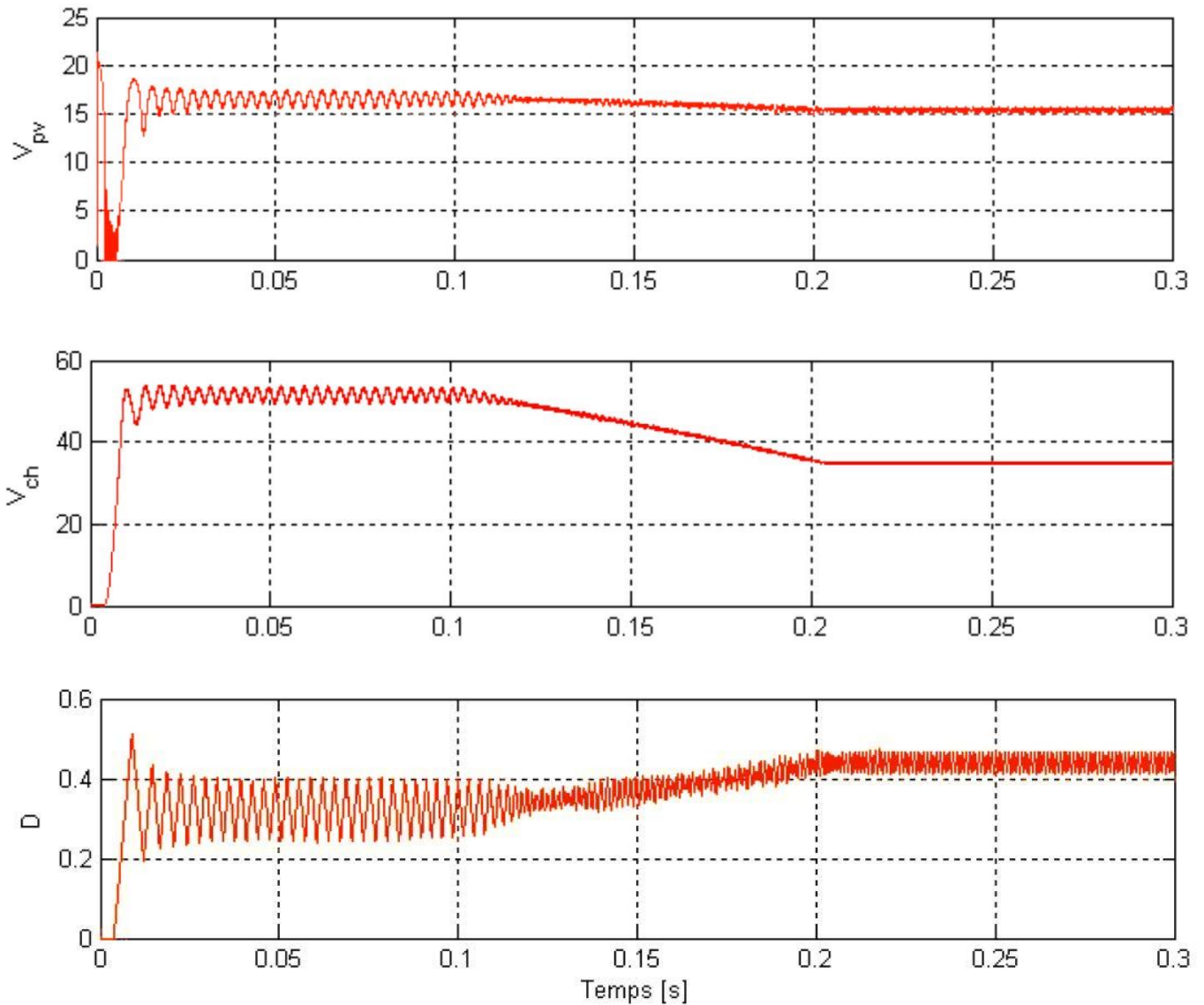


Figure 4.4 : tension du générateur PV, tension de la charge, et du rapport cyclique face à une diminution d'ensoleillement avec un MPPT P&O.

Dans les mêmes conditions que pour la première simulation et avec une commande MPPT P&O (perturber et observer), on étudie les courbes de puissance de la charge et du générateur PV.

La figure 4.5 nous montre l'effet de diminution rapide de la puissance du générateur PV causé par la diminution de l'ensoleillement. Dans ce cas cette technique continue à perturber le système dans le même sens que la dernière perturbation avant le changement d'éclairement, ce qui engendre une déviation du point de fonctionnement du véritable MPP.

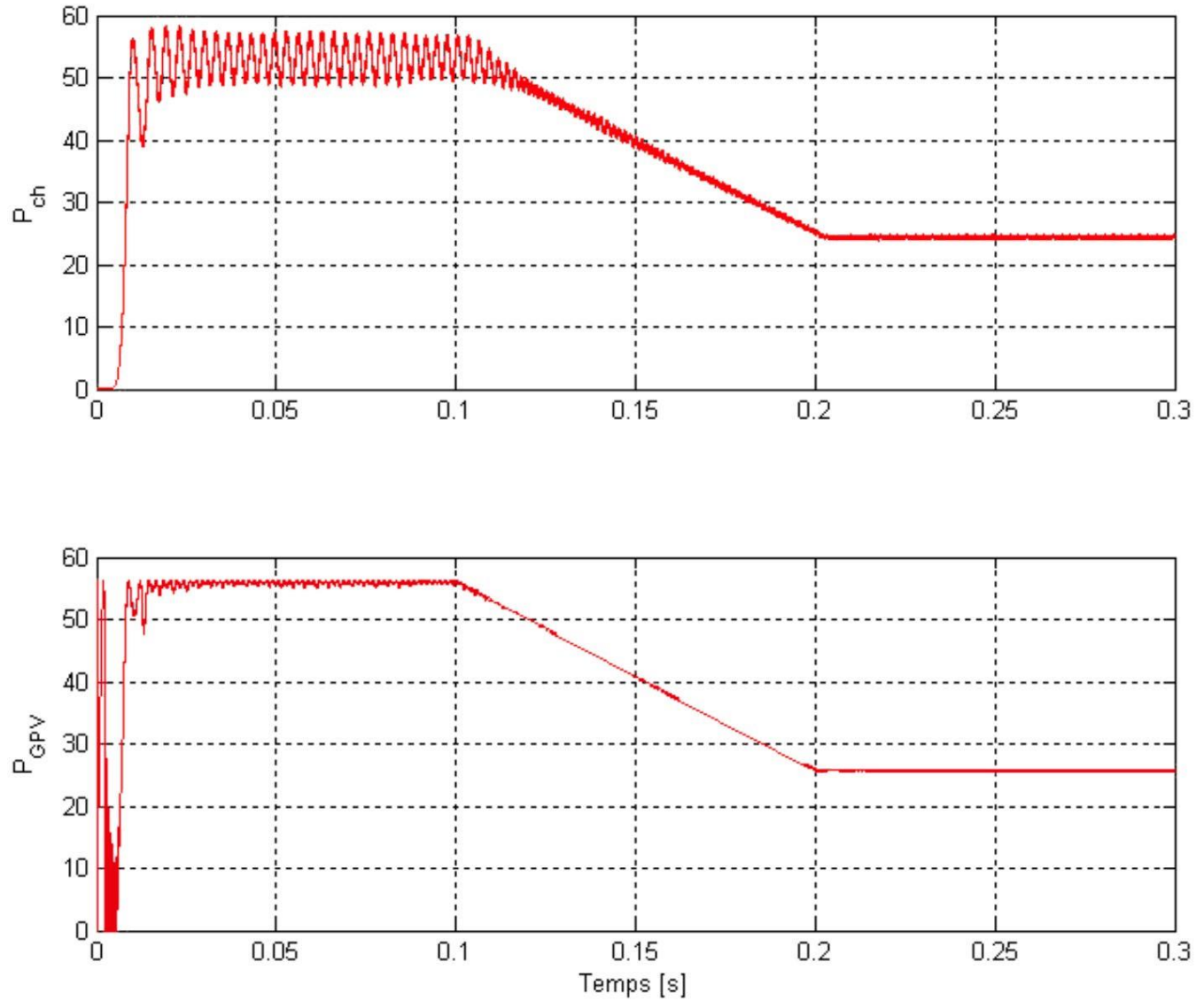


Figure 4.5 : puissance du générateur PV et la puissance de la charge face à une diminution d'enseillement avec un MPPT P&O.

4.3.2. Comportement face à une variation de température

Après la simulation avec des changements d'enseillements on passe maintenant à la variation de température, et pour cela on fait subir à notre système une diminution de température allant de 25°C jusqu'à 10°C , avec un enseillement stable de $1000\text{w}/\text{m}^2$, cette variation est illustré dans la figure 4.6.

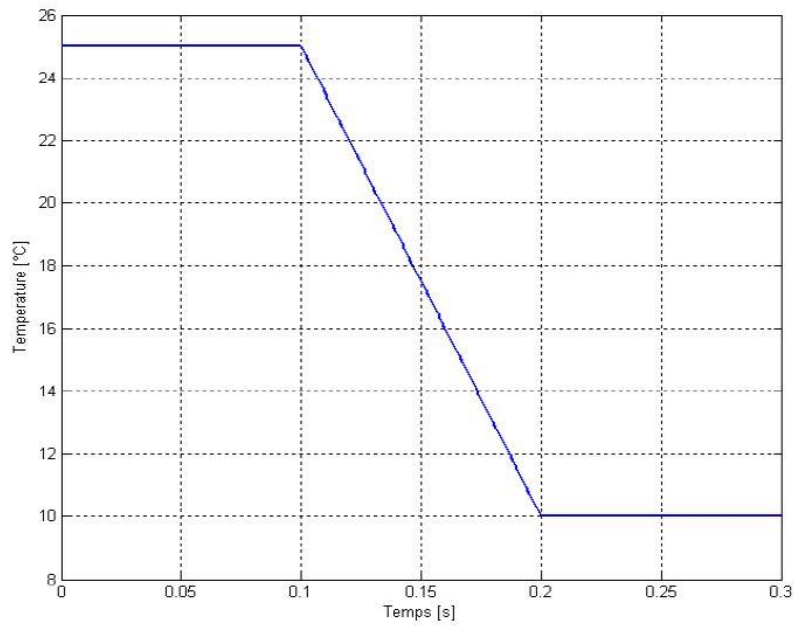


Figure 4.6 : variation de température de 25°C jusqu'à 10°C

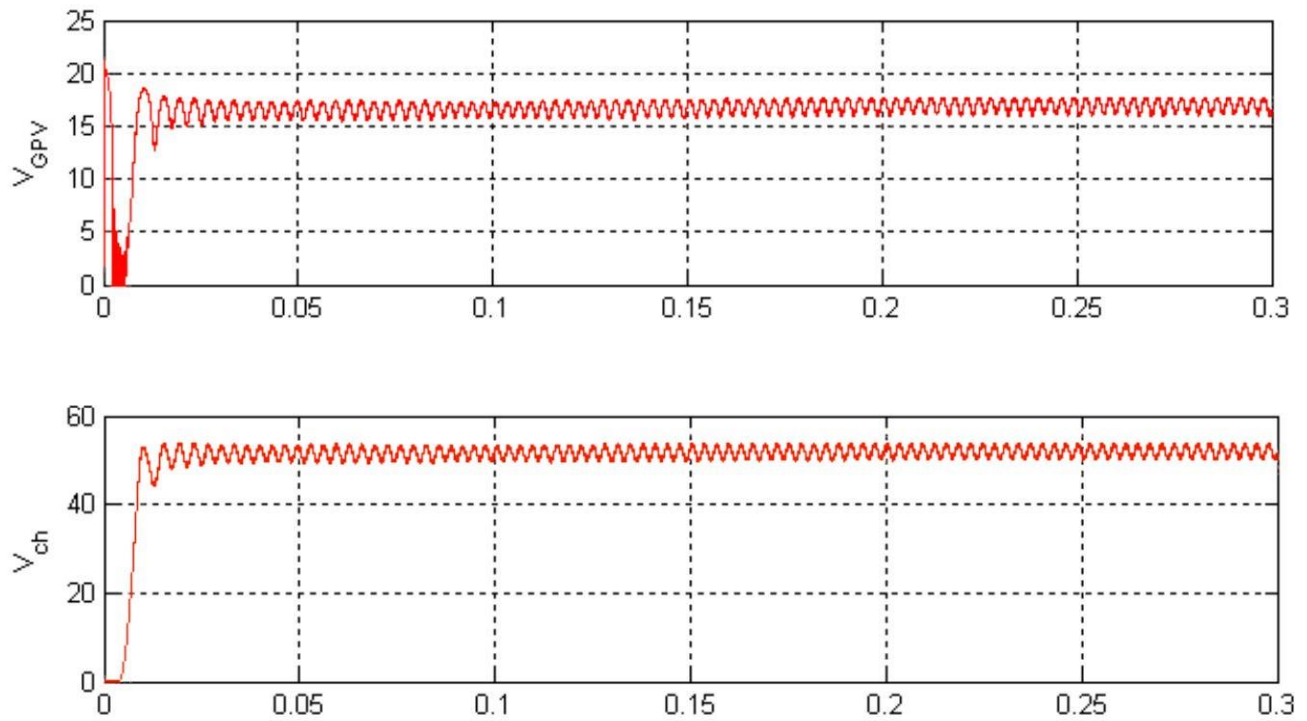


Figure 4.7 : tension du générateur PV et de la charge face à un changement de température avec la commande MPPT P&O

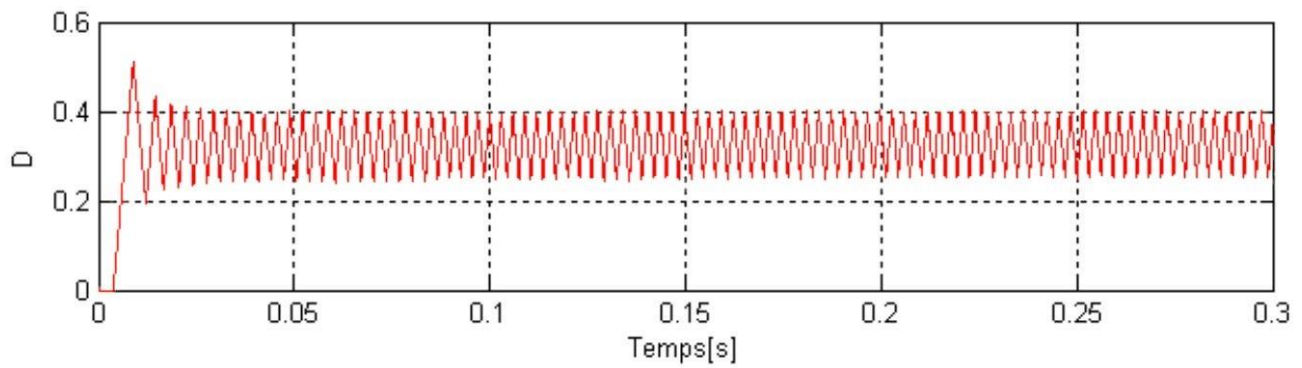


Figure 4.8 : variation du rapport cyclique face à un changement de température avec la commande MPPT P&O

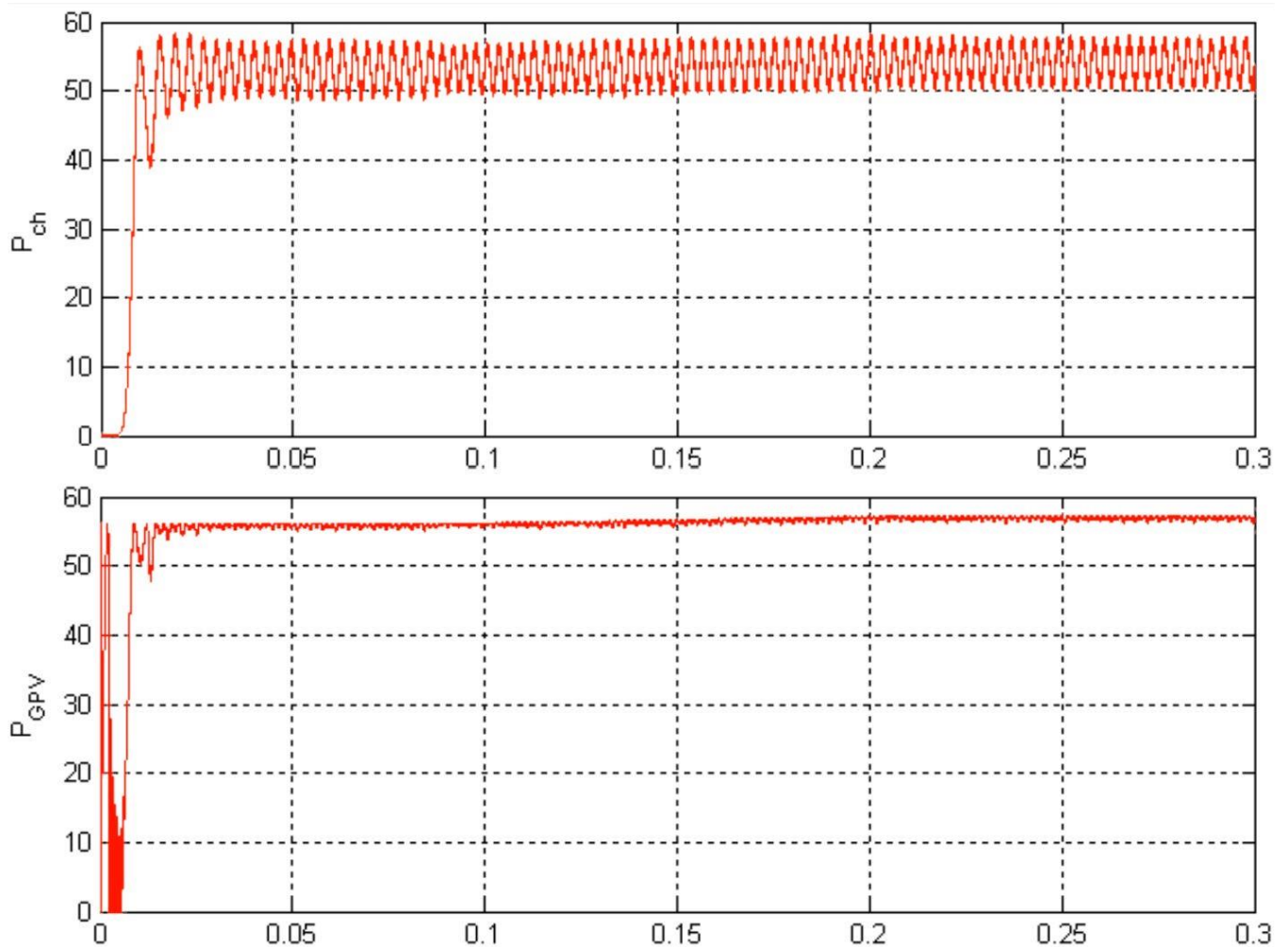


Figure 4.9 : puissance de la charge et la puissance du générateur PV face à une diminution de température avec le MPPT P&O

D'après les figures 4.7, 4.8 et 4.9 on constate presque aucun changement dans les tensions de charge et du générateur PV, de même pour la puissance de la charge hormis une infime augmentation de la puissance du générateur PV.

4.4. Résultats de simulation pour la commande MPPT basé sur la logique floue

4.4.1. Comportement face à une variation d'ensoleillement

La commande suivante est la commande MPPT basé sur la logique floue elle a été simulé en association avec un convertisseur DC/DC boost (survolteur), on commence par une simulation face à une diminution progressive d'ensoleillement qui va de 1000w/m^2 jusqu'à 500w/m^2 avec une température constante, et la figure 4.10 nous montre cette diminution.

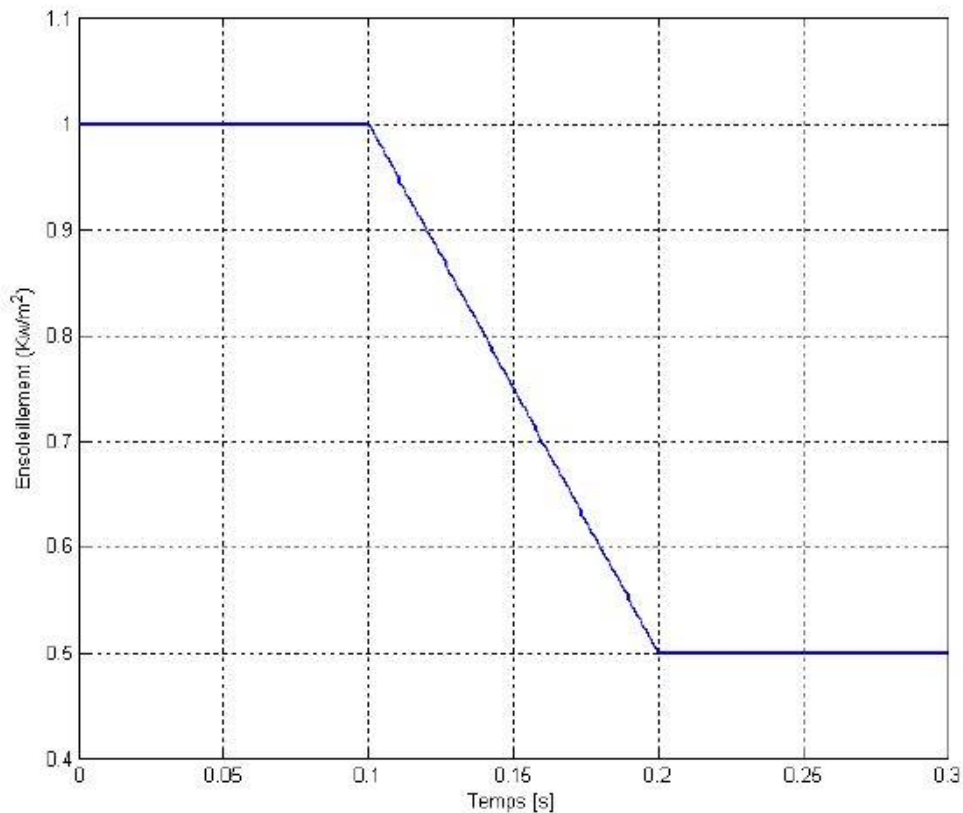


Figure 4.10 : variation d'ensoleillement de 1000w/m^2 jusqu'à 500w/m^2

La tension du générateur PV la tension de la charge ainsi que la variation du rapport cyclique face à une diminution d'ensoleillement et une température fixe, sont représenté sur la figure 4.9.

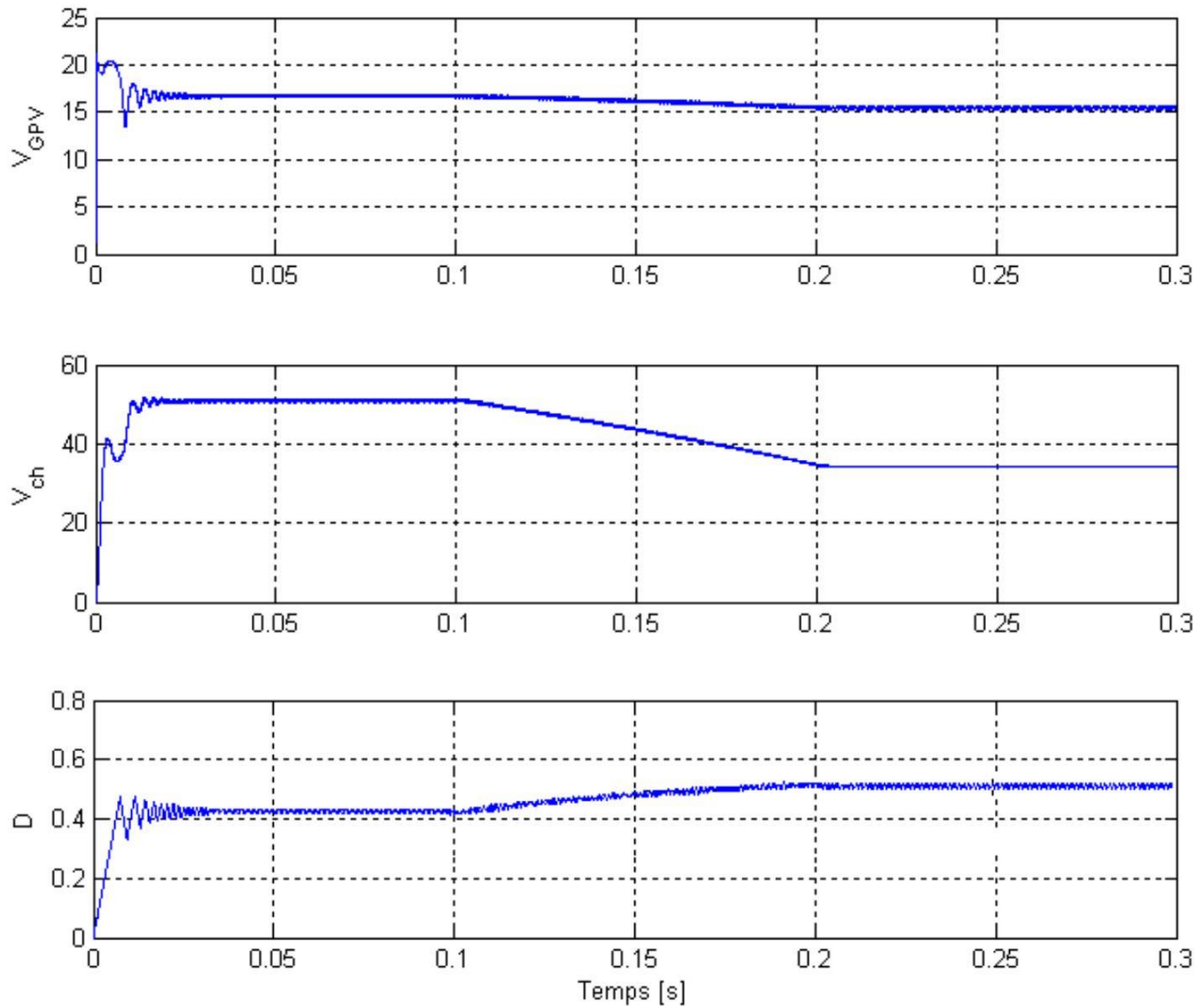


Figure 4.11 : variation de la tension du générateur PV, tension de la charge, et du rapport cyclique face à une diminution d'ensoleillement avec un MPPT fluo

Comme pour la commande MPPT P&O et malgré la diminution d'ensoleillement la tension de la charge reste plus importante que la tension du générateur PV, et ce dû à l'effet du convertisseur élévateur (boost).

Pour les mêmes conditions de fonctionnement, et pour un contrôleur MPPT fluo, on trace les courbes de puissance de la charge et du générateur PV dans la figure 4.11.

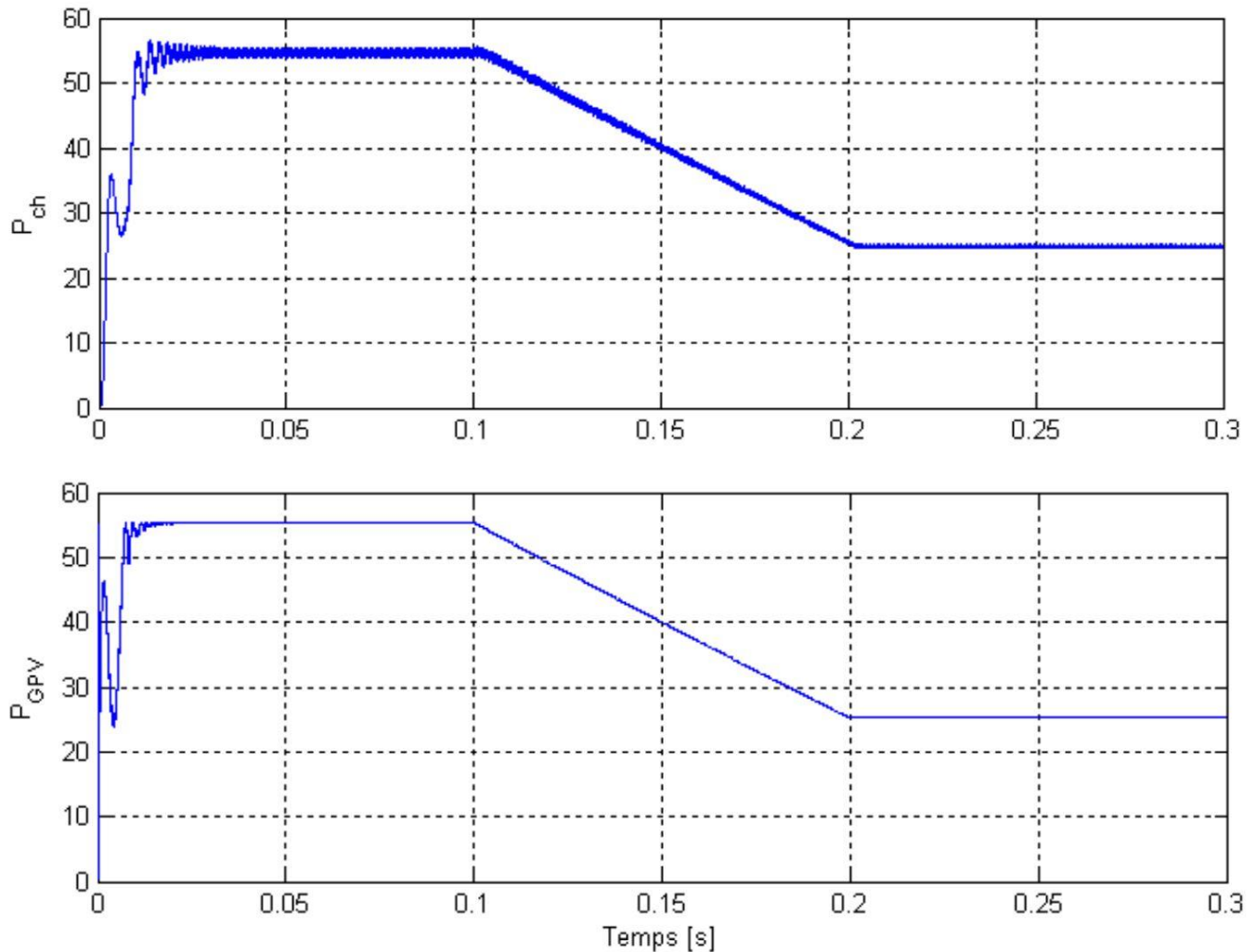


Figure 4.12 : variation puissance de la charge et du générateur PV face à une diminution d'éclairement avec la commande MPPT flou

La figure 4.12 nous montre comment le contrôleur MPPT flou poursuit la diminution d'ensoleillement ce qui a engendré une diminution de puissance.

4.4.2. Comportement face à une variation de température

Après la simulation avec des changements d'ensoleillements on passe maintenant à la variation de température, et pour cela on fait subir à notre système une diminution de température allant de 25°C jusqu'à 10°C, avec un ensoleillement stable de 500w/m², cette variation est illustré dans la figure 4.13.

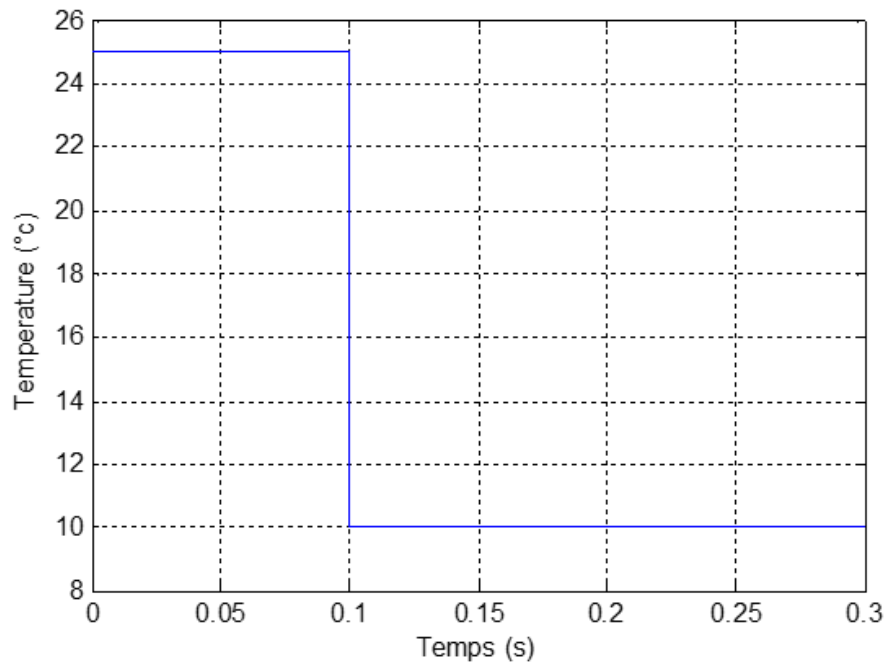


Figure 4.13 : variation de température de 25°C jusqu'à 10°C

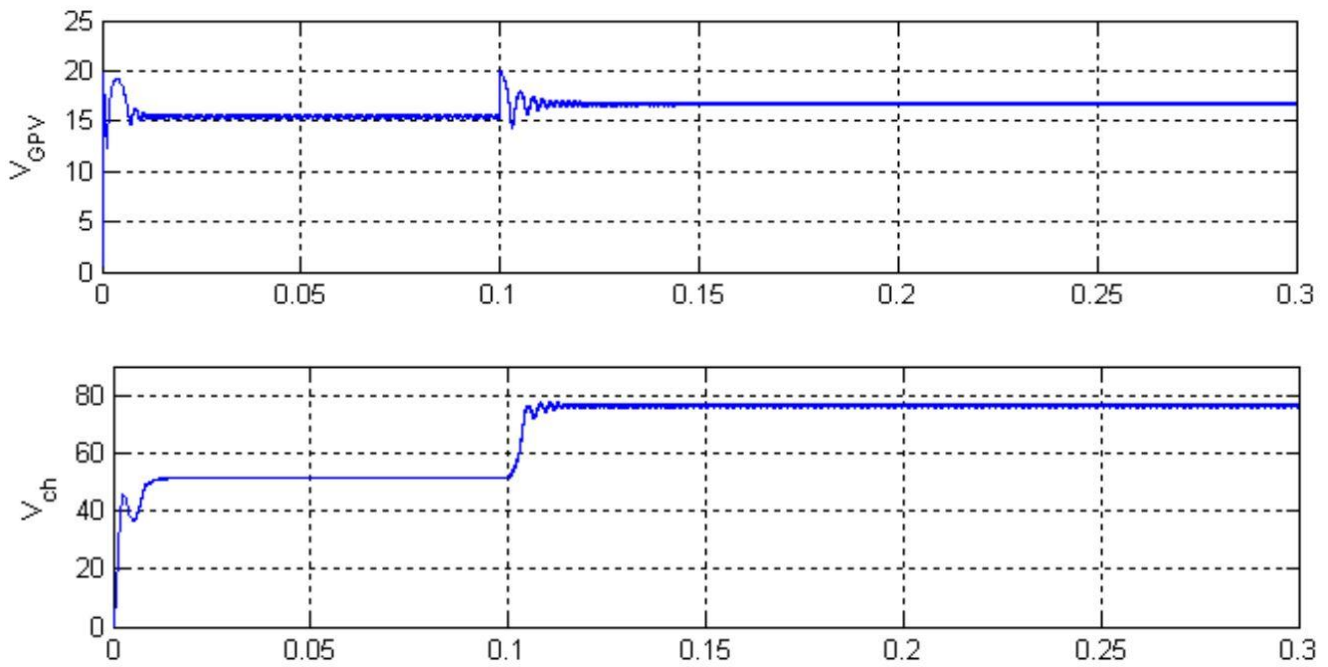


Figure 4.14 : tension du générateur PV et de la charge face à un changement de température avec la commande MPPT fluo

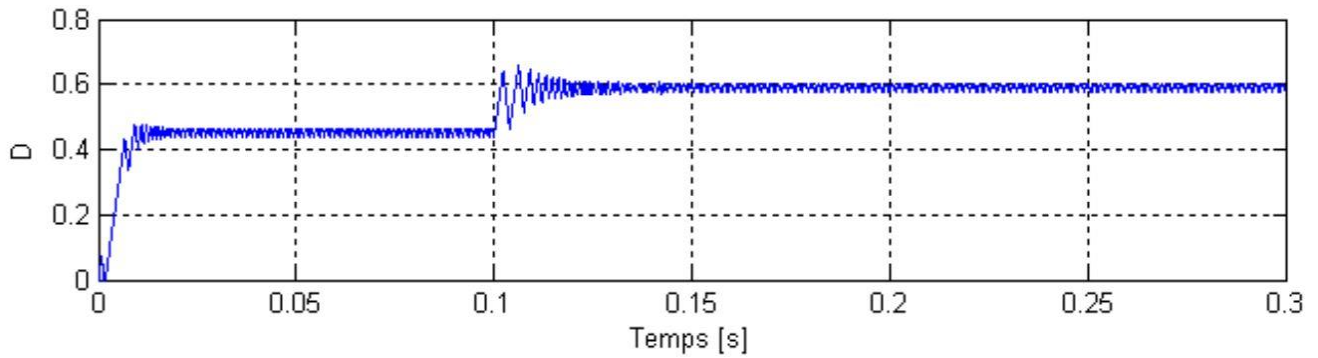


Figure 4.15 : variation du rapport cyclique face à un changement de température avec la commande MPPT flou

De la figure 4.14 on remarque une augmentation notable de la tension de la charge et de la tension du générateur, une augmentation instantanée qui coïncide avec la diminution de température.

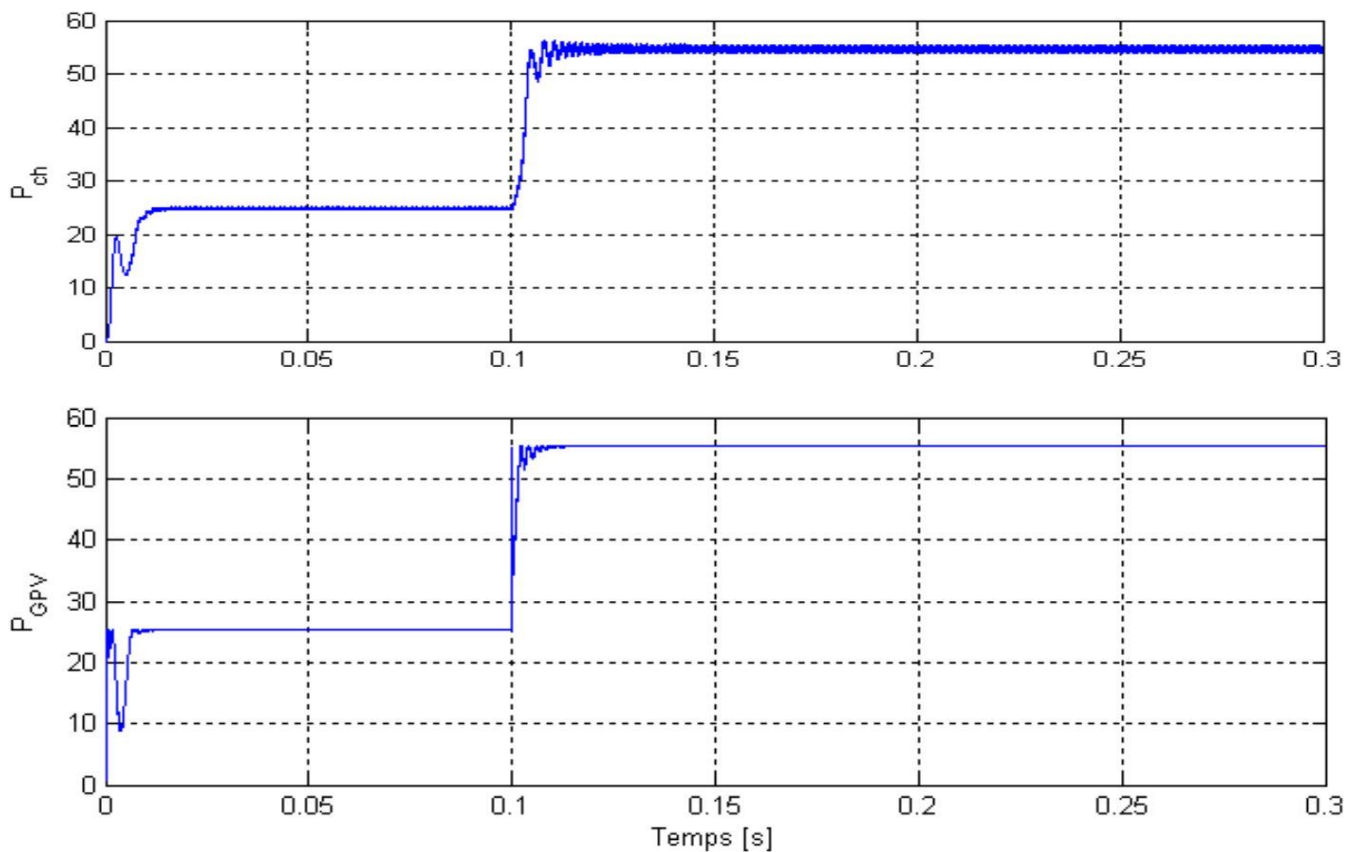


Figure 4.16 : puissance de la charge et la puissance du générateur PV face à une diminution de température avec la commande MPPT flou

De la figure 4.16 on constate que notre système ait un gain de puissance suite à la diminution de température avec la commande MPPT flou.

4.5. Comparaison des deux commande MPPT P&O et MPPT à base de logique floue

Pour une diminution d'ensoleillement qui va de 1000w/m^2 jusqu'à 500w/m^2 et pour les deux commande MPPT P&O et Flou, on obtient les résultats lustrées dans la figure 4.17.

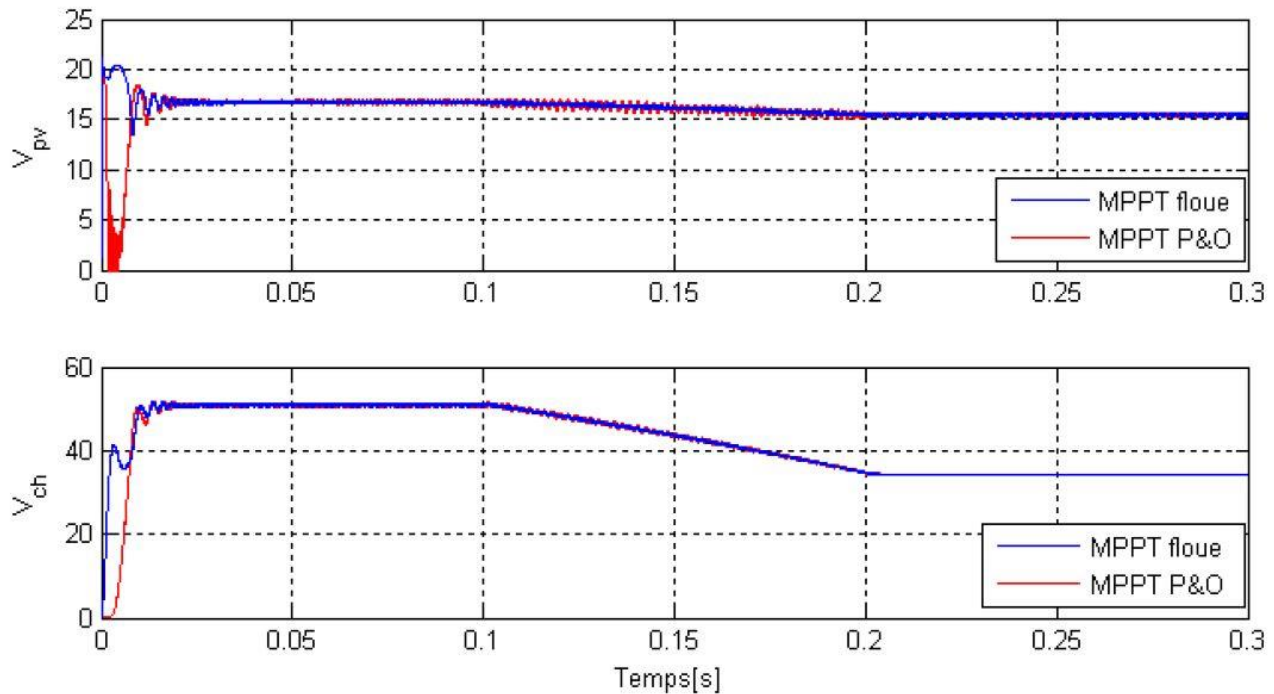


Figure 4.17 : variation de la tension du générateur PV et tension de la charge face à une diminution d'éclairement de 1000w/m^2 jusqu'à 500w/m^2

A partir de la figure précédente on constate bien les avantages de la commande MPPT à base de logique floue, la commande MPPT flou (en bleu) est robuste et présente une plus grande rapidité en terme de temps de repense, et une précision plus accru, donc une erreur très faible en régime stationnaire, par rapport à la commande MPPT P&O, pour mieux voir la différence entre les deux commande on fait un zoom illustrée par la figure 4.18.

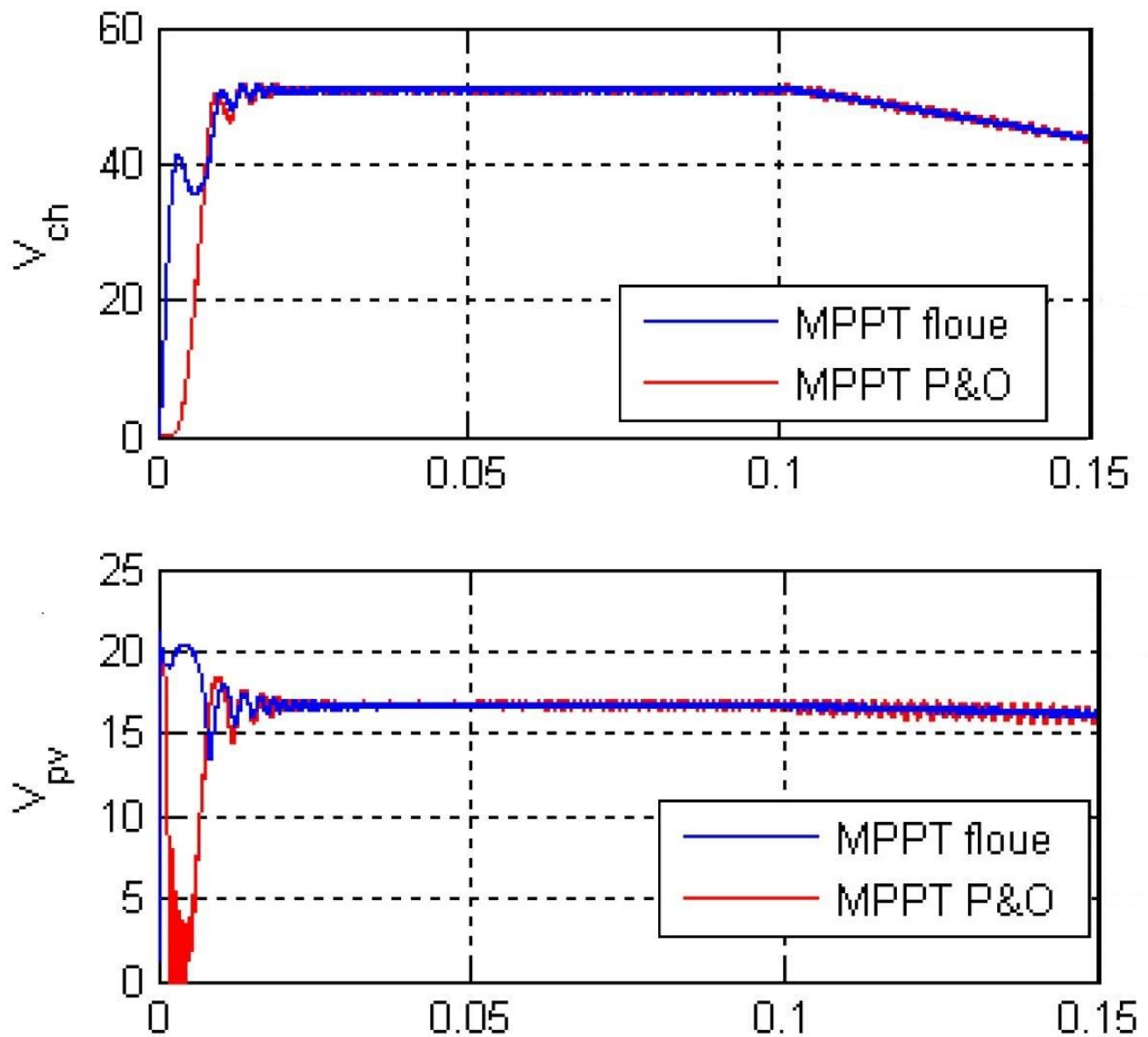


Figure 4.18 agrandissement de variation de la tension du générateur PV et tension de la charge face à une diminution d'éclairement de 1000w/m^2 jusqu'à 500w/m^2

De ce fait on peut en conclure que la commande MPPT à base de logique est plus avantageuse que la commande MPPT P&O, vu sa rapidité et sa précision.

4.6. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons simulé le fonctionnement d'un système photovoltaïque adapté par deux commandes différentes, une commande numérique intelligente (commande MPPT à base de logique floue) et une commande MPPT P&O (perturber et observer), assurant la poursuite du point de puissance maximale du générateur photovoltaïque afin d'obtenir un rendement optimal.

D'après les résultats obtenus depuis les simulations faites sur notre système, on constate que les résultats obtenus avec un contrôleur flou avantagent ce dernier, en étant plus rapide, plus précis et offre une grande faculté de poursuite que le contrôleur à base d'algorithme P&O, ce qui permet au système de bien réagir face aux changements des conditions de fonctionnements et de fonctionner dans la zone de fonctionnement optimal ou la puissance fournie à la charge est maximale.

Conclusion générale

Une grande partie de la puissance générée par un générateur photovoltaïque reste inexploitée, cela est dû aux perturbations interne ou bien externe, externe tel que les variations de températures ou d'ensoleillement, interne du aux perturbations de la charge, tout cela provoque des perturbations dans le point de puissance maximale du générateur PV, et pour y remédier on a recouré à une commande MPPT qui ajuste le point de fonctionnement du générateur PV celons les conditions de fonctionnement. La commande MPPT fonctionne en agissant sur la gâchette d'un convertisseur DC/DC qui sert d'interface entre le générateur photovoltaïque et la charge.

Il existe une palette très importante de commande MPPT. Dans notre travail on a choisi de mettre en avant deux d'entre elles, la commande à base d'algorithme P&O (perturber et observer) et la commande à base de logique flou. Nous avons simulé deux systèmes, l'un équiper d'une commande MPPT P&O et l'autre d'une commande MPPT logique floue. Àpre quoi on a établis une comparaison entre les deux méthodes face à des variations de températures et d'ensoleillements, pour étudier la différence de comportement entre elles.

Apré simulation et analyse des différents résultats on arrive à plusieurs conclusions :

- ✓ Un générateur photovoltaïque face à une diminution d'ensoleillement ou bien une augmentation de température a tendance à perdre de la puissance
- ✓ La commande MPPT P&O permet la poursuite du point de puissance maximum malgré un manque de précision et de rapidité
- ✓ La commande MPPT a base de logique floue permet une poursuite du point de puissance maximum avec beaucoup plus de rapidité et de précision que la commande P&O ce qui la rend plus avantageuse

D'après les résultats énumérer on constate bien que la méthode a base de logique floue est une méthode qui offre un très bon suivi du point de puissance maximum avec un rendement optimal

Néanmoins ces résultats sont le fruit de simulation théorique et il faudrait appliquer cette méthode sur le terrain pour avoir des résultats définitifs.

Bibliographie

- [1] Antonio Luque and Steven Hegedus, "Handbook of Photovoltaic Science and Engineering", John Wiley & Sons Ltd, 2003
- [2] F. Kininger, "Photovoltaic Systems Technology", University of Kassel, 2003
- [3] M.Blhadj ''Modélisation d'un système de captage photovoltaïque autonome '' Mémoire de Magister Centre Universitaire de Bechar 2007-2008.
- [4] Anne Labouret, Michel Viloz, "Energie Solaire Photovoltaïque (2 eme édition)", Dunod, 2003
- [5] Boukli hacene omar « conception et réalisation d'un générateur photovoltaïque muni d'un convertisseur mppt pour une meilleure gestion énergétique » thèse de magister université abou bakr belkaid tlemcen 2011
- [6] M.Blhadj ''Modélisation d'un système de captage photovoltaïque autonome '' Mémoire de Magister Centre Universitaire de Bechar 2007-2008.
- [7] Anne Labouret, Michel Viloz, "Energie Solaire Photovoltaïque (2 eme édition)", Dunod, 2003
- [8] KALAJDI Farah- CHEKROUNI Nesrine « Commande d'un générateur photovoltaïque débitant sur une pompe (MPPT) » Université ABOU BAKR BELKAID Tlemcen 2014

- [9] chihchaing hua ,chihming shen, ""Study of maximum power tracking techniques and control of DC/DC converters for photovoltaic power system,"" Power Electronics Specialists conference, PESC 98 Record.29th Annual IEEE ,vol.1,pp.86-93,2002.
- [10] H. Boukli ‘ ‘ Conception et Réalisation d’un Générateur Photovoltaïque Muni D’un Convertisseur MPPT pour une Meilleure Gestion Energétique ‘ ‘ Mémoire de Magister Université Abou-Baker Blkaid-Tlemcen 2010/2011.
- [11] https://www.researchgate.net/figure/Schema-synoptique-de-la-commande-MPPT-analogique_fig3_228770934
- [12] Sedrati youcef Nouar hatem « Implémentation de l'algorithme P&O pour un système photovoltaïque » mémoire master UNIVERSITE KASDI MERBAH-Ouargla 2016
- [13] S.Lhlah, ,,“Etude comparative des techniques MPPT Perturbation and observation (P&O), Incrémental Conductance (Inc.Con) et Hill climbing (H.C) ,,“ Mémoire MAGISTER université El hadj Lakder Batna 2007
- [14] H. Buhler, “Réglage par logique floue ”, Presse Polytechniques Romandes 1994.
- [15] ANDRIANANTENAINA Tsiory P, MOUSSA Sonia, SOA Joueline RACHIDA, Jean N. RAZAFINJAKA, ANDRIANIRINA Charles Bernard « Optimisation du rendement énergétique d’un système photovoltaïque par algorithme MPPT flou » Laboratoire d’Automatique, Ecole Supérieure Polytechnique, Université d’Antsiranana, Laboratoire d’Electronique Industrielle, Ecole Supérieure Polytechnique, Université d’Antsiranana.

- [16] Yassine Lasmi « Optimisation de la poursuite du point de puissance maximale (MPPT) d'un système photovoltaïque par techniques intelligentes » Mémoire de Magister Université Setif 2013.

- [17] Hamal Chikh „“Commande MPPT par logique floue d'un générateur photovoltaïque,“ ,Univ Saida –Dr.Tahar Moulay, 2014.

- [18] Yassine Lasmi „“Optimisation de la poursuite du piont de puissance maximale (MPPT) d'un système photovoltaïque par techniques intelligentes,“ , Mémoire de Magister Université Setif ,09/12/2013.

- [19] Wassila Issaadi “Control of a photovoltaic system by fuzzy logic, Comparative studies with conventional controls: results, improvements and perspectives” Int. J. Intelligent Engineering Informatics, Vol. 5, No. 3, 2017

Annexe

Les paramètres du panneau photovoltaïque

Voc	21.21V
Isc	3.75A
K1	0.003
A	2.15
Np	1
Ns	36
Rs	0.001Ω
Rsh	1000Ω
P	60W

Paramètre du convertisseur DC/DC

R	500Ω
C	2*10⁻⁴
C1	30*10⁻⁴
L	0.1H