

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université A. MIRA-BEJAIA



Faculté de Technologie
Département de Génie Electrique

Mémoire de Fin d'étude
En vue de l'obtention du diplôme de Master en Automatique
Filière : Automatique

Thème

**Etude et simulation des techniques MPPT d'un
système photovoltaïque**

Présenté par :

Nom et prénom	Spécialité
Cylia TIGRINE	Automatique et informatique industriel
Ouerdia Ait Ouali	Automatique et système

Encadré par :

Dr. S. HADJI

Examineurs :

Dr. O. GUENOUNOU

Dr. H. LEHOUCHE

Année universitaire 2018/2019

Remerciements

Nous tenons à remercier, tout d'abord, le dieu le plus puissant qui nous a donné la santé, le courage et la patience pour achever ce travail.

Nos plus vifs remerciements s'adressent à notre promoteur, Dr Hadji pour sa patience, son orientation et ses remarques constructives.

Nos remerciements s'adressent également aux membres de jury pour l'honneur qu'ils nous font en participant au jugement de notre travail.

Nous remercions aussi tous les enseignants de département ATE qui ont participé à notre formation.

Dédicaces

Nous dédions ce travail à :

Nos parents, et le dévouement dont ils font preuve. A nos familles et amis(es), et à tous qui nous sont chers.

Cylia et Ouerdia.

Sommaire

SOMMAIRE	I
LISTE DES FIGURES	I
LISTE D'ABREVIATION:	V
INTRODUCTION GENERALE	1
CHAPITRE I. SYSTEME PHOTOVOLTAÏQUE	3
Introduction	4
I.1. Les cellules photovoltaïques.....	4
I.1.1. Types de cellules photovoltaïques	4
I.1.2. L'effet photovoltaïque	5
I.2. L'influence de la température et de l'éclairement.....	6
I.2.1. L'influence de la température :	6
I.2.2. L'influence de l'éclairement :	7
I.3. Ombrage partiel	17
I.4. Panneau photovoltaïque	8
I.4.1. Système photovoltaïque.....	8
I.5. I.6. Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque	10
Conclusion.....	11
CHAPITRE II. OPTIMISATION.....	ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.
Introduction	13
II.1. Modélisation du système.....	13
II.2. Modélisation du générateur photovoltaïque	14
II.3. Modélisation du convertisseur statique DC/DC	18
II.3.1. Définition	18
II.3.2. Convertisseur Buck	19
II.3.3. Convertisseur Buck-BOOST	20
II.3.4. Convertisseur BOOST	21
II.3.5. Equations régissant le fonctionnement du hacheur	22
II.4. Régulation.....	25
II.4.1. Signal modulé en largeur d'impulsion (MLI).....	26

II.5. La commande MPPT	27
II.6. Techniques de recherche de point de puissance maximal MPPT	27
II.6.1. La technique Perturbation & Observation (PO)	28
II.6.2. Technique d'Incrémental Conductance (IC)	31
II.7. Les avantages et les inconvénients	33
II.8. La logique floue.	33
II.8.1. Théorie des ensembles flous.	34
II.8.2. Principe de la logique	36
II.8.3. Structure d'une commande à logique floue.....	37
II.8.4. Application du contrôleur floue pour la commande MPPT	39
II.8.5. Défuzzification.....	41
II.9 Algorithmes évolutionnaires	42
II.8.6. Principe du PSO.....	42
Conclusion.....	43
CHAPITRE III. RESULTAT ET DISCUSSIONS.	44
Introduction	45
Résultats de simulation.	45
III.1. Simulation du système photovoltaïque.	45
III.1.1. Teste sur un convertisseur DC/DC.	45
III.1.2. Simulation du panneau photovoltaïque.	46
III.1.3. Simulation du système photovoltaïque avec la commande MPPT.....	48
III.2. Panneau photovoltaïque avec ombrage partiel	69
III.2.1. Choix du panneau et des conditions atmosphériques.....	69
III.2.2. Ombrage partiel du GPV avec la commande MPPT.....	70
III.2.3. Commande PO sous l'ombrage partiel	71
III.2.4. Ombrage partiel avec la commande INC	72
III.2.5. Commande floue en ombrage partiel.....	73
III.2.6. Optimisation du contrôleur floue par le PSO	74
III.2.7. Application à l'optimisation du contrôleur floue.....	75
Conclusion.....	78
CONCLUSION GENERALE	79
BIBLIOGRAPHIE	ERREUR ! SIGNET NON DEFINI.

Liste des figures

Figure I.1: Les principaux types de cellules.....	5
Figure I.2: L'effet photovoltaïque.....	5
Figure I.3. Influence de la température sur le courant PV.....	6
Figure I.4. Influence de la température sur la puissance sur le GPV.....	6
Figure I.5. Influence de l'ensoleillement sur le courant PV.....	7
Figure I.6: influence de l'ensoleillement sur puissance.....	7
Figure I.7: circuit équivalent d'un module PV avec des cellules ombragées.....	17
Figure I.8: image correspondante à un panneau photovoltaïque.....	8
Figure I.9: Schéma représentatif d'une association série/parallèle.....	8
Figure I.10: Système photovoltaïque autonome.....	9
Figure I.11: Système photovoltaïque raccordé au réseau.....	10
Figure I.12: Système hybride PV-Eolien.....	10
Figure II.1: Schéma synoptique d'un système photovoltaïque avec la commande MPPT.....	13
Figure II.2. Schéma équivalent d'une cellule PV idéale.....	14
Figure II.3:Circuit équivalent du modèle à 5 paramètres.....	14
Figure II.4: Principe de base d'un hacheur.....	18
Figure II.5 Les différents types d'un hacheur.....	19
Figure II.6: Signal carré pour commander le commutateur.....	19
Figure II.7: Schéma du hacheur Buck.....	19
Figure II.8: Caractéristique du tension-courant.....	20
Figure II.9: Variation de V de charge avec I de charge pour le convertisseur Buck.....	20
Figure II.10: Circuit d'un convertisseur Buck-BOOST.....	21
Figure II.11: Caractéristique de la tension et de courant du convertisseur Buck-BOOST.....	21
Figure II.12: Schéma du hacheur survolteur.....	22
Figure II.13: Schéma équivalent à la phase d'accumulation d'énergie.....	22
Figure II.14: Schéma équivalent à la phase de roue libre.....	23
Figure II.15: Modélisation d'un convertisseur BOOST.....	25
Figure II.16: Modélisation du système (GPV-BOOST-charge).....	25
Figure II.17: Principe de régulation.....	25
Figure II.18: Signal PWM.....	26
Figure II.19: Obtention d'un signal MLI (PWM).....	26
Figure II.20: Le fonctionnement de l'algorithme PO.....	28

Figure II.21. Organigramme de la méthode PO.	29
Figure II.22 Programme et schéma block de la technique PO.....	30
Figure II.23: Divergence de la commande PO lors de variation d'irradiation.	30
Figure II.24: Principe de la méthode IC.....	31
Figure II.25: Organigramme de la méthode INC.....	32
Figure II.26: Programme et schéma bloc de la technique INC.....	33
Figure II.27: Différence entre ensemble classique et ensemble Flou.	34
Figure II.28: Formes usuelles des fonctions d'appartenance.....	35
Figure II.29: Variables linguistiques, termes linguistiques et univers de discours.....	37
Figure II.30: Structure de base d'un contrôleur flou.	Erreur ! Signet non défini.
Figure II.31: Editeur de fichier FIS.	40
Figure II.32: Fonction d'appartenance pour les entrées E et CE.....	40
Figure II.33: Fonction d'appartenance pour la sortie D.	40
Figure II.34: Principe de MPPT flou.....	41
Figure II.35: Surface de la variation des fonctions d'appartenance.....	41
Figure II.36: Représentation de la commande MPPT avec la logique flou.....	42
Figure III.1. Schéma d'un BOOST sous MATLAB/SIMULINK.	45
Figure III.2. Courbes de la tension d'entrée et de sortie d'un BOOST.	46
Figure III.3. Schéma de simulation d'un panneau PV étudié.....	47
Figure III.4. Paramètre de cellule PV.	47
Figure III.5. Courbe des caractéristiques du I-V et P-V du panneau.	48
Figure III.6. Modélisation d'un SPV sous MATLAB\SIMULINK.....	49
Figure III.7. Masque des paramètres de la commande PO.	50
Figure III.8. Courbe d'un pas de rapport cyclique égal à 0.01.	51
Figure III.9. Puissance aux bornes du GPV pour un pas de 0.01.	52
Figure III.10. Puissance de sortie du système pour un pas de 0.01.....	52
Figure III.11. Tension du générateur photovoltaïque pour un pas de 0.01.....	Erreur ! Signet non défini.
Figure III.12. Tension de sortie du système pour un pas de 0.01.....	53
Figure III.13. Courbe d'un pas de rapport cyclique égal à 0.002.	53
Figure III.14. Courbe de la tension aux bornes du GPV pour un pas de 0.002.	53
Figure III.15. Puissance de sortie du système pour un pas de 0.002.....	54
Figure III.16. Tension à la borne du générateur photovoltaïque pour un pas de 0.002.....	54
Figure III.17. Tension de sortie du système pour un pas de 0.002.....	55
Figure III.18 Profile d'un éclairnement injecté dans le générateur photovoltaïque.	55

Figure III.19. Courbe du pas d'un rapport cyclique égal à 0.002.....	56
Figure III.20. Tension aux bornes du générateur photovoltaïque.....	56
Figure III.21. Puissance de sortie du système.....	57
Figure III.22. Tension aux bornes du générateur photovoltaïque.....	57
Figure III.23. Tension de sorti du système.....	58
Figure III.24.Masque de paramètre de la commande INC.....	59
Figure III.25. Courbe du rapport cyclique pour un pas de 0.01.....	60
Figure III.26. Puissance aux bornes du générateur PV pour un pas de 0.01.....	60
Figure III.27. Courbe du rapport cyclique pour un pas de 0.002.....	61
Figure III.28. Courbe du rapport cyclique pour un pas de 0.002.....	62
Figure III.29. Puissance aux bornes du générateur PV.....	62
Figure III.30.Schéma MATLAB SIMULLINK d'un SPV avec la commande floue.....	65
Figure III.31.Fonction d'appartenance de la logique floue.....	65
Figure III.32. Courbe du rapport cyclique.....	66
Figure III.33. Puissance de sortie avec la logique floue.....	67
Figure III.34. Puissance d'entrée avec la logique floue.....	67
Figure III.35. Tension de sortie avec la logique floue.....	67
Figure III.36. Tension d'entrée avec la logique floue.....	68
Figure III.37. Courbe du rapport cyclique pour un ensoleillement variable.....	68
Figure III.38Puissance de sorti avec la logique floue.....	68
Figure III.39Puissance d'entrée avec la logique floue.....	69
Figure III.40. Courbe des caractéristiques du I-V et P-V du panneau avec l'ombrage partiel.....	70
Figure III.41. Schéma de simulation d'un panneau PV avec l'ombrage partiel.....	70
Figure III.42. Schéma SIMULINK du système étudié.....	71
Figure III.43. Courbe de la puissance d'entrée et de sortie avec l'ombrage partiel.....	71
Figure III.44. Courbe de tension du panneau et de sortie avec l'ombrage partiel.....	72
Figure III.45.Courbe de la puissance aux bornes du générateur avec l'ombrage partiel.....	72
Figure III.46.Courbe de la puissance de sortie avec Ombrage partiel.....	73
Figure III.47 La puissance d'entrée avec l'ombrage partiel.....	73
Figure III.48 la puissance de sortie avec l'ombrage partiel.....	74
Figure III.49. Exemple des positions de la fonction d'appartenance.....	76
Figure III.50. Puissance d'entré avec effet ombrage partiel.....	77
Figure III.51. Puissance de sortie avec effet ombrage PV partiel.....	77

Listes des tableaux:

Tableau I.1. Rendement des différents types de cellules.....	5
Tableau II.1. Tableau de vérité de l'algorithme « perturbation & observation »	29
Tableau III.1. Paramètres du convertisseur DC/DC BOOST.	45
Tableau III.2. Comparaison entre les commandes pour un pas de 0.01.	63
Tableau III.3. Comparaison entre les commandes pour un pas de 0.002.	63
Tableau 4. Règle d'inférence de la commande par logique floue	66
Tableau III.5 Valeurs des points obtenus par le PSO	76

Liste d'abréviation:

C :	La capacité
CPV :	la cellule photovoltaïque
DC-DC :	hacheur survolteur ou BOOST
D :	la diode
FL :	logique floue (fuzzy logique)
G :	l'éclairement
GPV :	générateur photovoltaïque
IC :	conductance Incrémentale
I :	le courant
MPPT:	Poursuit de point de puissance maximal (Maximum Power Point Tracking)
MLI :	signale modulé de large impulsion (ou PWM, Pulse width modulation)
NM :	Négatif-Moyen
NP :	Négatif-Petit
NG :	Négatif-Grand
OEP :	Optimisation par essaim particulaire
P :	la puissance
PV :	Photovoltaïque
Ps :	puissance de sortie du système
Pe :	puissance fournie par le générateur PV
PSO:	Particle Swarm Optimization
PG:	Positif-Grand
PM :	Positif-Moyen
PP :	Positif-Petit
P&O :	perturbation et observation
PWM:	Pulse with modulation
PPM	Poursuit de point maximal
Rs :	Résistance série
R :	Résistance
SPV	Système photovoltaïque
Rsh :	Résistance shunt (ou parallèle)
T :	la température
V :	la tension
Ve :	tension d'entrée
Vs :	tension de sortie
Voc :	La tension du circuit-ouvert
Iph :	le photo-courant
Z:	Zero
E:	Première entrée de la fonction d'appartenance
CE:	Deuxième entrée de la fonction d'appartenance
D:	La sortie de la fonction d'appartenance
N:	Taille d'une population

K :	Constante de Boltzmann ($1.38 \text{ e-}^{23} \text{ j/k}$).
q :	charge d'électron ($1.602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$).
Vd :	la tension aux bornes de la diode (Volt).
Eg :	le gap d'énergie dans le semi-conducteur de la cellule.
Tref:	la température de référence (298 Kelvin).
Isc	le courant de court-circuit de la cellule (A).
I α :	facteur d'idéalité de la diode.
G :	l'irradiation en W/m^2
Gre:	l'irradiation de référence (1000 W/m^2)

Introduction générale

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

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

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

Dans la plupart des systèmes de conversion des énergies PV, il existe un algorithme particulier nommé « maximum power point Tracking ». Cette technique, comme son nom l'indique, permet de tirer le maximum de puissance que le panneau est apte à fournir. La puissance recherchée dépend généralement du changement de conditions climatiques telles que le rayonnement solaire et la température. Par conséquent, la technique MPPT, destinée à contrôler le rapport cyclique du convertisseur DC-DC, est nécessaire pour le fonctionnement optimal du système PV dans différentes conditions d'exploitation [1].

L'objectif de notre travail est de réaliser les différentes techniques MPPT (classiques et modernes), les appliquer à un étage d'adaptation et faire la simulation, puis comparer les résultats obtenus.

Le mémoire présenté est organisé en trois chapitres :

Dans le premier chapitre, nous allons présenter les différents types de cellules PV et leur structure de fonctionnement. Nous allons approfondir cette étude par la modélisation des cellules PV ainsi que leurs caractéristiques électriques. Nous allons présenter aussi l'influence des conditions météorologiques (la température et l'éclairement) sur le GPV ainsi que l'effet de l'ombrage partiel. A la fin, nous allons exposer les avantages et les inconvénients des systèmes GPV.

Dans le deuxième chapitre, nous allons nous intéresser à la modélisation d'un système PV, en commençant par le générateur PV puis le convertisseur hacheur survolteur.

Ensuite, nous allons présenter les différentes commandes MPPT : Perturbation et Observation (PO), Incrémental Conduction (IC) ainsi que la commande basée sur la logique floue (FL).

Dans le troisième chapitre, nous allons appliquer les trois stratégies de commande MPPT dans un système PV. Les résultats de simulations vont nous permettre de faire une comparaison entre les différentes méthodes étudiées.

Chapitre I. Système photovoltaïque

Introduction

L'effet photovoltaïque a été découvert en 1839. Cette conversion résulte par la transformation directe de la lumière du soleil en énergie électrique. Bien que le soleil est une source énergétique illimitée, l'homme cherche depuis longtemps à profiter de cette source. Dans notre époque, l'humanité se base sur des cellules solaires [2].

Dans ce chapitre, on va décrire brièvement les cellules solaires les plus utilisées et leurs principes de fonctionnement, ainsi que la modélisation d'une cellule photovoltaïque (CPV), l'influence des différents paramètres métrologiques (la température et l'éclairement). Vers la fin, on va présenter le système photovoltaïque et citer quelques avantages et inconvénients de ce dernier.

I.1. Les cellules photovoltaïques

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

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

I.1.1. Types de cellules photovoltaïques

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

1. Cellules amorphes :

Les cellules amorphes (**Figure I.1.a**) ne possèdent pas de structure cristalline. Leur fabrication et leur efficacité sont inférieures par rapport aux autres types, cependant leur rendement est faible. Elles sont utilisées dans des petits produits de consommation (les calculatrices solaires).

2. Cellules monocristallines :

Les cellules aux siliciums monocristallines (**Figure I.1.b**), qui représentent le type avec le plus haut pouvoir de conversion, elles sont considérées parmi les cellules ayant le meilleur rendement.

3. Cellules poly-cristallines :

Des cellules aux siliciums poly-cristallins (Figure I.1.c). Leur conception étant plus faciles. Les composants des cristaux de silicium sont bien visibles, le cout de fabrication est moins important cependant leur rendement est plus faible [4].

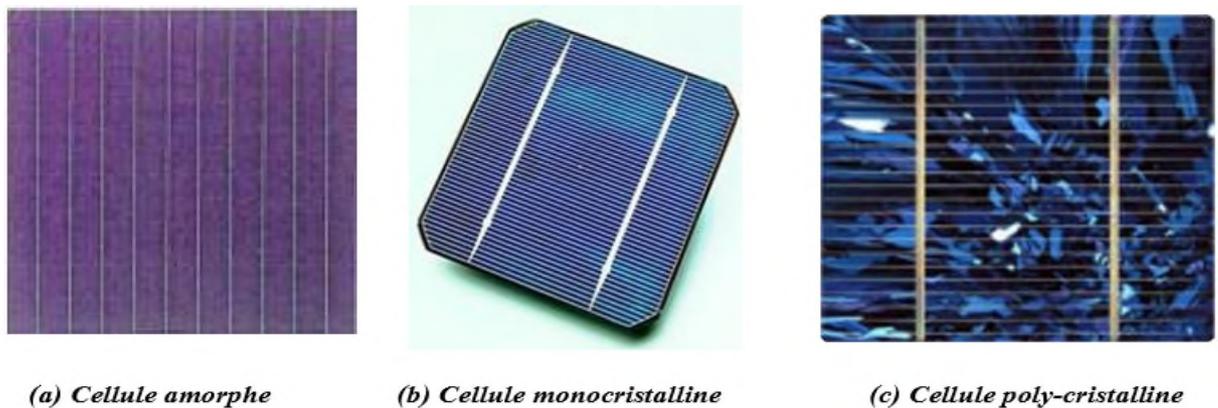


Figure I.1: Les principaux types de cellules.

Une étude a été faite sur les différents types de cellules avec leurs rendements, et les résultats sont représentés dans le tableau suivant [5]:

Tableau I.1. Rendement des différents types de cellules

Technologie de cellule	Rendement en laboratoire	Rendement production
Silicium amorphe	13%	5-9%
Silicium poly-cristalline	19.8%	11-15%
Silicium monocristalline	24.7%	13-17%

I.1.2. L'effet photovoltaïque

Quand la cellule est exposée à la lumière, les photons pénétrant dans le matériau semi-conducteur, transfèrent leur énergie aux électrons qui se mettent en mouvement pour produire un courant électrique.

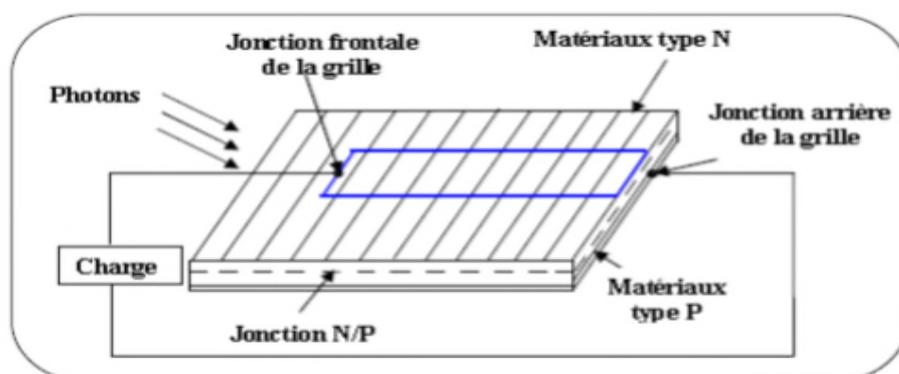


Figure I.2: L'effet photovoltaïque

Une cellule solaire se représente comme une diode électronique de grande surface, la taille d'une cellule solaire va jusqu'à 20cm avec une forme circulaire, carrée ou **dérivée** de deux géométries [6].

I.2. L'influence de la température et de l'éclairement

I.2.1. L'influence de la température :

Pour le fonctionnement d'un panneau solaire, la cellule PV doit s'exposer au rayonnement solaire. Ceci provoque un échauffement et la température agit sur les différentes caractéristiques de la cellule [7].

On fixe l'ensoleillement à 1000 W/m^2 et on fait varier la température de 25°C jusqu'à 75°C , les allures obtenues sont présentées en dessous :

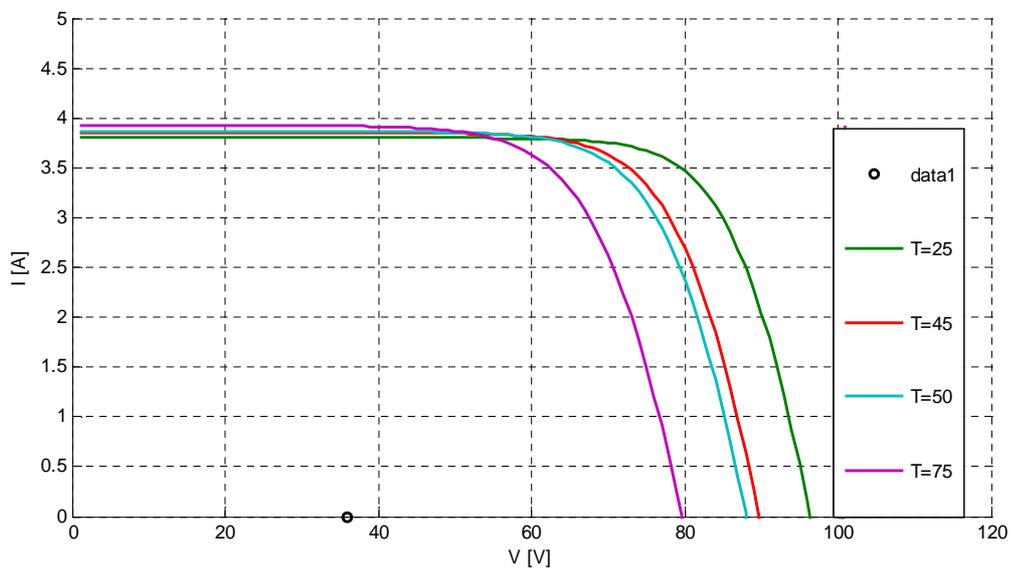


Figure I.3. Influence de la température sur le courant PV

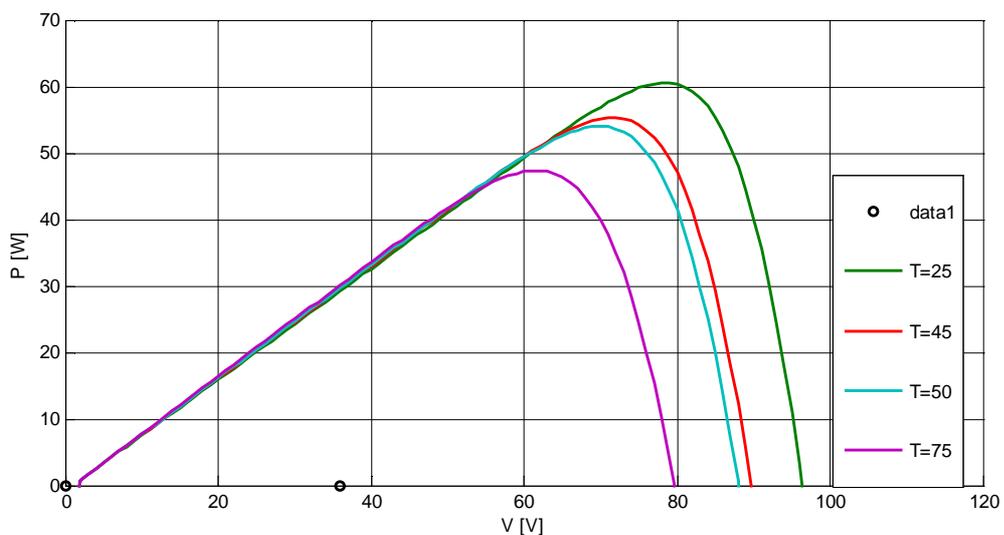


Figure I.4. Influence de la température sur la puissance sur le GPV

On remarque que l'augmentation de la température entraîne principalement une diminution de la tension par conséquent la puissance du GPV diminue. La **Figure I.4** montre qu'une augmentation de la température 25°C à 75°C engendre une chute de puissance de 25%

I.2.2. L'influence de l'éclairement :

On applique une température $T=25^{\circ}\text{C}$ maintenue constante et l'on fait varier l'ensoleillement (G) de 200 W/m² jusqu'à 1500 W/m², les résultats obtenus sont illustrés par les figures suivantes.

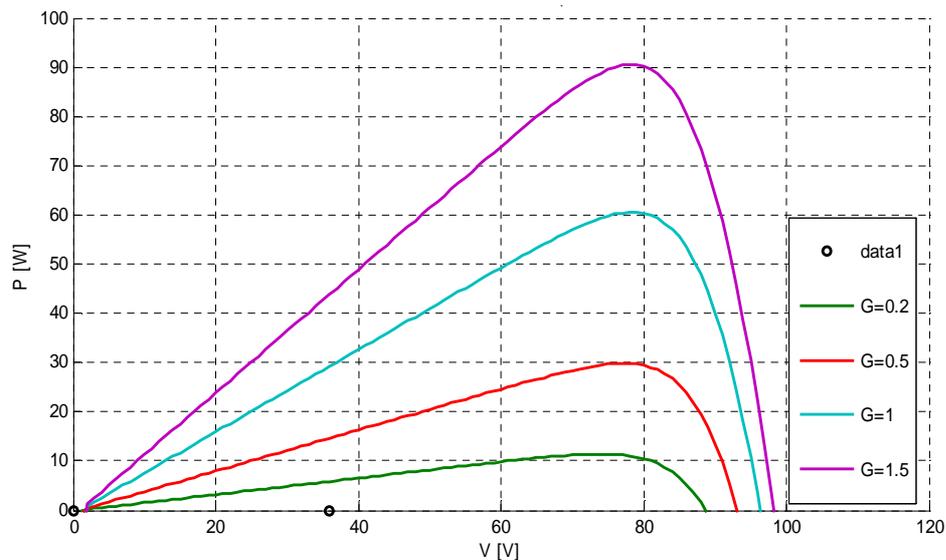


Figure I.5. Influence de l'ensoleillement sur le courant PV

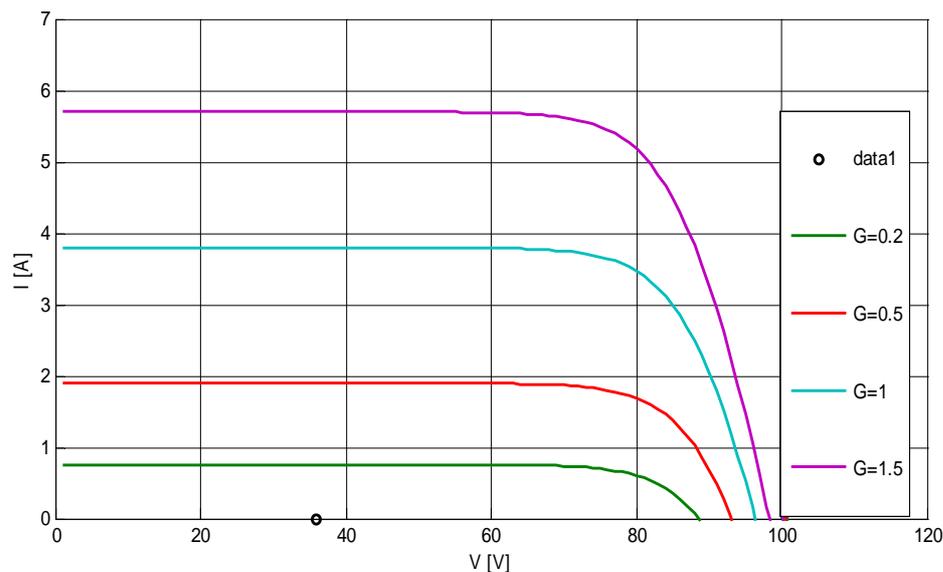


Figure I.6: influence de l'ensoleillement sur puissance

La caractéristique du courant-tension pour différentes valeurs de l'éclairement est décalée d'une distance proportionnellement aux rayonnements solaires. Une

augmentation de l'ensoleillement engendre essentiellement une augmentation du courant PV, par conséquent la puissance du PV augmente.

I.3. Panneau photovoltaïque



Figure I.7: image correspondante à un panneau photovoltaïque.

Le panneau se compose de plusieurs modules PV interconnectés en série et/ou en parallèle, dans le but d'augmenter la puissance. Pour la même température avec un éclairage homogène, l'association des cellules PV en série c'est de l'augmentation de la tension, ainsi que la tension résultante est la somme de tension de chaque cellule. Contrairement, le courant augmente, à l'association en parallèle.

La figure suivante montre une association de 3 branches en parallèle ayant chacune 2 cellules en série :

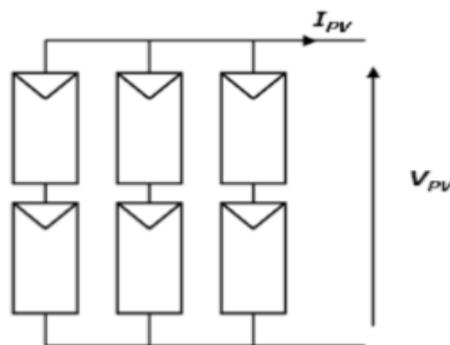


Figure I.8: Schéma représentatif d'une association série/parallèle.

Selon son association (série/parallèle), les valeurs du courant I_{cc} et tension V_{co} sont plus ou moins importants.

I.3.1. Système photovoltaïque

Depuis 1958, les cellules PV alimentent seulement le système énergétique des satellites. Les premières applications terrestres sont arrivées au début des années 70.

Aujourd'hui, grâce à leur fiabilité, le PV prend une place prépondérante. Il associe plusieurs composants à fin de former un système PV.

Les systèmes photovoltaïques les plus couramment utilisés selon les exigences sont de trois types : autonome, raccordé au réseau et hybride [9].

1. Système photovoltaïque autonome

Système autonome illustré en Figure I.9, c'est un site isolé qui n'est pas connecté au réseau, il permet de fournir de l'énergie électrique pour le fonctionnement des sites isolés.

Ces systèmes nécessitent l'utilisation de batteries d'accumulateur pour stocker l'énergie durant l'absence du soleil.



Figure I.9: Système photovoltaïque autonome.

On peut citer quelques exemples de systèmes autonomes :

- Des balises en mer.
- Les lampadaires urbains.
- Pompage solaire.
- Maison en site isolé.

2. Système photovoltaïque raccordé au réseau

Système raccordé au réseau, ou non autonome, c'est un système qui injecte l'excès d'énergie dans le réseau de distribution électrique.

La figure suivante illustre ce type de système :

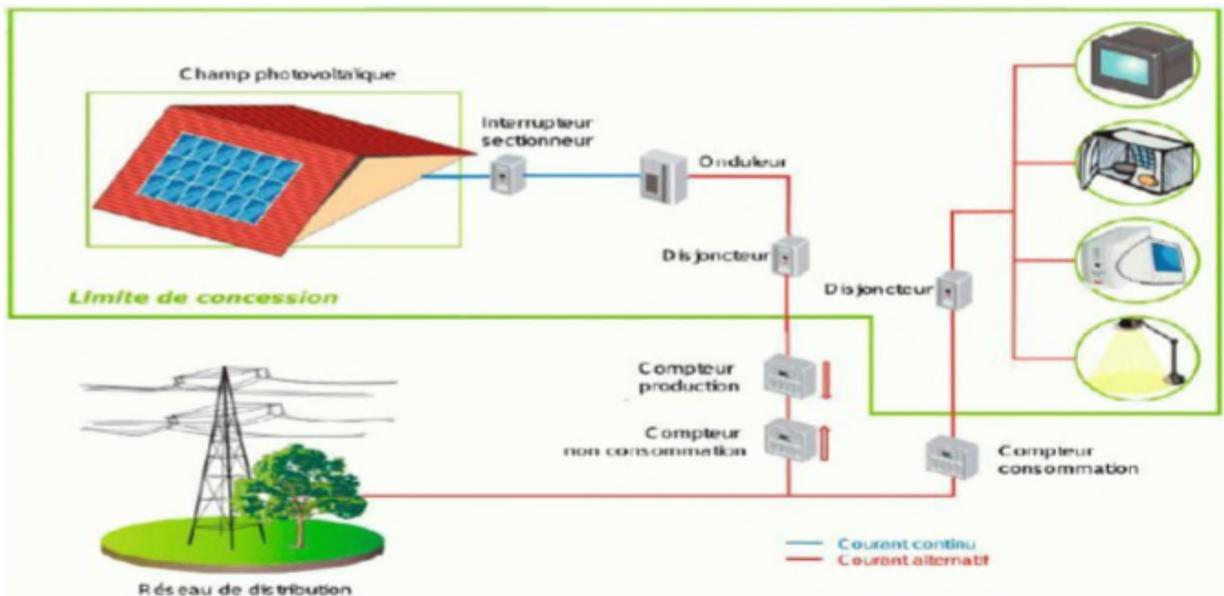


Figure I.10: Système photovoltaïque raccordé au réseau.

3. Système photovoltaïque hybride

Il s'agit des systèmes regroupant des sources d'énergie de nature différente : Eolienne, générateur diesel ou une centrale de cogénération.

Ce type d'installation est utilisé lorsque le GPV seul ne couvre pas tout l'énergie requise.

La figure suivante représente le système :

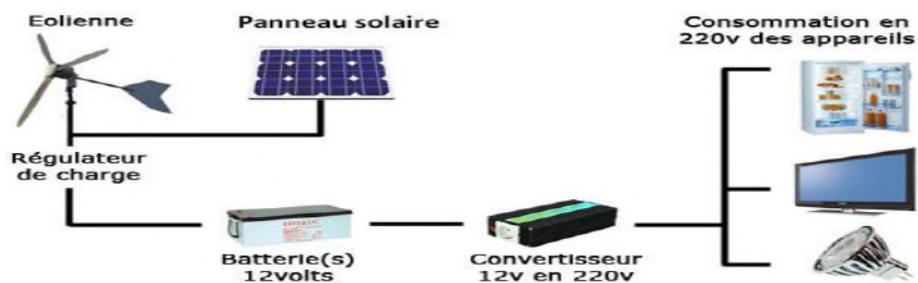


Figure I.11: Système hybride PV-Eolien

I.4. I.6. Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque

Parmi les avantages de l'énergie photovoltaïque on peut citer :

- Sa gratuité.
- Pas de pollution.
- Elle a une structure fixe.
- Sa flexibilité (dimensionnement selon les besoins, modularité).
- L'installation ne produit aucun bruit.

Elle possède aussi quelques inconvénients comme :

- Le coût élevé de l'installation.
- Le rendement relativement bas.
- La puissance est réduite lorsque les conditions climatiques sont défavorables (nuages).
- Le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batterie) est nécessaire pour une installation autonome.

Conclusion

Ce chapitre a présenté le principe de la conversion photovoltaïque, avec les différentes technologies utilisées par les GPV, ainsi que leur principe de fonctionnement.

Ensuite, on a étudié l'influence de la température et l'éclairement sur la CPV. Quelques résultats de simulation ont été présentés. Vers la fin, on a cité les différents systèmes PV utilisés.

Le chapitre suivant est réservé à la présentation des différentes commandes de MPPT (Maximum Power Point Tracking).

Chapitre I. Technique d'optimisation de MPPT.

Introduction

Les générateurs photovoltaïques sont reconnus par leur fonctionnement en large gamme de tension et courant de sortie, mais ils ne peuvent délivrer une puissance maximale. En effet, les variations climatiques qui influent sur la caractéristique $I(V)$ entraînent la fluctuation de la puissance maximale. Pour cela il existe plusieurs convertisseurs statiques commandés permettant de poursuivre le MPP.

Ces commandes sont connues sous le nom MPPT (Maximum Power Point Tracking), associées à un hacheur DC\DC qui assure le couplage entre le générateur et la charge.

Le but de ce chapitre est de faire l'optimisation de la puissance du système PV, il consiste à l'analyse de la sortie du GPV afin d'extraire le maximum de puissance délivrée quelles que soient les conditions de la température et de l'éclairement.

I.1. Modélisation du système

Le système étudié est constitué par le GPV, le convertisseur DC\DC et une charge résistive à la sortie du système.

Le convertisseur DC\DC est commandé par un signal à modulation de largeur impulsion (MLI ou PWM) avec une stratégie de recherche du point de puissance maximal MPPT.

La Figure ci-dessous présente le synoptique de l'ensemble du système [9] :

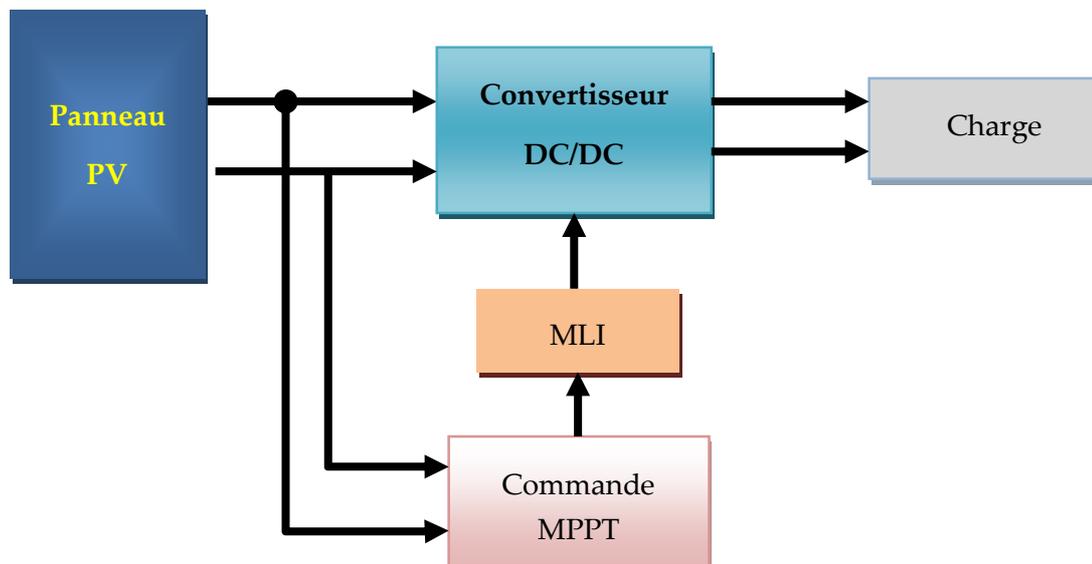


Figure I.1: Schéma synoptique d'un système photovoltaïque avec la commande MPPT

L'étage de commande détermine le rapport cyclique (entre 0 et 1) sur lequel est basé le signal PWM, cette dernière attaque le convertisseur DC/DC pour ramener le panneau à fonctionner avec sa tension optimale, donc sa puissance maximale.

Pour implémenter ce système dans Matlab/Simulink, on doit présenter la modélisation de chaque partie par des équations mathématiques (ou blocs Simulink).

I.2. Modélisation du générateur photovoltaïque

La cellule PV est une photodiode, on peut la représenter par un circuit simple (**Figure I.2**), c'est le modèle idéal.

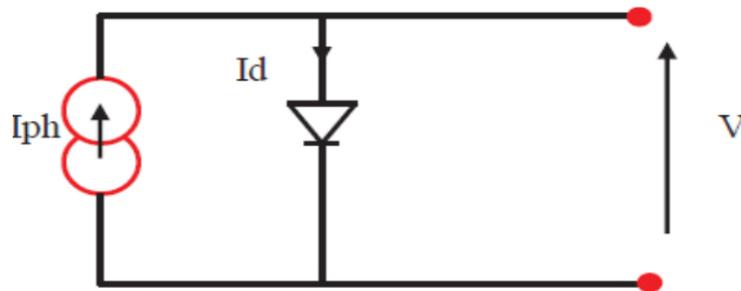


Figure I.2. Schéma équivalent d'une cellule PV idéale

En tenant compte des résistances de connexion et des courants de fuite et partant du modèle idéal, on peut représenter une CPV par le schéma de la **Figure I.3**, appelé aussi modèle à 5 paramètres. Il existe des modèles plus complexes (à 2 ou 3 diodes) mais on se limite dans notre étude à ce modèle qui est utilisé aussi dans la plupart des travaux de recherche.

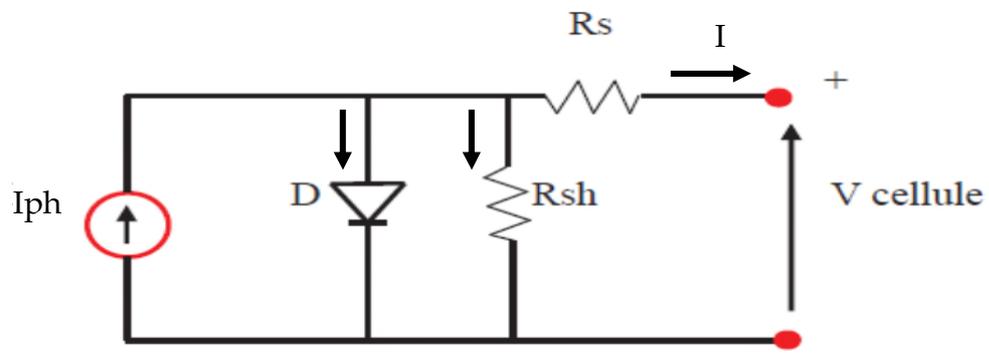


Figure I.3: Circuit équivalent du modèle à 5 paramètres

La résistance R_s représente les dévers résistances de contact et de connexion, R_{sh} caractérise les courants de fuite.

D'après la loi du nœud :

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

Où :

I : Courant de la cellule [A]

I_{ph} : Le photo-courant [A]

I_{sh} : Le courant traversant la résistance shunt [A]

Avec :

$$I_d = I_{rs} \left[e^{\frac{V_d}{V_t}} - 1 \right] \quad (I-2)$$

$$V = V_d - R_s I \quad (I-3)$$

$$I_{sh} = \frac{V_d}{R_{sh}} \quad (I-4)$$

Ce qui donne :

$$I = I_{ph} - I_{rs} \left[e^{\left(\frac{V + R_s I}{V_t} \right)} - 1 \right] - \frac{V + R_s I}{R_{sh}} \quad (I-5)$$

Où :

I_{rs} : Courant de saturation de la diode [A]

V_d : Tension aux bornes de la diode [V]

V_t : Potentiel thermique [V], donné par :

$$V_t = \frac{nKT}{q} \quad (I-6)$$

q : Charge d'électron ($1.602 \cdot 10^{-19}$ C)

K : Constante de Boltzmann ($1.38 \cdot 10^{-23}$ j /k)

T : Température de la cellule [K]

n : Facteur d'idéalité de la diode

Le photo-courant, généré par la cellule, peut être exprimé en fonction de l'ensoleillement avec l'équation suivante :

$$I_{ph} = [I_{sc} + K_i(T - T_{ref})] \frac{G}{G_{ref}} \quad (I-7)$$

Où :

G : L'irradiation [W/m^2]

G_{ref} : L'irradiation de référence (=1000 W/m²)

T_{ref} : La température référence (=25°C=298K)

I_{sc} : Le courant de court-circuit de la cellule [A].

K_i : Constante représentant la variation du courant avec la température [A/K]

D'une façon générale, on peut mettre le circuit électrique équivalent d'une cellule solaire en schéma bloc (sous Simulink) comportant tous les paramètres précédents, ce qui permet de tracer les caractéristiques de la cellule [10].

Les modules PV sont habituellement branchés en série-parallel pour augmenter la tension et l'intensité du courant à la sortie du générateur. Ces derniers sont interconnectés pour former une unité produisant une puissance continue élevée compatible avec le matériel électrique usuel.

L'expression du courant total peut s'exprimer par :

$$I_{PV} = N_p \cdot \left[I_{ph} - I_{rs} \left(e^{\left(\frac{V_{PV} + R_s \frac{I_{PV}}{N_p}}{nV_t} \right)} - 1 \right) - \frac{V_{PV} + R_s \frac{I_{PV}}{N_p}}{R_{sh}} \right] \quad (I-8)$$

Où,

I_{PV} : Courant du GPV [A] ;

V_{PV} : Tension du GPV [V] ;

N_s : Nombre de cellules connectées en série par module ;

N_p : Nombre de modules connectés en parallèle.

I.3. Ombrage partiel

Les modules PV sont très sensibles à l'ombrage, contrairement aux panneaux solaires thermiques. L'ombrage sur des cellules PV entraîne une perte de production.

Un ombrage partiel expose une partie des cellules à un rayonnement réduit, ce qui modifie la caractéristique de puissance du PV et peut même détruire ce dernier.

Plusieurs études ont été menées sur l'effet de l'ombrage et la dégradation des performances des systèmes PV. L'utilisation de la diode de dérivation « by-pass diode » parallèle à des cellules solaires pourrait bénéficier la production d'électricité dans les modules ombrés [8].

On devise le module en deux(ou plusieurs) parties égales, chacune se comporte comme un module, la figure suivante représente un circuit PV avec des cellules ombragées :

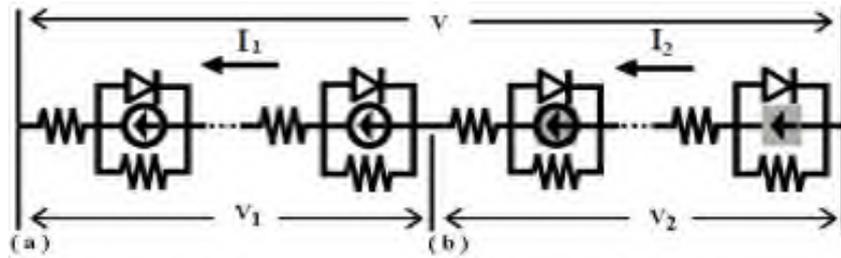


Figure I.4: circuit équivalent d'un module PV avec des cellules ombragées.

Le courant du panneau I est donné par :

$$I = I_1 = I_2 \quad (II-9)$$

$$V = V_1 + V_2 \quad (II-10)$$

$$I_1 = I_{ph1} - I_{01} \left(e^{q \frac{V+I_1 R_s}{n_1 K T}} - 1 \right) - I_{02} \left(e^{q \frac{V+I_1 R_s}{n_2 K T}} - 1 \right) - \frac{V + I_1 * R_s}{R_{sh}} \quad (II-11)$$

$$I_2 = I_{ph2} - I_{01} \left(e^{q \frac{V+I_2 R_s}{n_1 K T}} - 1 \right) - I_{02} \left(e^{q \frac{V+I_2 R_s}{n_2 K T}} - 1 \right) - \frac{V + I_2 * R_s}{R_{sh}} - a(V_2 + I_2 * R_s) \left(\frac{1 - V_2 + I_2 * R_s}{V_{br}} \right) \quad (II-12)$$

Avec :

- I_{ph} , I_0 Sont respectivement le photo-courant et le courant de saturation inverse de la diode.

- n : Facteur d'idéalité de la diode.
- q : La charge de l'électron.
- K : Constante de Boltzmann.
- T : La température de la cellule [K].
- R_s : Résistance série Ω .
- R_{sh} : Résistance Shunt Ω .
- I_{ph1} et I_{ph2} : Les photo-courants des cellules normales et ombragées.

I_{ph2} dépend du pourcentage d'ombrage (β) de la cellule.

$$I_{ph2} = \beta * I_{ph1} \quad (\text{II-13})$$

I.4. Modélisation du convertisseur statique DC/DC

I.4.1. Définition

Un hacheur est un convertisseur continu-continu qui permet de générer une source de tension continue variable à partir d'une autre source de tension continue

Figure I.5. Il consomme moins de puissance, c'est pour cette raison que les hacheurs ont de très bons rendements.

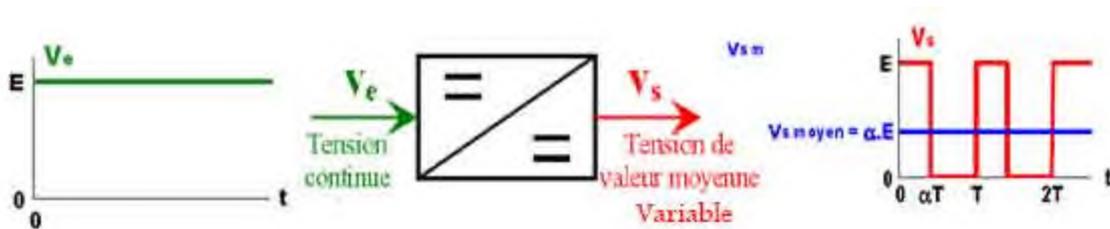


Figure I.5: Principe de base d'un hacheur.

Selon la position du commutateur et du hacheur, différents types de convertisseurs de tension peuvent être réalisés comme le montre le schéma ci-dessous [11] :

- Élévateur de tension « BOOST » ou notamment appelé hacheur survolteur.
- Abaisseur de tension « Buck » ou hacheur dévolteur.
- Abaisseur/Élévateur de tension « BUCK-BOOST ».

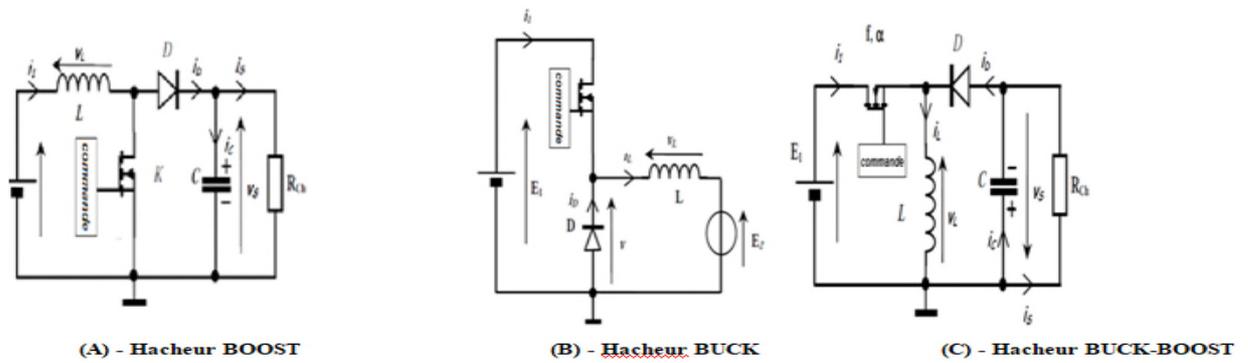


Figure I.6 Les différents types d'un hacheur.

Le commutateur peut être un transistor MOSFET ou IGBT, qui peut commuter sur deux positions, il est attaqué par un signal carré

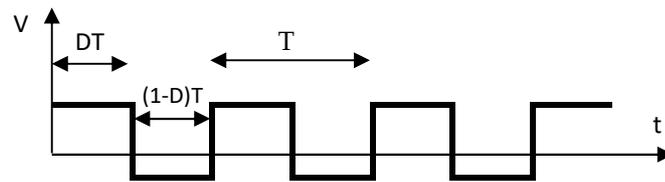


Figure I.7: Signal carré pour commander le commutateur

I.4.2. Convertisseur Buck

Un convertisseur Buck, ou hacheur série, est une alimentation à découpage qui convertit une tension continue en une autre tension continue de plus faible valeur [11].

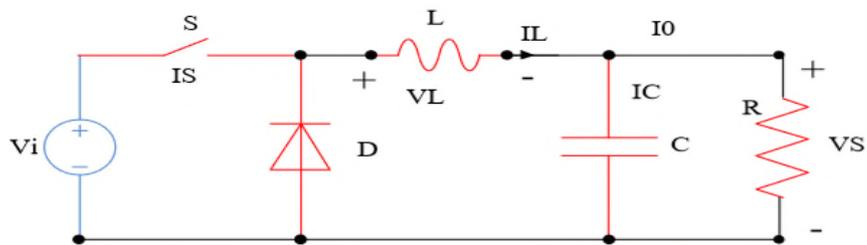


Figure I.8: Schéma du hacheur Buck.

L'équation caractéristique du courant de l'inductance est :

$$\frac{dI}{dt} = \frac{V_i - V_s}{L} \tag{I-9}$$

L représente l'inductance [H].

Le processus de commutation décrit par la position de l'interrupteur, dans le premier laps de temps (D.T), l'inductance se décharge. Dans le deuxième laps de temps (D-1)T, l'inductance libère avec une diminution de courant IL.

$$\frac{dI}{dt} = \frac{V_i}{L} \quad (I-10)$$

Les caractéristiques des courants et la tension représentant le fonctionnement du hacheur dévolteur sont données par les Figures suivantes :

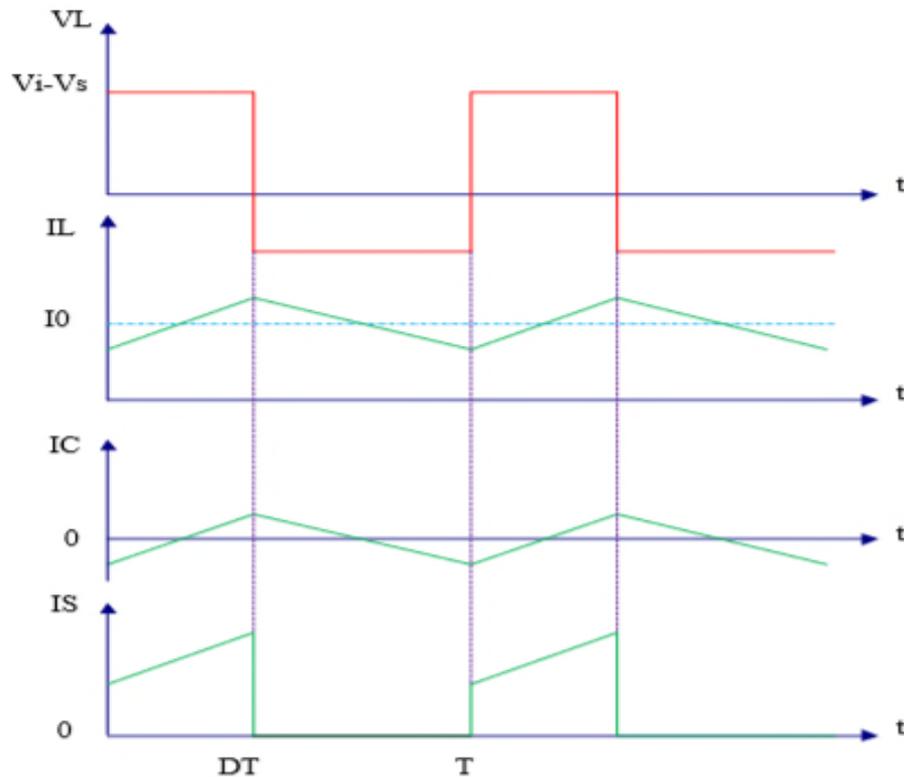


Figure I.9: Caractéristique du tension-courant.

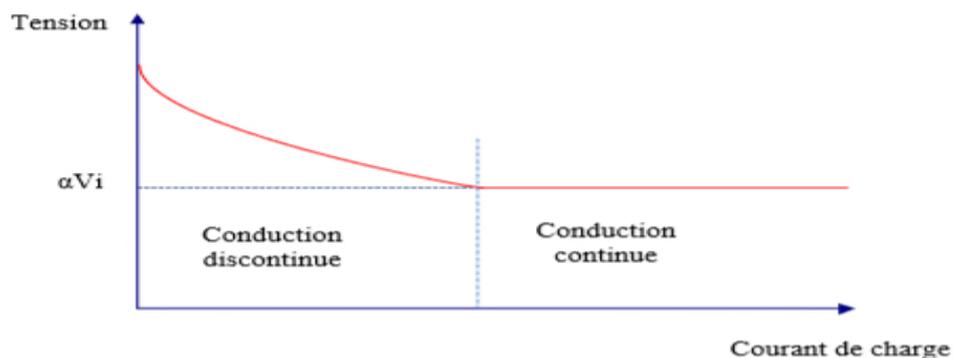


Figure I.10: Variation de V de charge avec I de charge pour le convertisseur Buck.

I.4.3. Convertisseur Buck-BOOST

Un convertisseur Buck-BOOST est une alimentation à découpage qui convertit une tension continue de plus faible en une plus grande. Un inconvénient de ce convertisseur est que son interrupteur ne possède pas de bornes reliées au zéro, compliquant ainsi sa commande.

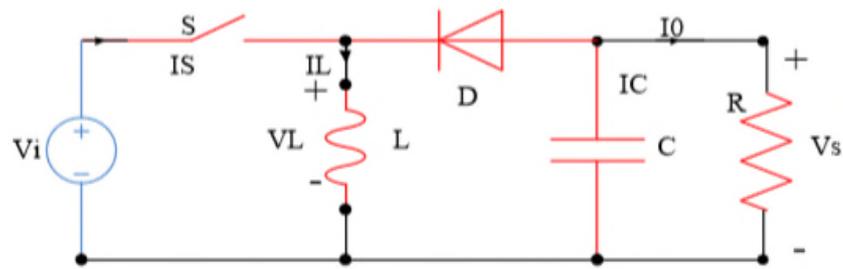


Figure I.11: Circuit d'un convertisseur Buck-BOOST.

Dans ce cas, l'équation de la tension aux bornes de la charge décrivant le fonctionnement en conduction continue est donnée comme suit :

$$V_s = \frac{D}{1-D} V_t \quad (\text{I-11})$$

Les caractéristiques du courant et de la tension de charge sont données par la Figure ci-dessous :

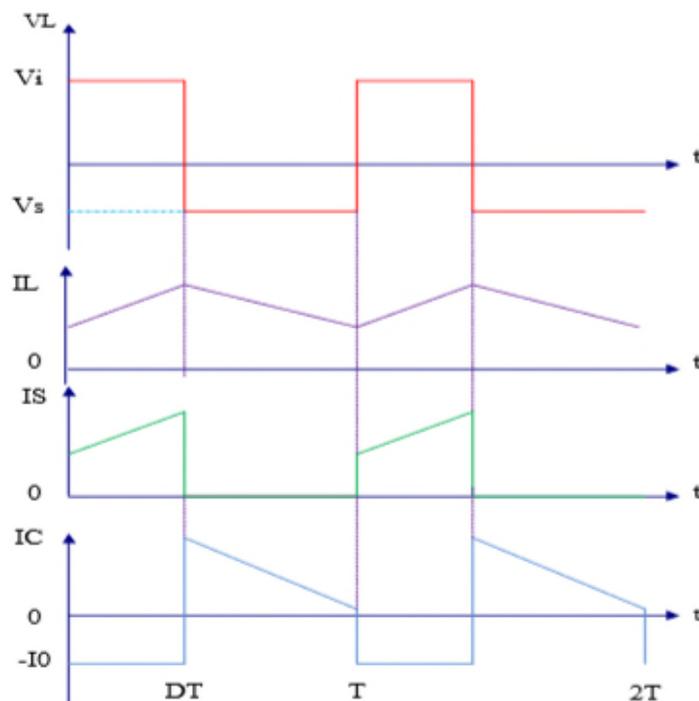


Figure I.12: Caractéristique de la tension et de courant du convertisseur Buck-BOOST.

I.4.4. Convertisseur BOOST

Lorsqu'on souhaite augmenter la tension d'une source continue, on peut utiliser le hacheur parallèle de type BOOST, appelé également hacheur survolteur. Ce dispositif de l'électronique de puissance est un convertisseur continu-continu mettant en œuvre un ou plusieurs interrupteurs. Le découpage se fait à une fréquence très élevée ce qui a pour conséquence de créer une tension moyenne.

La figure ci-dessous donne la forme la plus simple du hacheur BOOST.

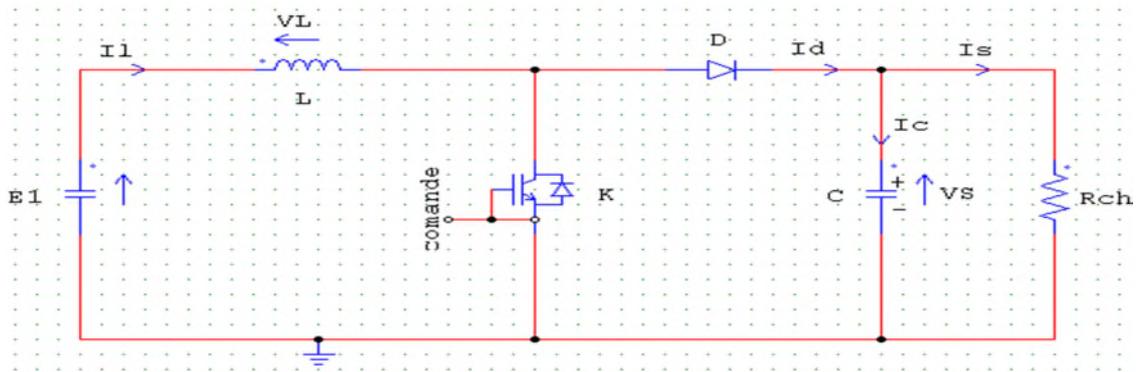


Figure I.13: Schéma du hacheur survolteur.

I.4.5. Equations régissant le fonctionnement du hacheur

Nous allons diviser en deux phases distinctes le fonctionnement du hacheur survolteur selon l'état de l'interrupteur sur une période T du signal de commande.

- De 0 à DT : phase d'accumulation d'énergie

L'interrupteur T_p est fermé (état passant), cela entraîne l'augmentation du courant dans l'inductance, donc le stockage d'une quantité d'énergie sous forme d'énergie magnétique.

La diode D est alors bloquée et la charge est alors déconnectée de l'alimentation.

$U=1$, la figure II.5 est équivalente au schéma suivant.

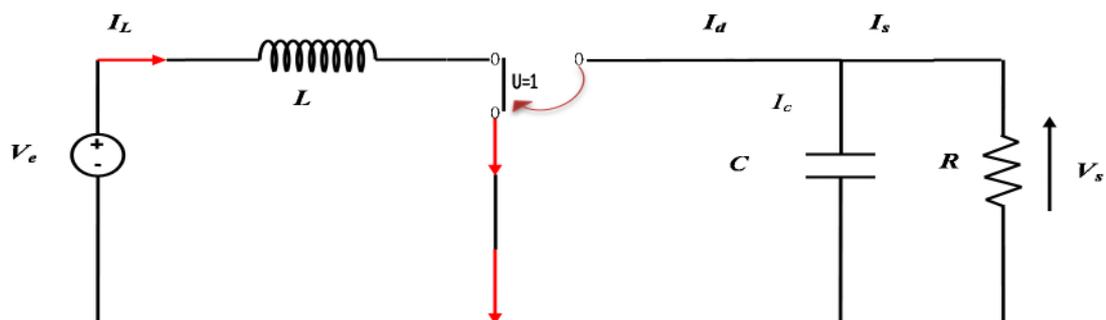


Figure I.14: Schéma équivalent à la phase d'accumulation d'énergie.

Les deux équations qui régissent le fonctionnement du hacheur sur l'intervalle $[0 DT]$ sont données par le système d'équations (I-12):

$$\begin{cases} L \frac{dI_L}{dt} = V_e \\ C \frac{dV_c}{dt} = -\frac{V_c}{R} \end{cases} \quad (\text{I-12})$$

• *De DT à T : phase de roue libre.*

L'interrupteur est ouvert, l'inductance se trouve alors en série avec le générateur. Sa f.é.m. s'additionne à celle du générateur (effet survolteur). Le courant traversant l'inductance traverse ensuite la diode D, le condensateur C et la charge R. Il en résulte un transfert de l'énergie accumulée dans l'inductance vers la capacité, qui va fixer la tension de sortie.

U=0, la **Figure I.13** est équivalente au schéma ci-dessous.

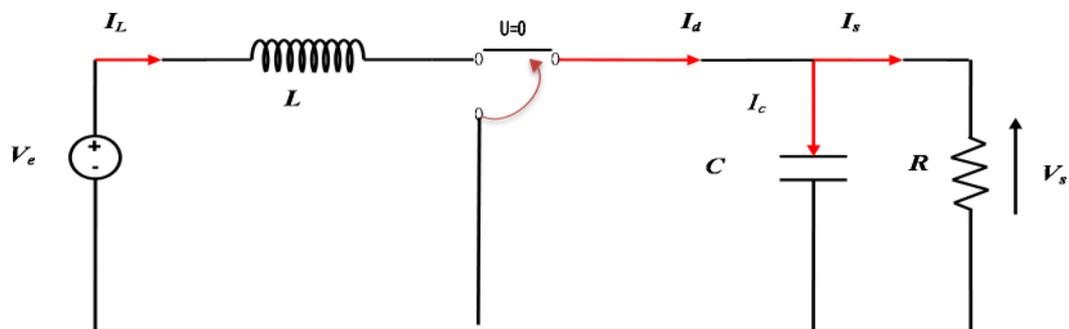


Figure I.15: Schéma équivalent à la phase de roue libre.

Dans ce cas, le fonctionnement peut être décrit par le système d'équation (I-13):

$$\begin{cases} L \frac{dI_L}{dt} = V_e - V_c \\ C \frac{dV_c}{dt} = -\frac{V_c}{R} + I_L \end{cases} \quad (\text{I-13})$$

Ainsi, il est possible de caractériser le fonctionnement du hacheur sur une période $[0, T]$ en combinant les deux systèmes d'équations (I-12) et (I-13) sous forme condensée :

$$\begin{cases} L \frac{dI_L}{dt} = V_e - (1 - U)V_c \\ C \frac{dV_c}{dt} = -\frac{V_c}{R} + (1 - U)I_L \end{cases} \quad (\text{I-14})$$

➤ *Régime de la conduction :*

Le convertisseur BOOST est caractérisé par trois régimes de fonctionnement distincts [14] :

- conduction continue : le courant I_L ne s'annule jamais.
- conduction critique : le courant s'annule ponctuellement
- conduction discontinue : le courant I_L prend une valeur nulle, pendant une durée supérieure à zéro.

Nous étudierons, ici le mode conduction continu pour déduire le rapport entre l'entrée et la sortie en fonction du rapport cyclique :

De (0 à DT) Le courant I_L traversant l'inductance ne s'annule jamais.

$$\Delta I_{L\ on} = \int_0^{DT} dI_L = \int_0^{DT} \frac{V_e}{L} dt = \frac{D \cdot V_e \cdot T}{L} \quad (I-15)$$

$$\Delta I_{L\ off} = \int_{DT}^{(1-D)T} dI_L = \int_{DT}^{(1-D)T} \frac{(V_e - V_s)}{L} dt = \frac{(V_e - V_s)(1 - D)T}{L} \quad (I-16)$$

Et l'énergie stockée dans l'inductance est donnée par la relation suivante:

$$E = \frac{1}{2} L \cdot I_L^2 \quad (I-17)$$

Le courant traversant l'inductance est le même au début et à la fin de chaque cycle de commutation, on aura alors :

$$\Delta I_{L\ on} + \Delta I_{L\ off} = 0 \quad (I-18)$$

Donc :

$$\frac{D \cdot V_e \cdot T}{L} + \frac{(V_e - V_s)(1 - D)T}{L} = 0 \quad (I-19)$$

La résolution de l'équation (II.18) donne :

$$V_s = \frac{V_e}{1 - D} \quad (I-20)$$

La figure suivante illustre le modèle schématique sous Matlab/Simulink de l'étage d'adaptation Boost.

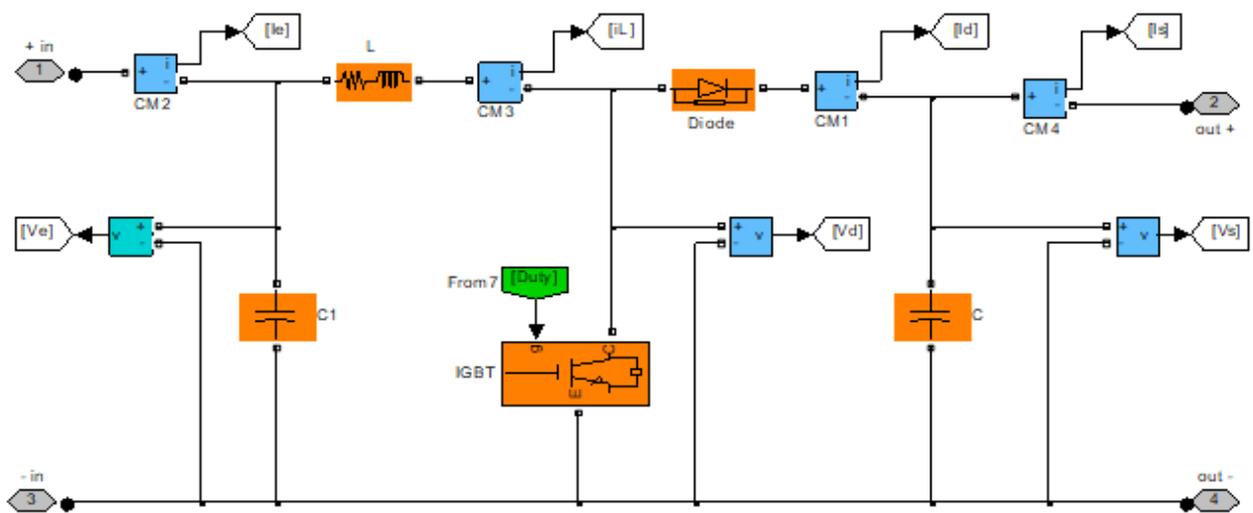


Figure I.16: Modélisation d'un convertisseur BOOST.

Le schéma des équations précédentes est regroupé dans un seul bloc avec des conditions météorologiques fixes : $T = 25^\circ$, et $G = 1000 \text{ W/m}^2$, il est relié à un générateur PV et une charge comme illustré par la figure suivant :

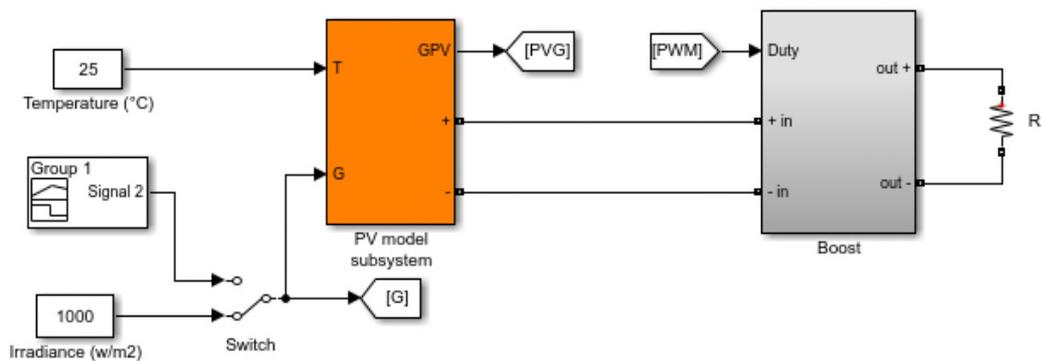


Figure I.17: Modélisation du système (GPV-BOOST-charge).

I.5. Régulation

Le but de la régulation est de ramener une grandeur vers une consigne (référence) en exploitant l'écart entre ces deux grandeurs. La stratégie de commande dépend de la méthode utilisée.

La figure suivante illustre le principe de régulation.

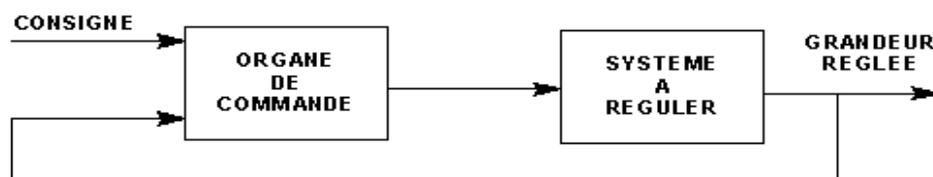


Figure I.18: Principe de régulation.

I.5.1. Signal modulé en largeur d'impulsion (MLI)

De nombreuses applications industrielles utilisent des signaux de commande MLI (ou PWM, Pulse width modulation), car ces signaux sont robustes en présence de bruit. La technique de modulation de large d'impulsion (PWM) consiste à générer un signal carré avec un rapport cyclique modulé en fonction d'un signal de commande. La valeur moyenne de la tension commandée dépend du rapport cyclique.

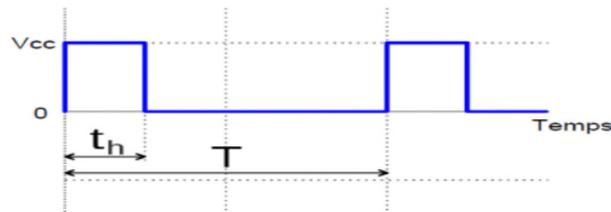


Figure I.19: Signal PWM.

On définit le cycle de service ($= 1-\alpha$) le cycle où l'interrupteur est ouvert.

Par exemple, si $D = 0.2$ alors : Cycle de service = 80%

Figure I.20 suivante montre l'obtention d'un signal PWM. Dans le diagramme supérieur, un signal en dents de scie et le rapport cyclique variable (en rouge), et dans le graphe du bas, une représentation d'un signal carré PWM.

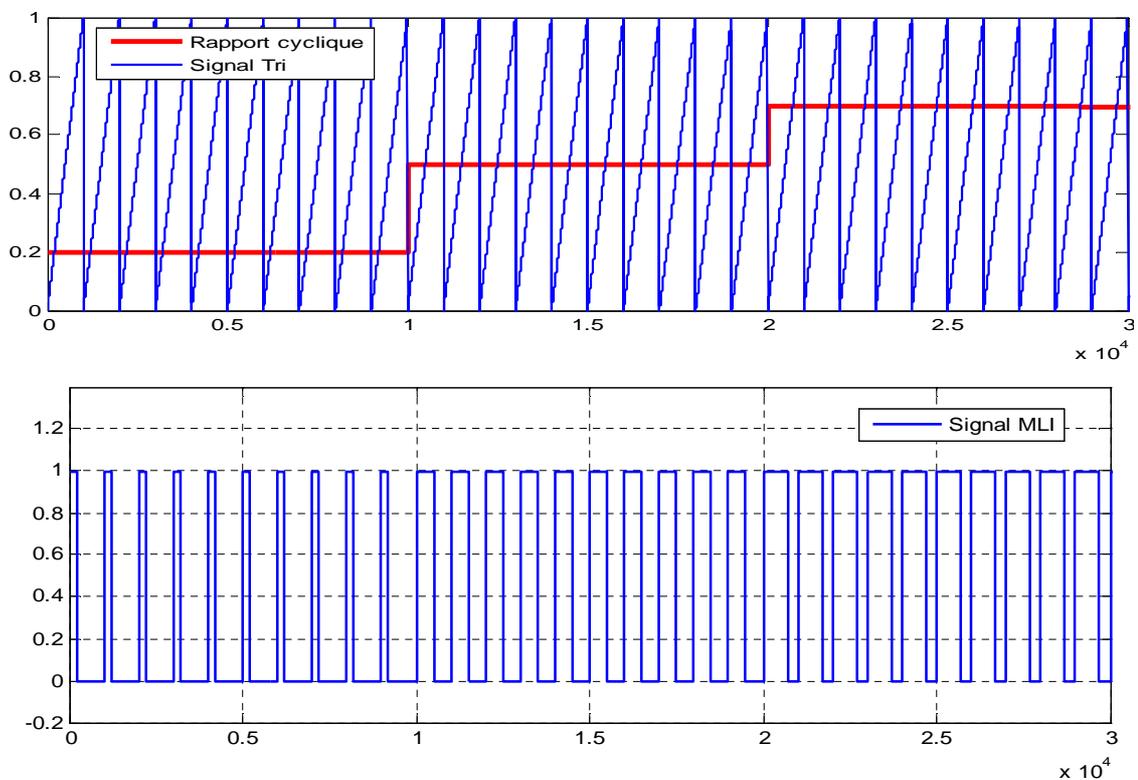


Figure I.20: Obtention d'un signal MLI (PWM).

I.6. La commande MPPT

C'est un montage électronique au niveau du régulateur, permettant de tirer le maximum d'énergie d'une installation solaire photovoltaïque.

Le régulateur MPPT permet d'optimiser le rendement des panneaux solaires jusqu'à 30% : pour un panneau photovoltaïque donné, les batteries recevront 30% d'électricité en plus par rapport à un régulateur solaire classique [12].

Les cellules PV utilisent pour fournir de l'énergie dans le but d'obtenir la puissance maximale du panneau.

Un serveur MPPT est utilisé pour la commande du hacheur. Cette technique a été développée depuis 1968 et il a eu un rôle essentiel pour le fonctionnement du panneau.

Le principe de la commande est de faire varier le rapport cyclique D automatiquement jusqu'à ce que l'on obtienne la valeur optimale de manière à maximiser la puissance du panneau, ainsi quels que soient les conditions météorologiques T et G , la commande du convertisseur place le système au point de fonction maximum (V_{mpp} , I_{mpp}) [12].

I.7. Techniques de recherche de point de puissance maximal MPPT

De nombreuses recherches ont été développées concernant les différents algorithmes du suivi du point de puissance maximale MPP. En tenant compte des variables des paramètres du système et/ou des changements climatiques.

Le schéma fonctionnel de la **Figure I.1** présente un générateur PV avec MPPT, la charge peut être alimentée à partir d'un panneau PV en utilisant MPPT, avec un contrôleur spécifique, pour suivre la puissance maximale générée par le panneau.

Ce problème de poursuite fait jusqu'à nos jours l'objet de plusieurs recherches. Aussi plusieurs méthodes ont été élaborées et utilisées

Dans cette partie, on présentera l'aspect théorique de quelques méthodes (classiques et modernes) du suivi du point de fonctionnement à puissance maximale du système photovoltaïque et qui sont :

- ❖ Méthode de perturbation et observation (PO).
- ❖ Méthode de conductance Incrémentale (IC).
- ❖ Méthode de logique floue (FL).
- ❖ Méthode de la logique floue optimisée par le PSO (PSO-FL).

I.7.1. La technique Perturbation & Observation (PO)

L'algorithme PO consiste à modifier le point de fonctionnement du module PV, en augmentant ou diminuant le facteur de marche d'un convertisseur continu-continu, et mesurer la puissance de sortie avant et après la perturbation. Si la puissance augmente, l'algorithme perturbe le système dans le même sens. Sinon, le système est perturbé dans la direction opposée. Comme son nom l'indique, cette méthode fonctionne en perturbant le système et observant l'impact sur la puissance à la sortie du GPV [13].

La Figure I.21 montre les 4 options possibles présentées lors du suivi du MPP, le point 1 étant la position précédente et le point 2 la position actuelle de chaque cas (A, B, C et D).

- CasA: $\Delta P < 0$ et $\Delta V < 0$
- CasB: $\Delta P < 0$ et $\Delta V > 0$
- CasC: $\Delta P > 0$ et $\Delta V > 0$
- CasD: $\Delta P > 0$ et $\Delta V < 0$

Dans les cas A et C, le rapport cyclique doit diminuer, entraînant une augmentation de la tension du module PV.

Alors que dans les cas B et D, le rapport cyclique doit être augmenté de façon à ce que la tension du module PV diminue.

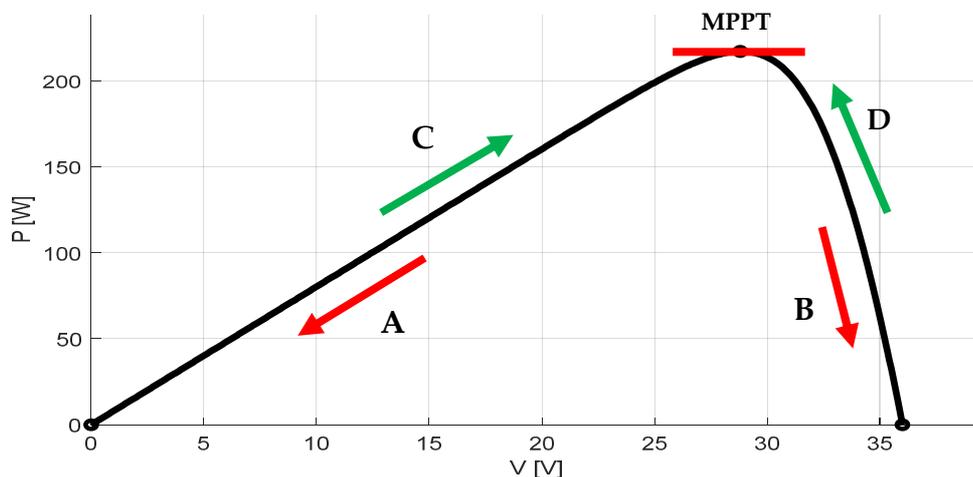


Figure I.21: Le fonctionnement de l'algorithme PO.

L'algorithme peut être représenté mathématiquement par l'expression :

$$V(K) = V(K - 1) + \Delta V \cdot \text{sign} \left(\frac{dP}{dV} \Big|_{V=V_{n-1}} \right) \quad (\text{I-21})$$

Tableau I.1. Tableau de vérité de l'algorithme « perturbation & observation »

Perturbation de la puissance	Observation de la puissance	Prochaine perturbation
Positive (+)	Positive (+)	Positive (+)
Positive (+)	Négative (-)	Négative (-)
Négative (-)	Positive (+)	Négative (-)
Négative(-)	Négative (-)	Positive (+)

L'organigramme mis en œuvre pour le contrôleur PO est présenté par la Figure suivante :

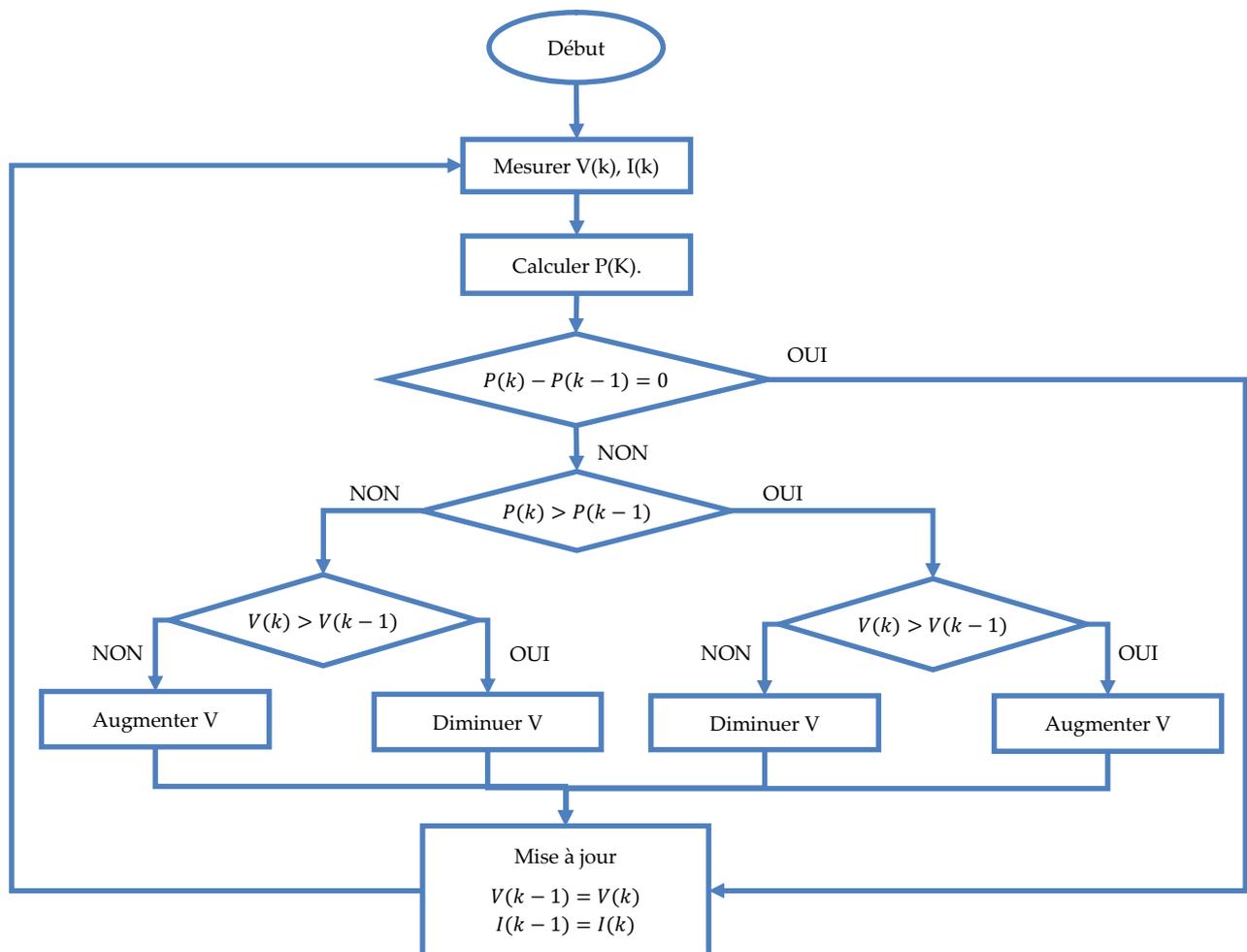


Figure I.22. Organigramme de la méthode PO.

D'après l'organigramme de la Figure précédente, on a réalisé le schéma block suivant :

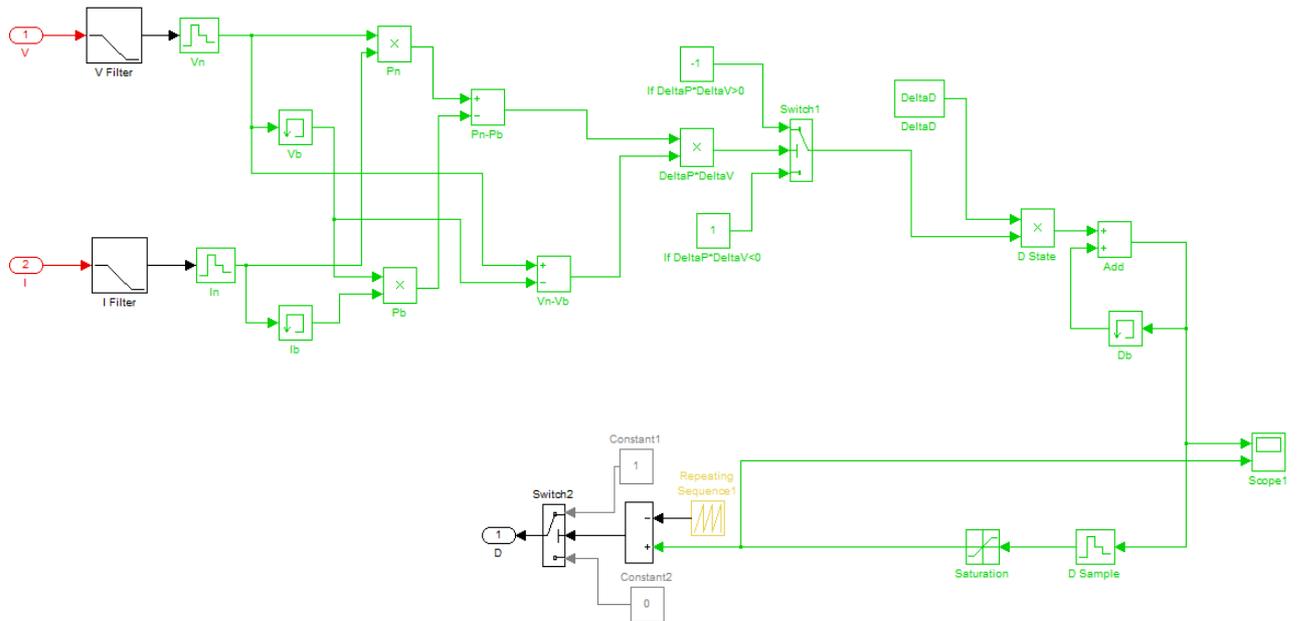


Figure I.23 Programme et schéma block de la technique PO.

Comme le montre la figure II.20, les entrées du système MPPT sont les ΔP et ΔV calculées à partir des signaux $P(k)$, $P(k-1)$, $V(k)$ et $V(k-1)$, les signes de ces deux entrées sont exploités pour savoir dans quelle position de la courbe P-V on se trouve.

Un inconvénient de la méthode de PO est décrit par l'échec lors d'un changement rapide des conditions atmosphériques. Si l'ensoleillement augmente on aura une augmentation de la puissance du panneau, alors que le système va réagir comme si cette augmentation est produite par l'effet de perturbation précédente, il continue dans la même direction qui est une mauvaise direction, ce qui fait qu'il s'éloigne du vrai point de puissance maximale.

Ce processus continue jusqu'à la stabilité de l'ensoleillement, moment où il revient vers le vrai point de puissance maximale. Ceci cause un retard de réponse lors des changements soudains des conditions de fonctionnement et des pertes de puissance.

Ces oscillations qui peuvent être minimisées lors de réduire les valeurs de la variable de perturbation [4].

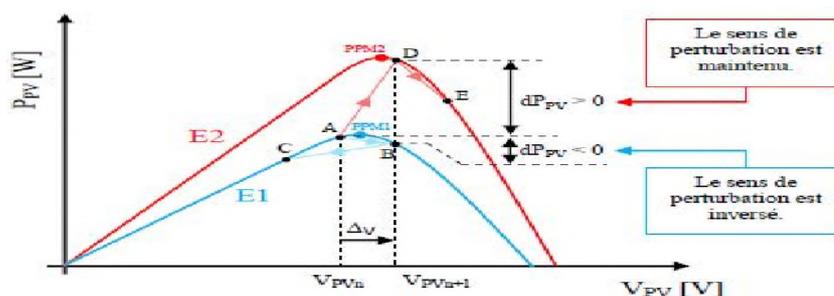


Figure I.24: Divergence de la commande PO lors de variation d'irradiation.

I.7.2. Technique d'Incrémental Conductance (IC)

Dans la méthode de la conductance incrémentielle, la tension aux bornes du réseau est toujours ajustée en fonction de la tension MPP. Elle est basée sur la conductance incrémentielle et instantanée du module PV.

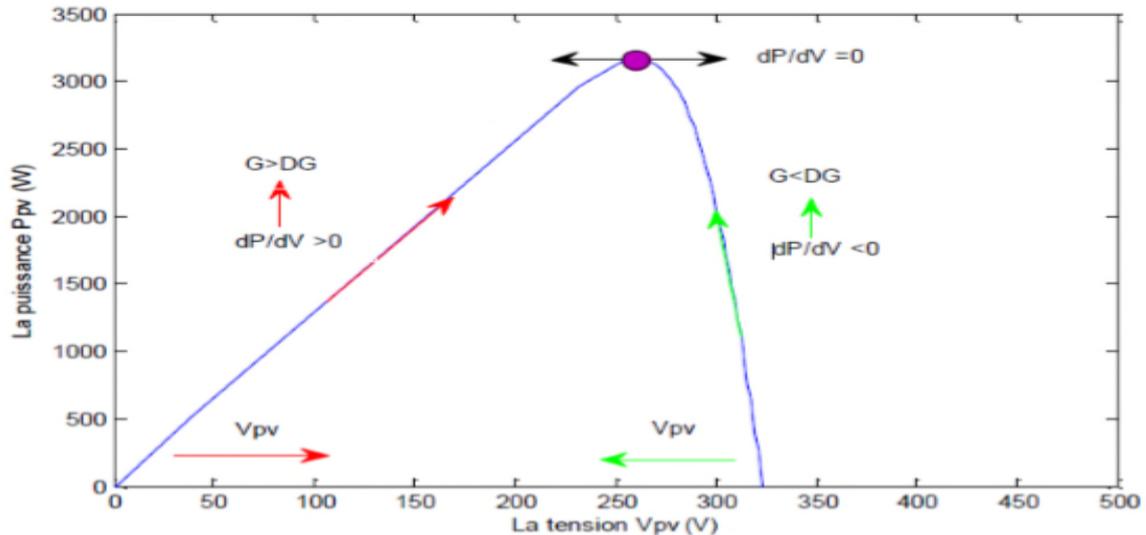


Figure I.25: Principe de la méthode IC

Nous allons chercher le maximum de point d'annulation de la dérivée de puissance de la figure précédente, en comparant la conductance G à la conductance incrémentielle ΔG .

Précisément la puissance en sortie de la source peut s'écrire :

$$P = V \cdot I \quad (\text{I-22})$$

D'où en écrivant la dérivée :

$$\frac{dP}{dV} = \frac{VdI}{dV} + \frac{dV}{dV} \cdot I \quad (\text{I-23})$$

$$\frac{dP}{dV} = \frac{VdI}{dV} + I \quad (\text{I-24})$$

$$\frac{dP}{dV} \cong V \cdot \frac{\Delta I}{\Delta V} + I \quad (\text{I-25})$$

Donc :

$$\begin{array}{ll}
 \frac{dP}{dV} = 0 & \frac{\Delta I}{\Delta V} = -\frac{I}{V} \text{ (a) Au point du MPP} \\
 \frac{dP}{dV} > 0 \text{ ou } & \frac{\Delta I}{\Delta V} > -\frac{I}{V} \text{ (b) A gauche du MPP} \\
 \frac{dP}{dV} < 0 & \frac{\Delta I}{\Delta V} < -\frac{I}{V} \text{ (c) A droite du MPP}
 \end{array}
 \quad (I-26)$$

Les deux équations (b) et (c) sont employées pour déterminer la direction du déplacement de point de fonctionnement MPP dans laquelle la perturbation se produit, elle se répète jusqu'à ce que l'équation (a) soit satisfaite.

À partir des équations (I-26), l'algorithme IC peut être représenté par l'organigramme suivant :

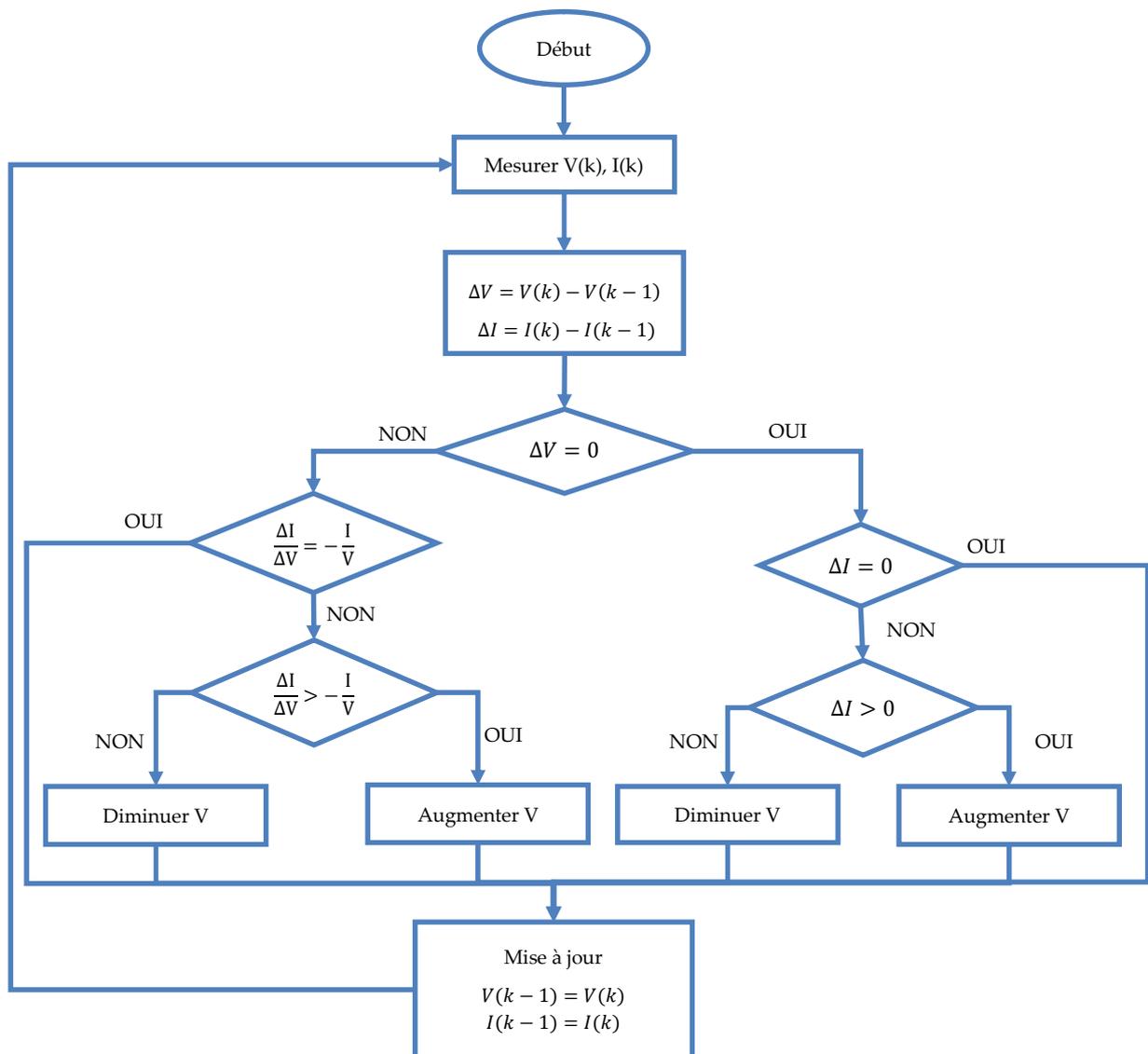


Figure I.26: Organigramme de la méthode INC

En réalité, cet algorithme est une correction de l'algorithme PO puisqu'il est capable de calculer la direction dans laquelle la perturbation du point de fonctionnement devrait être pour atteindre le point MPP.

D'après l'organigramme de la Figure II.23, on a réalisé le schéma block suivant :

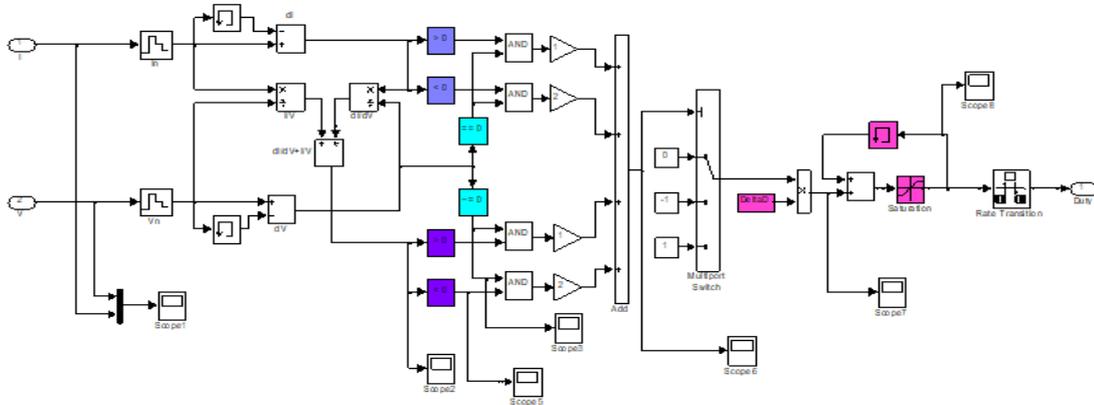


Figure I.27: Programme et schéma bloc de la technique INC.

I.8. Les avantages et les inconvénients

❖ Avantage :

Parlant de la méthode PO, parmi les avantages que l'on peut citer c'est la structure de régulation simple ainsi que le nombre des paramètres mesures réduit.

Pour la méthode INC l'avantage principal de cet algorithme est qu'il offre un bon rendement même sous un changement rapide des conditions atmosphériques. En revanche, les rendements de MPPT de la conductance par incrémentation et de l'algorithme PO sont essentiellement identiques.

❖ Inconvénients :

Pour la méthode PO il existe un dépassement du point maximum optimal en cas de changement rapide des conditions atmosphériques.

Néanmoins, l'inconvénient d'INC est que le circuit de commande est complexe et très couteux [4].

I.9. La logique floue.

La logique floue (Fuzzy Logic) est une borne de l'intelligence artificielle tout comme les réseaux de neurones et les algorithmes génétiques. Au cours de cette dernière décennie, un nombre important de travaux et d'articles scientifiques ont été associés à la commande floue afin d'augmenter le rendement des panneaux photovoltaïques, ainsi que des études comparatives avec les techniques citées précédemment (PO et IC).

I.9.1. Théorie des ensembles flous.

La théorie des ensembles flous est un pas vers un rapprochement entre la précision des mathématiques classiques et le mode réel, c'est le premier rapprochement du concept d'incertitude développé par des chercheurs américains, mais ce n'est qu'en 1965 que le professeur L. Zadeh, automaticien de réputation internationale a proposé les bases théoriques de cette logique dans un article intitulé « fuzzy set » [14].

I.9.1.1. Ensemble flou

La théorie des sous-ensembles flous est une théorie mathématique développée pour l'imprécision relative à certaines classes d'objets et sert de fondement à la logique floue.

On note « X » un ensemble de référence ou univers de recherche et « x » un ensemble de « X ». On dit qu'une partie A de l'ensemble de référence X est un ensemble flou lorsqu'elle est définie de la manière suivante alors :

$$A = \{(x, u_A(x)) | x \in X\} \quad (I-27)$$

Où, $u_A: X \rightarrow [0,1]$, est la fonction d'appartenance d'un ensemble flou « A ».

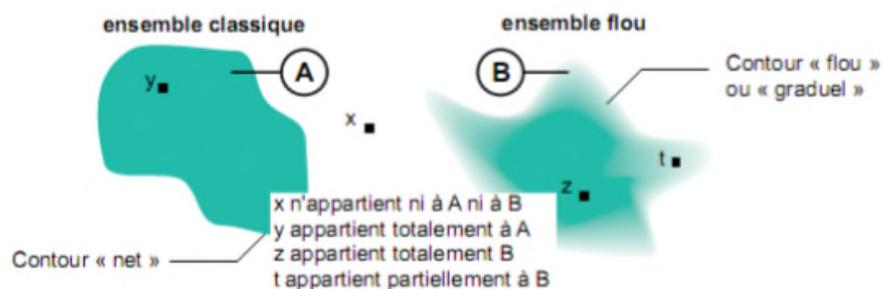


Figure I.28: Différence entre ensemble classique et ensemble Flou.

I.9.1.2. Fonction d'appartenance

Au lieu d'appartenir à l'ensemble « vrai » ou à l'ensemble « faux » de la logique binaire traditionnelle, la logique floue admet des degrés d'appartenance à un ensemble donné. Le degré d'appartenance à un ensemble flou est matérialisé par un nombre compris entre 0 et 1. Une valeur précise de la fonction d'appartenance liée à une valeur de la variable est notée μ et appelée « facteur d'appartenance » [15].

Les fonctions d'appartenances les plus utilisées sont :

- La fonction triangulaire.
- La fonction trapézoïdale.
- La fonction en cloche.

- La fonction gaussienne.

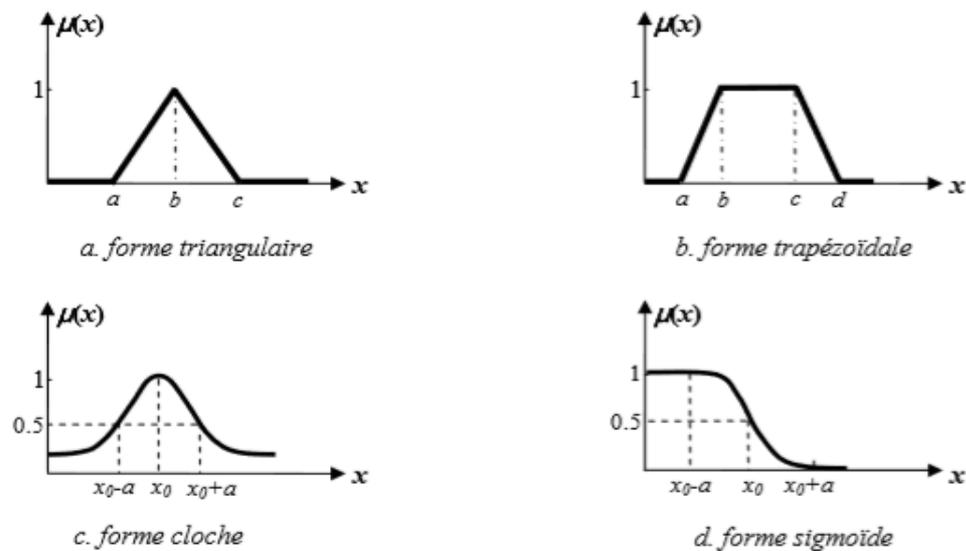


Figure I.29: Formes usuelles des fonctions d'appartenance.

1.9.1.3. Opérateurs de la logique floue

Dans la théorie des ensembles classique, l'ensemble flou est traduit par les opérateurs d'union, d'intersection aussi de négation, et des opérations habituelles telles que addition, soustraction et multiplication.

- **Opérateur NON :**

$$c = \bar{a} = \text{NON}(a) \quad (\text{I-28})$$

$$\mu_c(x) = 1 - \mu_a(x) \quad (\text{I-29})$$

- **Opérateur ET :**

C'est l'intersection de deux ensembles « $a \cap b$ », mais dans la logique floue l'opérateur « ET » est représenté par une fonction de minimum appliquée aux fonctions d'appartenances.

$$\mu_c(x) = \min\{\mu_a(x), \mu_b(x)\} \quad (\text{I-30})$$

Où :

μ_a, μ_b, μ_c signifient respectivement les degrés d'appartenance aux ensembles a, b et c. On parle alors d'opérateur minimum.

- **Opérateur OU :**

C'est l'union de deux ensembles « aUb », mais dans la logique floue l'opérateur « ET » est représenté par une formation maximale appliquée aux fonctions d'appartenances.

$$\mu_c(x) = \max\{\mu_a(x), \mu_b(x)\} \quad (I-31)$$

On constate que la logique classique est un cas particulier de la logique floue. Autrement dit la logique floue est une extension de la logique classique.

I.9.1.4. Raisonnement en logique floue

La base utilisé sous forme règle flou, appelée règle d'inférence exprimée par la décision de connaissance humaine sous forme :

SI (Prémisse) ALORS (Conclusion)

Pour plusieurs conditions nommées prémisse, la combinaison entre elle se fait avec des opérateurs ET, OU, NON.

I.9.2. Principe de la logique

La logique floue est une technique opérationnelle dans le contrôle avancé qui fait une entrée discrète, mais appréciée par les automaticiens, dans de contrôle industriel. Notamment la commande par logique floue a été utilisée dans des systèmes de poursuite de puissance maximale. Et comme bonus, elle présente l'avantage d'être une commande robuste et relativement simple à élaborer même si elle nécessite l'expertise humaine et une bonne connaissance modèle à réguler [16].

Le principe de la commande a pour le but d'obtenir une loi de commande efficace à partir d'une description linguistique qualitative du système. Etudier un tel problème par des méthodes classiques exige souvent des notions avancées en mathématique, cette étude est souvent entachée des erreurs et des imprécisions qui accompagnent la modélisation. La commande floue exploite des connaissances et des expériences acquises par l'opérateur à l'aide des réglés basées sur un vocabulaire symbolique.

Donc l'idée de la logique floue et de transmettre cette richesse de raisonnement humain à un ordinateur. Cette logique peut être considérée comme une technique puissante pour le traitement de connaissances incertaines, prenant comme exemple des mots ou des expressions naturelles telle que froid, tiède, chaud...etc.

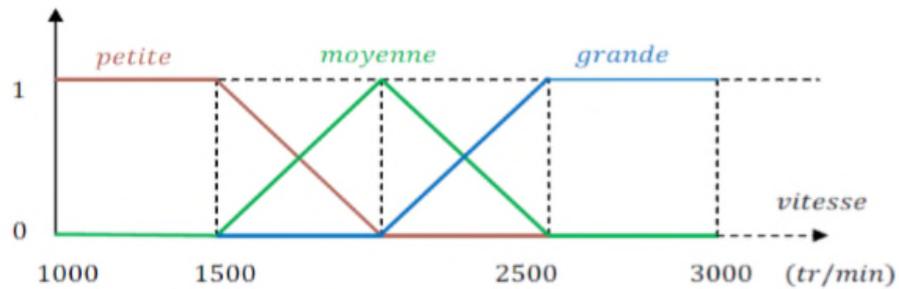


Figure I.30: Variables linguistiques, termes linguistiques et univers de discours.

I.9.3. Structure d'une commande à logique floue

La mise en place d'un contrôleur flou quel que soit le type d'application se réalise généralement avec la même configuration répartie en quatre blocs principaux [16].

1. Base de connaissance :

La base de connaissances est composée d'une base de données et d'une base de règles. On peut distinguer plusieurs étapes dans le traitement des règles. Un schéma représentatif peut être le suivant :

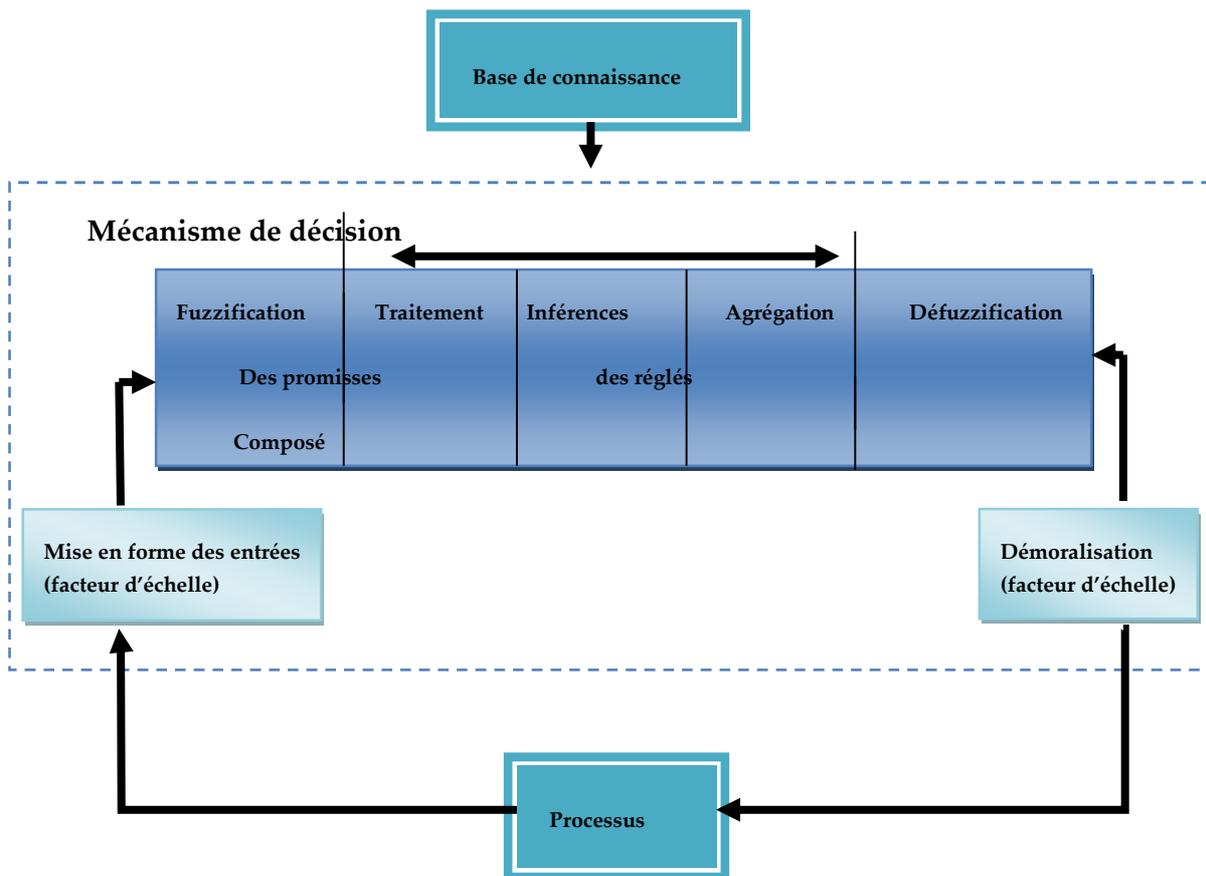


Figure I.31: Structure de base d'un contrôleur floue.

a. Base de données :

Par des concepts qui sont basés sur l'expérience et le jugement de l'expert, on introduit habituellement pour chaque variable trois, cinq ou sept sous-ensemble. Plus le nombre de sous-ensemble n'est grand, plus la sensibilité de la commande sera grande.

Généralement les fonctions d'appartenance sont caractérisées par des symboles suivants :

- **NG** : Négatif-Grand, - **NM** : Négatif-Moyen, - **NP** : Négatif-Petit,
- **Z** : Zéro, - **PP** : Positif-Petit, - **PM** : Positif-Moyen,
- **PG** : Positif-Grand.

b. Base de règles :

Comporte des connaissances concernant le procédé présenté sous forme des règles indicatives tirées de l'expérience et de l'intuition des opérateurs humains. La base de règles contient des lois de la forme :

« Si X_1 est A_1 et X_2 est A_2 ...et X_n est A_n Alors Y est B »

Ou X et Y sont des grandeurs du problème de commande, A et B labels linguistiques. Suivant la nature de B on a alors :

- **Contrôleur de type Mamdani** : B est de type linguistique. Exemple :

Si l'erreur est « Négatif Moyen » et la variation de l'erreur est « Positif Petit » Alors la commande est « Négatif Petit ».

- **Contrôleur de sugeno** : B est une valeur numérique, on parlera alors de règle « ordre zéro ».

Exemple : Si l'erreur est « Négatif Moyen » et la variation de l'erreur est « Positif Petit » Alors

la commande est -0.3.

2. Fuzzification :

La Fuzzification est l'étape qui permet de transformer une grandeur mesurée sur le processus en un ensemble flou, il permet d'assurer le passage des grandeurs physiques d'entrée du contrôleur en variables linguistiques qui peuvent être traitées par les inférences.

3. Le mécanisme de décision (Bloc d'inférence) :

Permet de calculer les ensembles flous associés à la commande, le mécanisme d'inférence calcule le sous-ensemble relatif à la commande du système. Il existe différentes méthodes d'inférence :

- Méthode d'inférence (Max-Min).
- Méthode d'inférence (Max-Produit).
- Méthode d'inférence (Somme-Produit).

4. Défuzzification :

Il s'agit de calculer à partir des degrés d'appartenance l'abscisse qui correspond à la valeur de sortie, cela se fait avec trois méthodes telles que méthode du centre de gravité, méthode des hauteurs pondérées et méthode par valeur maximum.

I.9.4. Application du contrôleur flou pour la commande MPPT

I.9.4.1. La Fuzzification

À partir de la relation de point de puissance maximal ($\Delta P/\Delta V=0$) le contrôleur flou possède deux entrées la première sera la variation de la puissance par rapport à la tension nommée l'erreur E, la deuxième est la variation ΔE qui représente le sens et la vitesse de convergence. En sortie ΔD qui est la variation du rapport cyclique du convertisseur DC/DC.

Les deux entrées de contrôleur sont définies par les équations suivantes :

$$\mu_c(x) = \max\{\mu_a(x), \mu_b(x)\} \quad (\text{I-32})$$

$$\Delta E(t) = E(t) - E(t - 1) \quad (\text{I-33})$$

Les variables d'entrées E et CE sont définie par les termes linguistiques ; Négatif Grand (NG), Erreur nulle ou bien Zéro (EZ), Positif Grand (PG).

La variable de sortie D partitionné en plusieurs classes pour plus de précision ; Négatif Petit (NP), Négatif Grand (NG), Erreur nul ou bien Zéro (EZ), Positif Grand (PG), Positif Petit (PP).

La figure suivante montre l'interface d'accueil du fichier FIS :

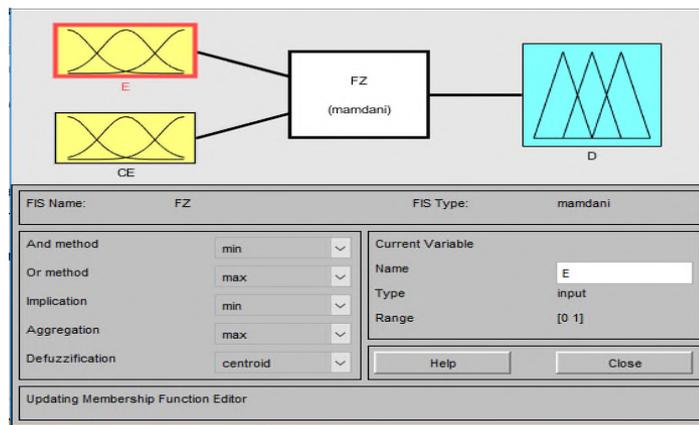


Figure I.32: Editeur de fichier FIS.

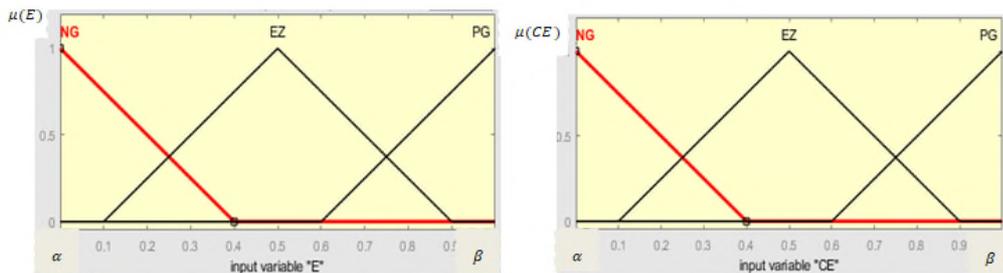


Figure I.33: Fonction d'appartenance pour les entrées E et CE.

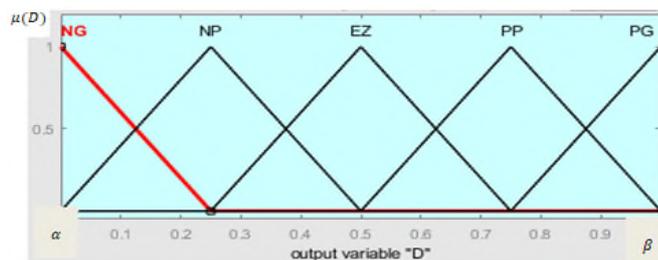


Figure I.34: Fonction d'appartenance pour la sortie D.

Avec $[D, \beta]$: Intervalle de variation des variables d'entrées et de sortie.

$\mu(E)$: Fonction d'appartenance de la variable E.

$\mu(CE)$: Fonction d'appartenance de la variable CE.

$\mu(D)$: Fonction d'appartenance de D.

1.9.4.2. Inférence

Consiste à définir un rapport logique entre les entrées et a sortie, utilisant des règles de type IF... AND... THEN, par exemple :

IF E est Positif Grand AND CE est Zéro THEN D est Positif Petit. Ce qui veut dire que:

"Si le point de fonctionnement est loin du point de puissance maximale (MPP) vers le côté gauche, et le changement de la pente de la courbe P(V) est environ de Zéro; Alors en augment le rapport cyclique largement pour atteindre le MPP [16].

La figure suivante montre le principe de MPPT avec la logique floue :

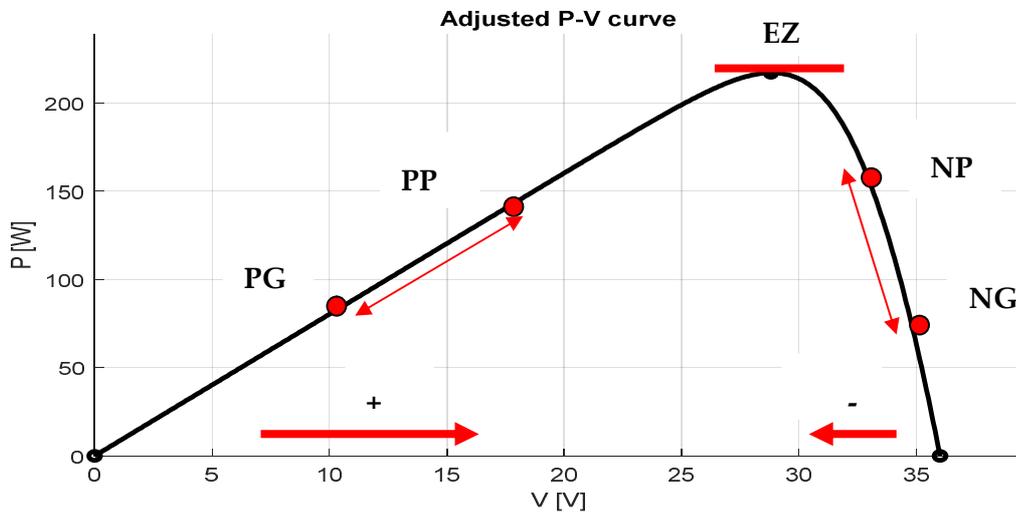


Figure I.35: Principe de MPPT floue.

Pour les différentes méthodes d'inférence, la méthode MAX-MIN c'est la méthode la plus couramment utilisée pour cette commande, elle consiste à utiliser opérateur MIN pour ET et opérateur MAX pour OU.

I.9.5. Défuzzification

C'est une étape vers laquelle on attribue pour D des valeurs numériques. Il existe plusieurs méthodes de Défuzzification l'une de ces méthodes les plus utilisées est la méthode de centre de gravité. Son principe est l'extraction barycentrique de la commande, qui consiste à faire la moyenne des valeurs du référentiel pondérées par leurs degrés d'appartenance.

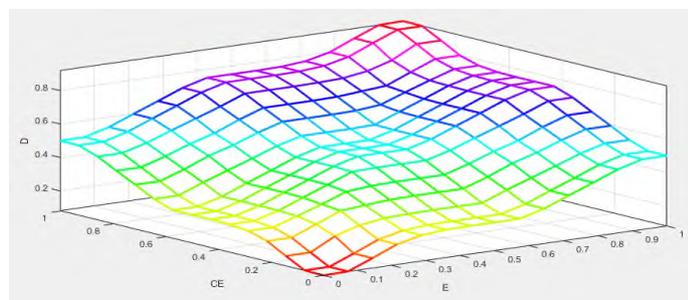


Figure I.36: Surface de la variation des fonctions d'appartenance.

La figure II.24 représente le schéma block Matlab/Simulink de l'algorithme à base de logique floue qu'on a réalisé et la deuxième figure représente les blocs internes de MPPT.

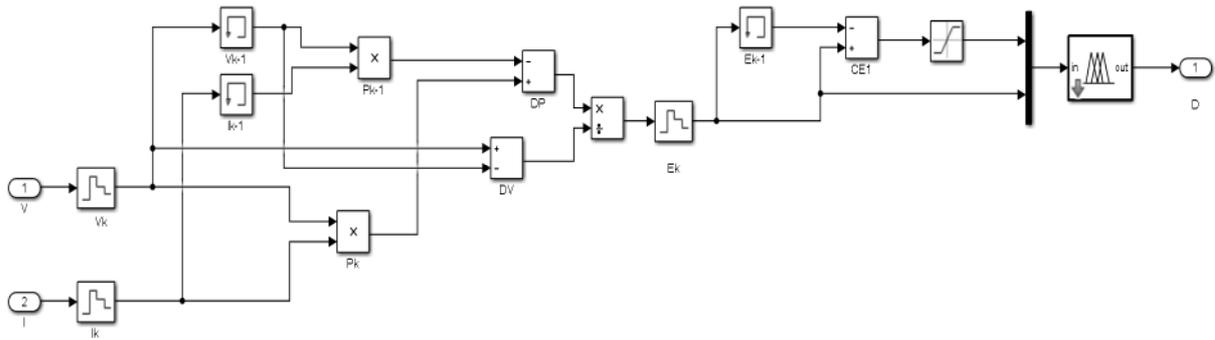


Figure I.37: Représentation de la commande MPPT avec la logique floue.

La difficulté de choisir des paramètres flous nous a permis de chercher une solution pour résoudre le problème, on s'est alors orienté vers l'utilisation des algorithmes évolutionnaires pour leur efficacité.

II.9 Algorithmes évolutionnaires

Les algorithmes évolutionnaires sont des algorithmes d'optimisations qui s'appuient sur l'évolution naturelle. Le problème d'optimisation est défini comme la recherche du minimum ou maximum d'une fonction donnée. Il existe plusieurs méthodes pour le calcul évolutif, leur principe général est de modéliser les notions d'évolution dans la nature. Parmi elles et récemment, l'optimisation par essaim de particules (PSO) est apparue comme une méthode prometteuse en raison de ses capacités à optimiser dans des espaces de recherche multimodaux complexes et peut être même appliquée à des fonctions non différentiables[17].

I.9.6. Principe du PSO

Le PSO est un algorithme inspiré des mouvements d'un essaim d'oiseaux. Il a été développé au milieu des années 90 par deux chercheurs américains, Russel Eberhart, ingénieur électricien, et James Kennedy, socio-psychologue. Le PSO fait varier la vitesse et la position de chaque individu à l'itération k par les formules suivantes :

$$Vi^{k+1} = w.Vi^k + C1.R1(Xi^p - Xi^k) + C2.R2(Xg - Xi^k) \quad (I-34)$$

$$Xi^{k+1} = Xi^k + Vi^k + 1 \quad (I-35)$$

Ou :

- w est le poids de chaque individu.
- Xi^p désigne le meilleur individu dans l'entourage de la particule i (personnel best ou la meilleure position qu'elle a connu).

- Xg désigne la position du meilleur individu (particule) de tout l'essaim (on l'appelle global best).
- $C1$ et $C2$ sont des coefficients d'accélération, $R1$ et $R2$ des vecteurs aléatoires, de même dimension que les particules, générés dans l'intervalle $[0, 1]^D$ ou D est la dimension du problème qu'on veut résoudre.

Le principe du PSO est très simple. Après initialisation de la population et de sa vitesse et l'initialisation des paramètres de l'algorithme (w , $C1$, $C2$, taille de la population N , limite des positions et des vitesses), chaque individu de position X_i corrige sa vitesse et sa position selon l'équation (II-34) et (II-35). Chaque agent de l'essaim garde en mémoire la meilleure position par laquelle il est déjà passé, que l'on note $X^p(t)$ [18]. À chaque itération k , pour chaque individu i , si la fitness des particules X_i^{k+1} est meilleure que le meilleur individu (Xg), alors $Xg = X_i^{k+1}$. Et si la fitness des particules X_i^{k+1} est meilleure que la fitness de la meilleure position connue par la particule (ou l'individu) i , c'est-à-dire si la fitness de X_i^{k+1} est meilleure que celle de (X_i^p), alors $X_i^p = X_i^{k+1}$.

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons modélisé mathématiquement le panneau solaire et le BOOST. Pour obtenir un modèle exploitable sur Simulink, les équations développées ont été réalisées dans des schémas blocs. Ensuite nous avons présentés différentes techniques pour la poursuite du point de fonctionnement à puissance maximale. Nous avons commencé par les méthodes classiques (PO et IC) ; on a présenté les organigrammes ensuite le schéma bloc réalisé sous le Simulink.

Nous avons présenté aussi la théorie des ensembles flous, son fondement et son aspect mathématique exploité en régulation automatique. L'algorithme PSO a été aussi présenté, ce dernier sera utilisé dans le chapitre suivant, qui présentent les résultats de la commande MPPT, pour optimiser un contrôleur flou dans le cas de l'ombrage partiel.

Chapitre II. Résultat et discussions.

Introduction

La simulation est un outil pour l'évaluation des performances théoriques d'un système. En effet cette partie nous permettra d'effectuer des simulations d'un générateur photovoltaïque suivi par un convertisseur DC/DC et de tester les commandes MPPT. Ceci nous permet de modifier les paramètres du système facilement telles que les conditions météorologiques, et de visualiser l'apport de la commande sur le générateur photovoltaïque.

Le logiciel MATLAB et son extension graphique associée SIMULINK font partie d'un ensemble d'outils intégrés au traitement du signal, présentent la possibilité de simuler des systèmes à leurs états continus et discrets, il est donc bien adapté pour tester les commandes MPPT numériques. Ce chapitre est consacré à la simulation et l'étude comparative entre les méthodes de commande à fin d'obtenir de meilleurs résultats.

Résultats de simulation.

II.1. Simulation du système photovoltaïque.

II.1.1. Teste sur un convertisseur DC/DC.

La Figure III.1 donne le schéma block d'un BOOST testé sous MATLAB/SIMULINK, relié à une charge résistive avec une tension d'entrée : $V_e=10V$.

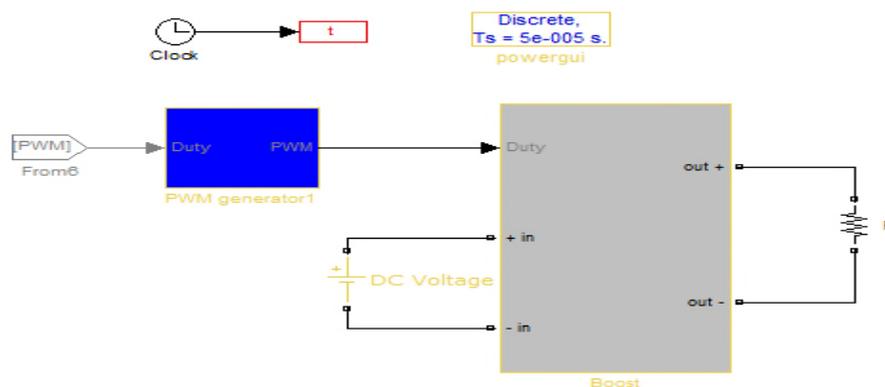


Figure II.1. Schéma d'un BOOST sous MATLAB/SIMULINK.

Tableau II.1. Paramètres du convertisseur DC/DC BOOST.

C1	C2	L	R
----	----	---	---

1 ^e -3(F)	1 ^e -3(F)	4 ^e -4(H)	65(ohm)
----------------------	----------------------	----------------------	---------

Les résultats de simulation pour une fréquence $f=10e-3\text{Hz}$, sont illustrés sur la figure ci-dessus.

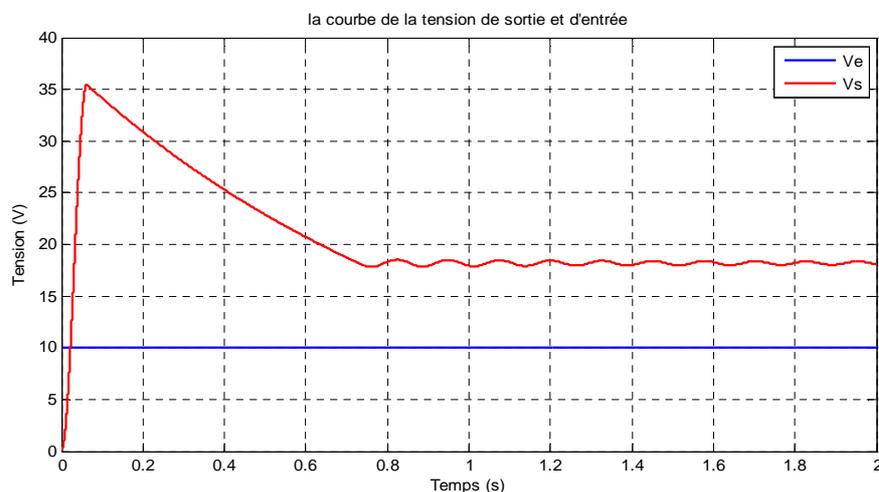


Figure II.2. Courbes de la tension d'entrée et de sortie d'un BOOST.

Pour une tension d'entrée $V_e= 10\text{V}$ la tension de sortie est presque égale a 20V , avec les chutes de tension au niveau du BOOST tel que $V_s \cong 18.72\text{V}$ se qui vérifie l'équation II.22 dans le chapitre 2 tel que : $V_s = \frac{1}{1-\alpha} \cdot V_e$

II.1.2. Simulation du panneau photovoltaïque.

La figure suivante représente le modèle du panneau photovoltaïque étudié.

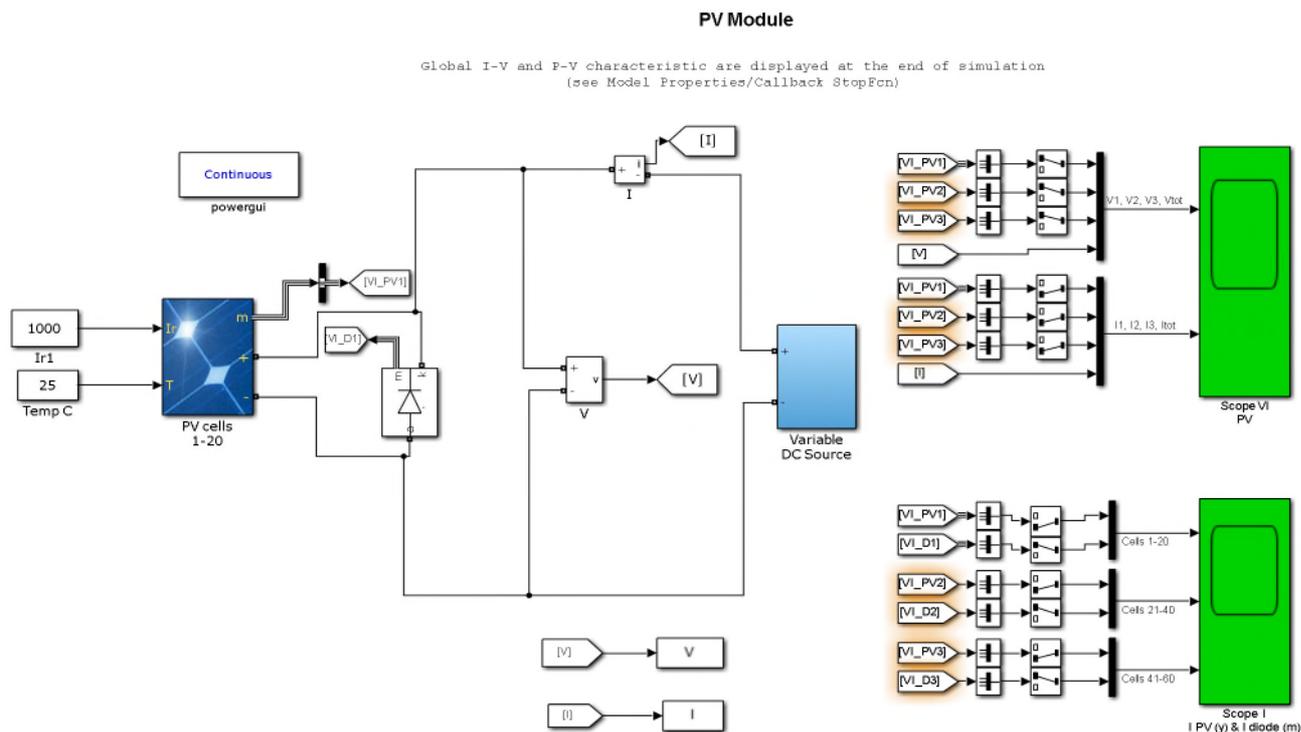


Figure II.3. Schéma de simulation d'un panneau PV étudié.

Les paramètres du panneau de type ARRAY sont donnés par la figure suivant :

PV array (mask) (link)

Implements a PV array built of strings of PV modules connected in parallel. Each string consists of modules connected in series.
Allows modeling of a variety of preset PV modules available from NREL System Advisor Model (Jan. 2014) as well as user-defined PV module.

Input 1 = Sun irradiance, in W/m2, and input 2 = Cell temperature, in deg.C.

Parameters **Advanced**

Array data

Parallel strings

Series-connected modules per string

Module data

Module: **User-defined**

Maximum Power (W) Cells per module (Ncell)

Open circuit voltage Voc (V) Short-circuit current Isc (A)

Voltage at maximum power point Vmp (V) Current at maximum power point Imp (A)

Temperature coefficient of Voc (%/deg.C) Temperature coefficient of Isc (%/deg.C)

Display I-V and P-V characteristics of ...

array @ 25 deg.C & specified irradiances

Irradiances (W/m2)

Plot

Model parameters

Light-generated current IL (A)

Diode saturation current IO (A)

Diode ideality factor

Shunt resistance Rsh (ohms)

Series resistance Rs (ohms)

Figure II.4. Paramètre de cellule PV.

Pour l'analyse du fonctionnement du panneau PV choisi, en se basant sur le modèle étudié, une série de simulation ainsi que les résultats obtenus sont présentés sur les figures suivantes, tel que :

- La première courbe présente la caractéristique Courant-Tension du panneau PV pour l'éclairement $G = 1000\text{W}/\text{m}^2$ et de température $T = 25^\circ\text{C}$.
- La deuxième courbe présente la caractéristique Puissance-Tension du panneau PV pour l'éclairement $G = 1000\text{W}/\text{m}^2$ et de température $T = 25^\circ\text{C}$.

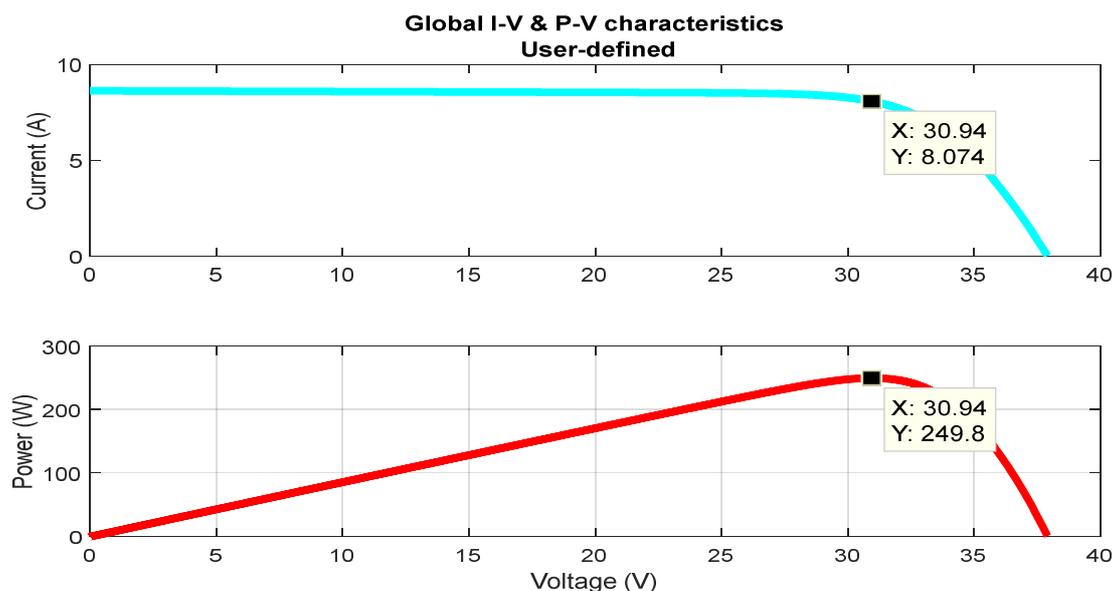


Figure II.5. Courbe des caractéristiques du I-V et P-V du panneau.

On note alors que pour le bon fonctionnement du panneau PV le point de puissance maximale doit atteindre une puissance $P \approx 250\text{W}$, et $I \approx 8\text{A}$.

II.1.3. Simulation du système photovoltaïque avec la commande MPPT.

Pour tester les fonctionnements des algorithmes modélisés précédemment, on a inséré le bloc de commande MPPT pour le système photovoltaïque, les entrées de la commande sont le courant et la tension du panneau, la sortie représente le pas du rapport cyclique qui génère le signal de modulation PWM.

La **Figure II.6** illustre le bloc schématique de SIMULINK du système PV adapté par la commande MPPT :

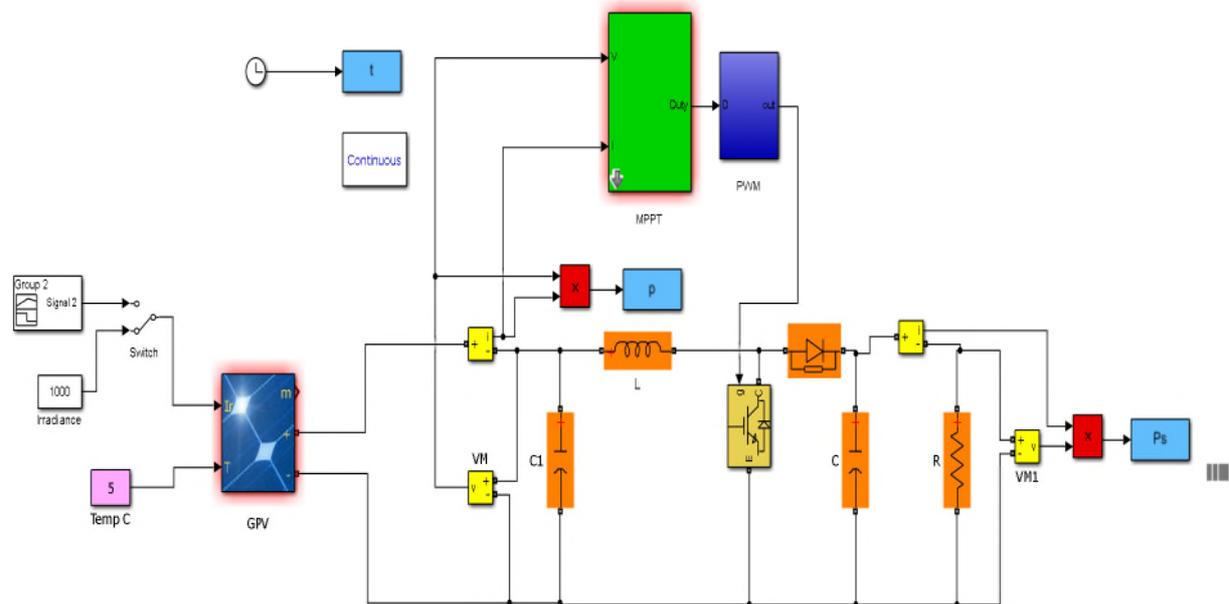


Figure II.6 Modélisation d'un SPV sous MATLAB\SIMULINK

II.1.3.1. Simulation avec la commande PO.

Pour avoir une meilleure connexion entre le GPV et la charge et bénéficier de la puissance maximale, on présente l'une des méthodes de la commande MPPT qui est la méthode PO, partant de la modélisation de cette algorithme aux résultats des tests.

Le principe est de calculer ΔP et ΔV afin de se rapprocher de la zone du PPM. Dans le cadre de ce travail, on analyse la conception et la simulation d'une commande MPPT numérique « perturbation et observation » qu'on a appliqué au GPV avec le convertisseur statique débitant sur une charge. Un masque de sous-système est utilisé pour faciliter le paramétrage du rapport cyclique et de la fréquence du MPPT.

Subsystem (mask)	
Parameters	
Initial value for D output	<input type="text" value="0.9"/>
Dmax	<input type="text" value="1"/>
Dmin	<input type="text" value="0"/>
DeltaD	<input type="text" value="0.001"/>
Command frequency (Hz)	<input type="text" value="800"/>
Simple time (s)	<input type="text" value="Ts*9"/>

Figure II.7. Masque des paramètres de la commande PO.

1. Simulation sous des conditions climatiques stables

Pour une évaluation des performances du système photovoltaïque de la commande MPPT du type PO, nous avons simulé le fonctionnement d'un ensemble (GPV-BOOST-MPPT et une charge) sous des conditions atmosphériques fixes (un éclaircissement 1000W/m^2 et une température de 25°C)

Les résultats de simulation du fonctionnement du système photovoltaïque muni de la commande MPPT « perturbation et observation » sont représentés par les figures suivantes pour un pas de perturbation de 0.01 et 0.002.

Pas du rapport cyclique $\Delta D=0.01$

Les Figures suivantes représentent, respectivement, l'évolution du rapport cyclique, la puissance à l'entrée et à la sortie du Boost, la tension à l'entrée et la sortie du Boost.

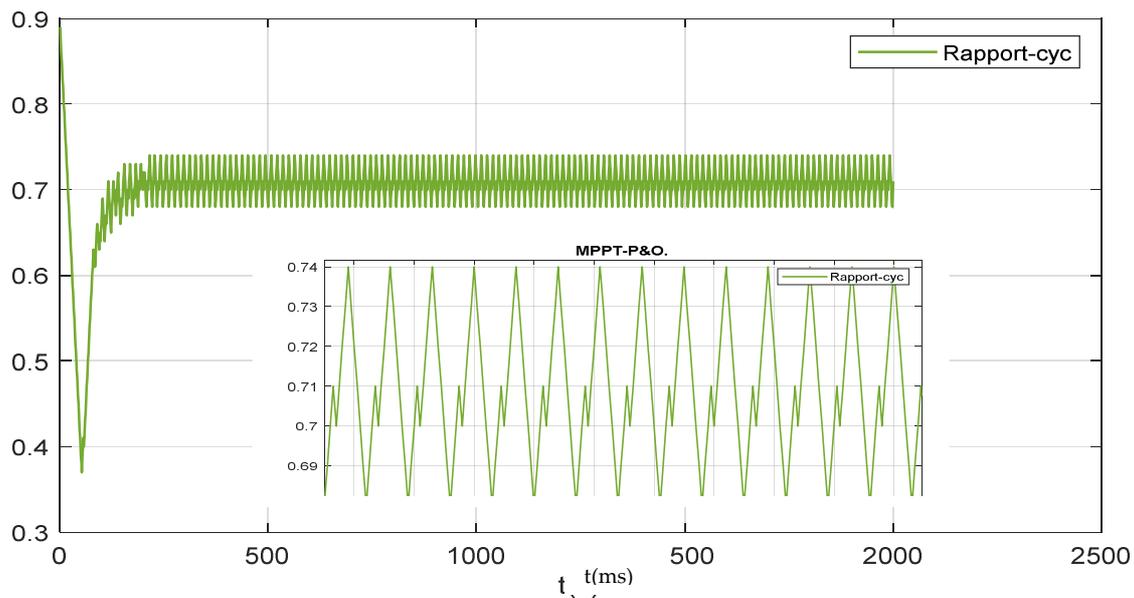


Figure II.8. Courbe d'un pas de rapport cyclique égal à 0.01.

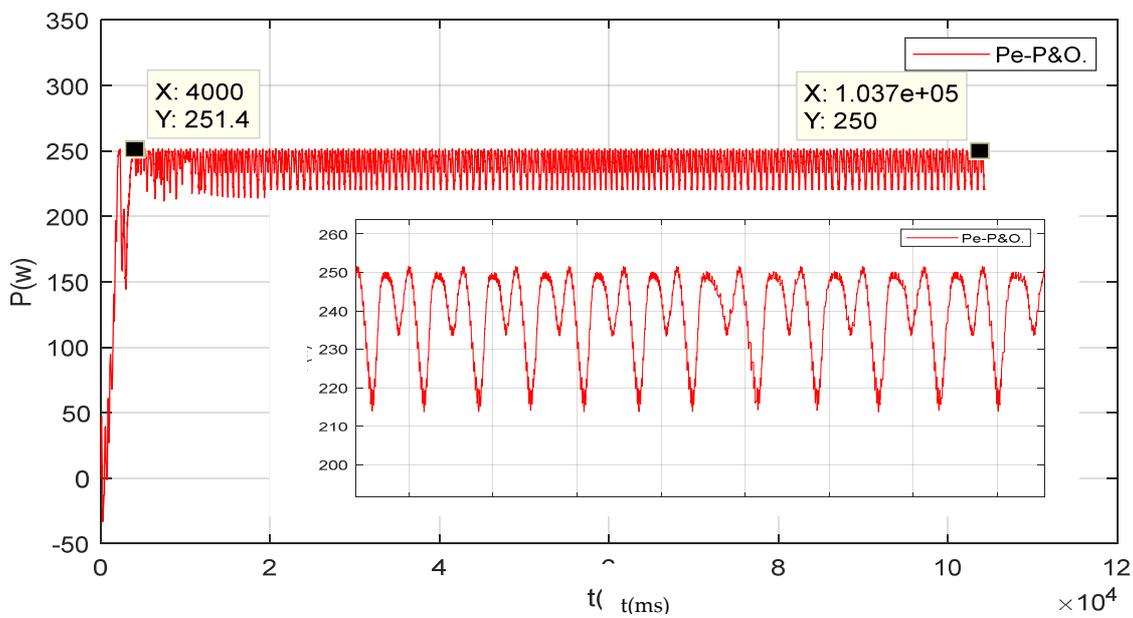


Figure II.9. Puissance aux bornes du GPV pour un pas de 0.01.

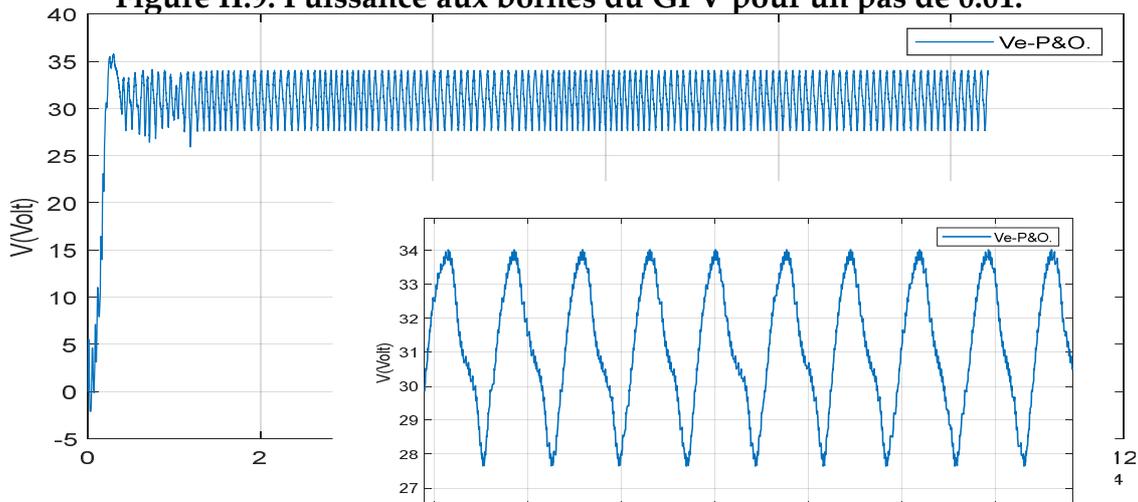


Figure III.9. Tension du générateur photovoltaïque pour un pas de 0.01.

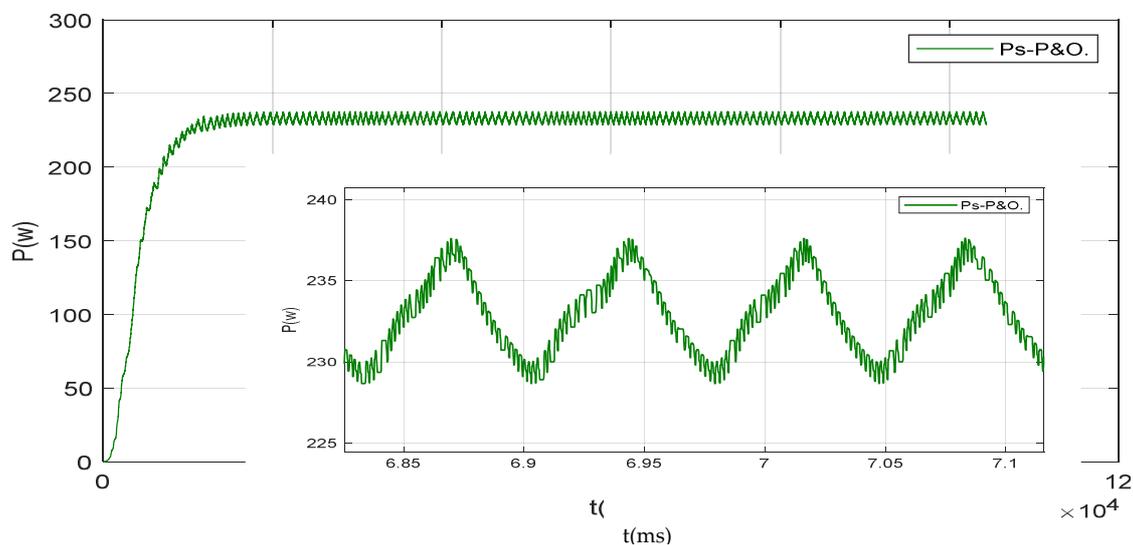


Figure II.10. Puissance de sortie du système pour un pas de 0.01.

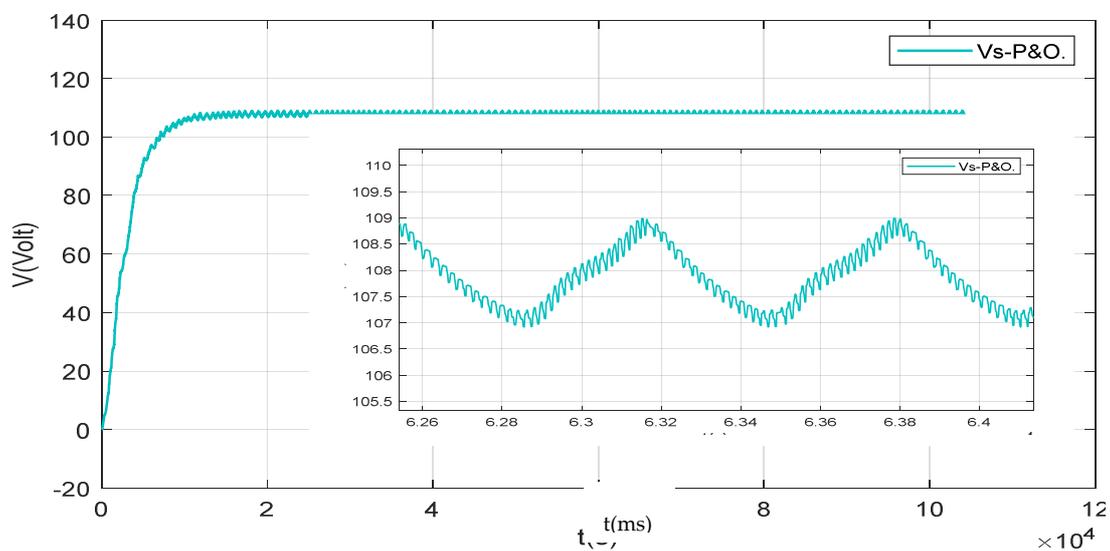


Figure II.11. Tension de sortie du système pour un pas de 0.01.

Pas du rapport cyclique $\Delta D=0.002$

Les Figures suivantes représentent, respectivement, l'évolution du rapport cyclique, la puissance à l'entrée et à la sortie du Boost, la tension à l'entée et la sortie du Boost.

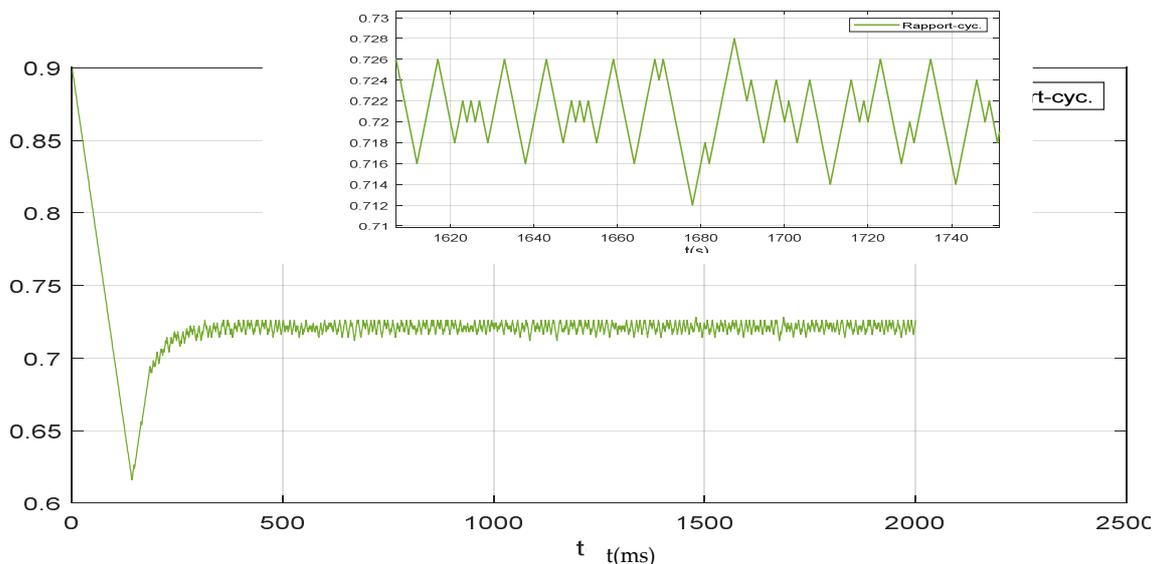


Figure II.12. Courbe d'un pas de rapport cyclique égal à 0.002.

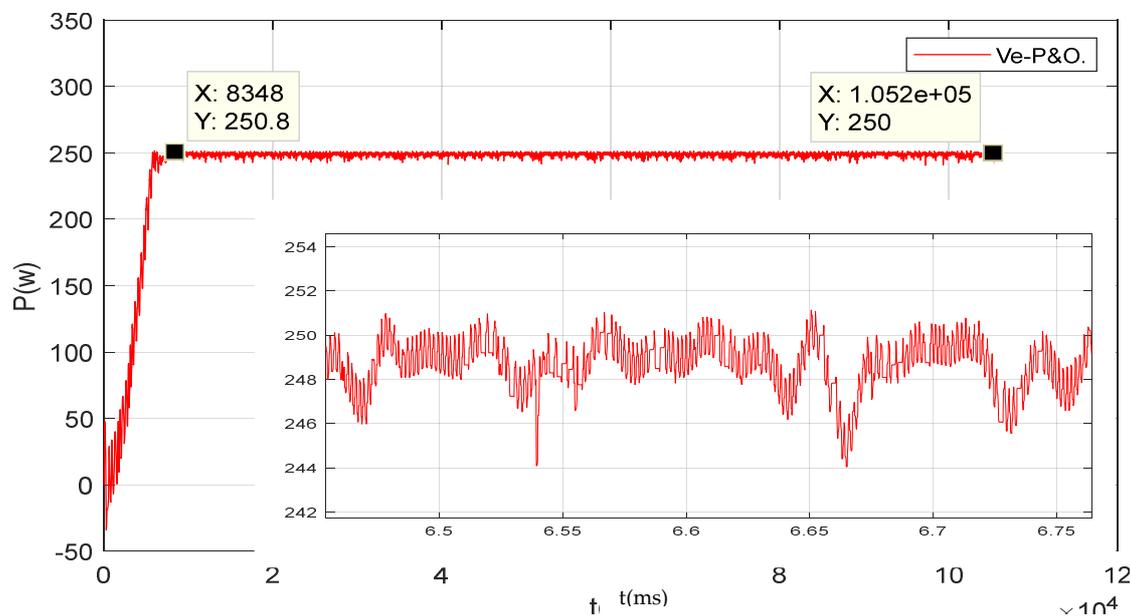


Figure II.13. Courbe de la tension aux bornes du GPV pour un pas de 0.002.

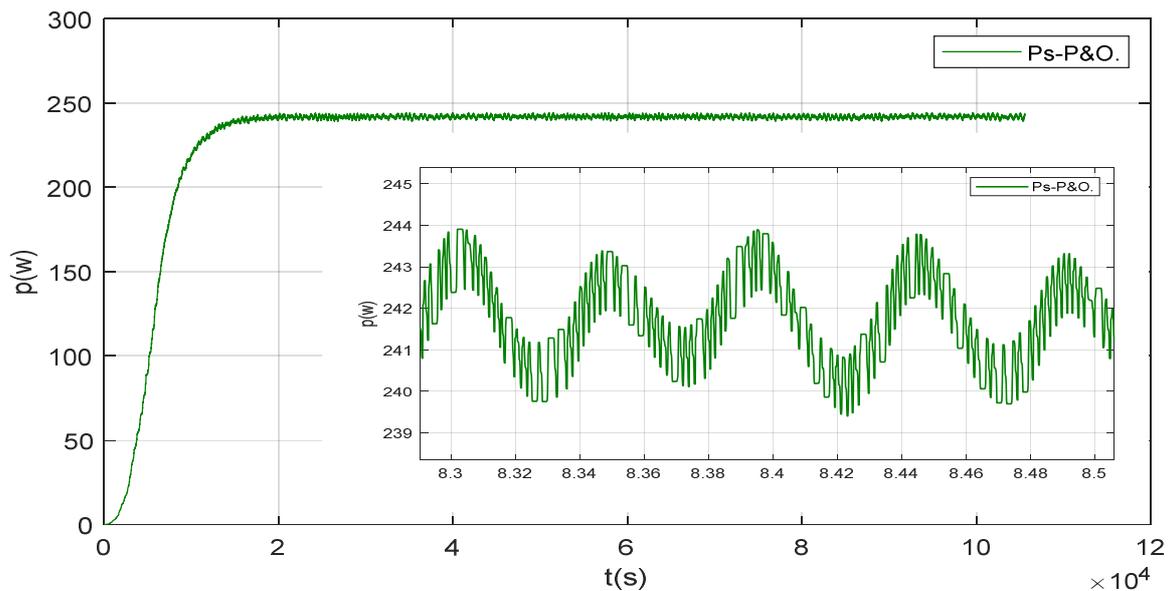


Figure II.14. Puissance de sortie du système pour un pas de 0.002.

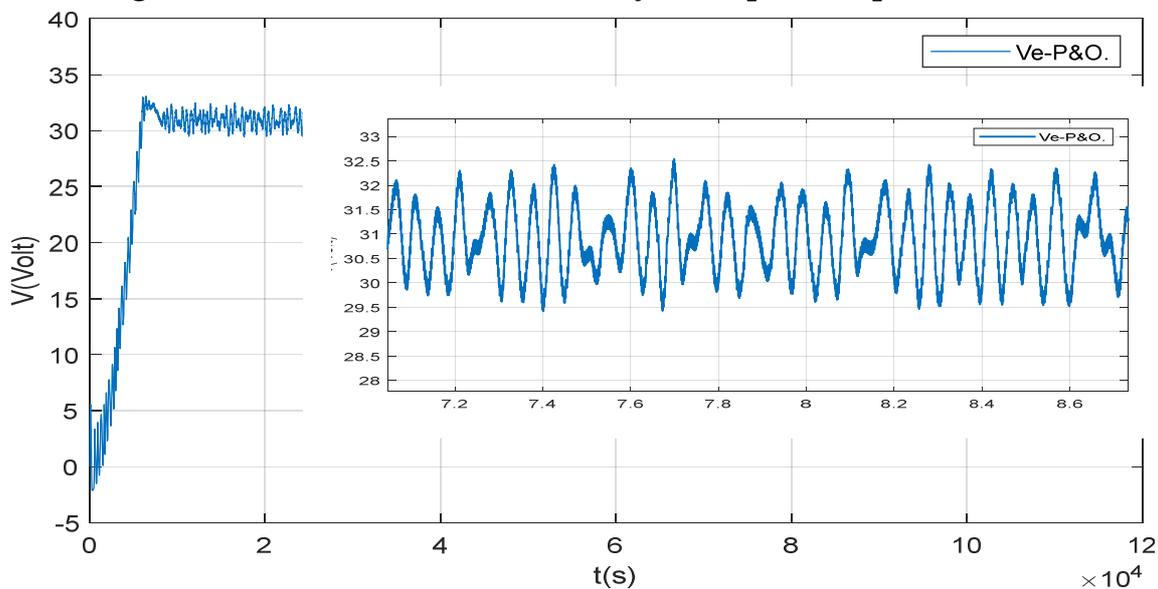


Figure II.15. Tension à la borne du générateur photovoltaïque pour un pas de 0.002.

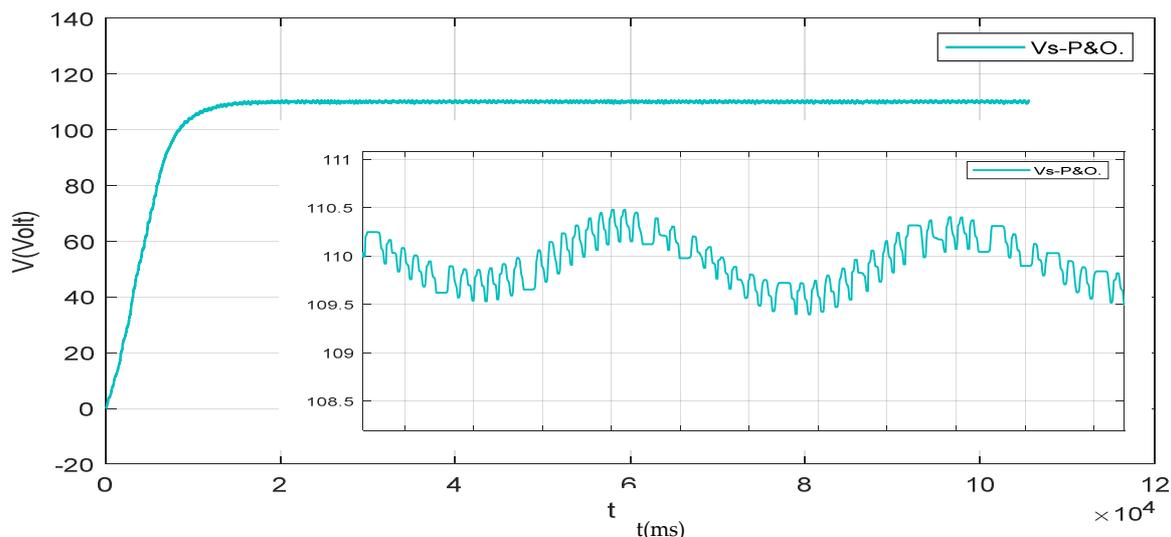


Figure II.16. Tension de sortie du système pour un pas de 0.002.

2. Fonctionnement sous des conditions climatiques variables.

Nous avons testé le fonctionnement du système étudié sous une température fixe de 25°C et un éclairage variable (200W \m², 1000W \m², 500W \m²,) comme illustré dans la figure suivante.



Figure II.17 Profile d'un éclairage injecté dans le générateur photovoltaïque.

La structure nous montre le fonctionnement de la puissance de GPV suivant le changement de l'éclairage, et les figures suivantes nous montrent les résultats.

Pour un pas de 0.002 on a alors :

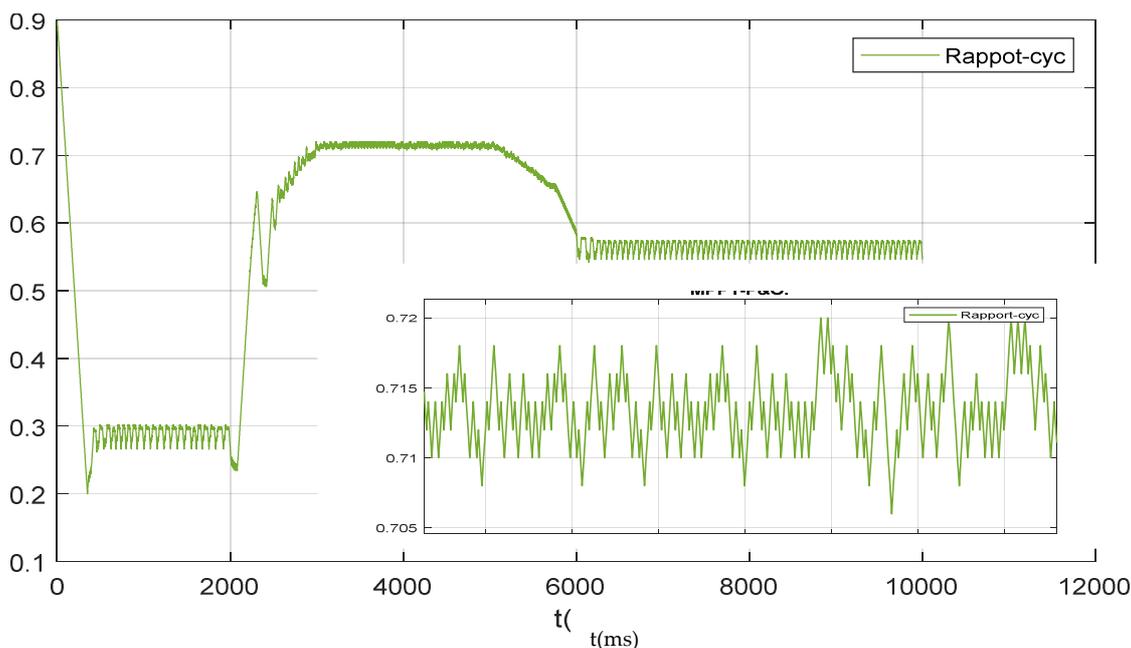


Figure II.18. Courbe du pas d'un rapport cyclique égal à 0.002.

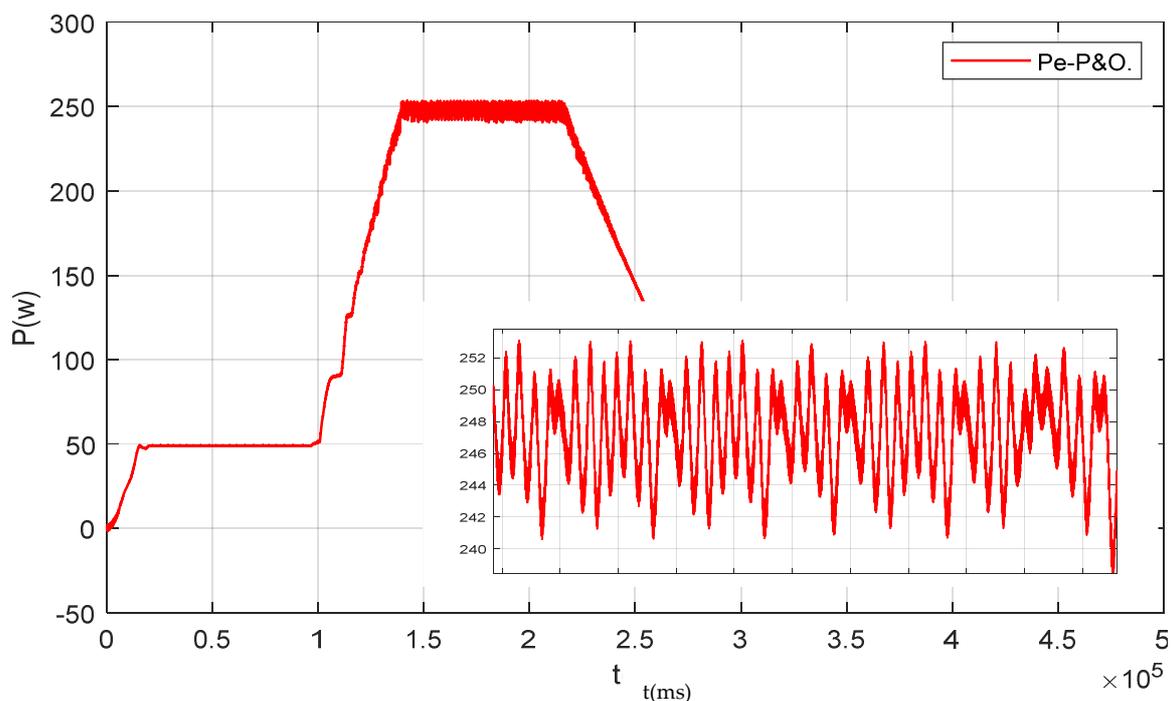


Figure II.19. Tension aux bornes du générateur photovoltaïque.

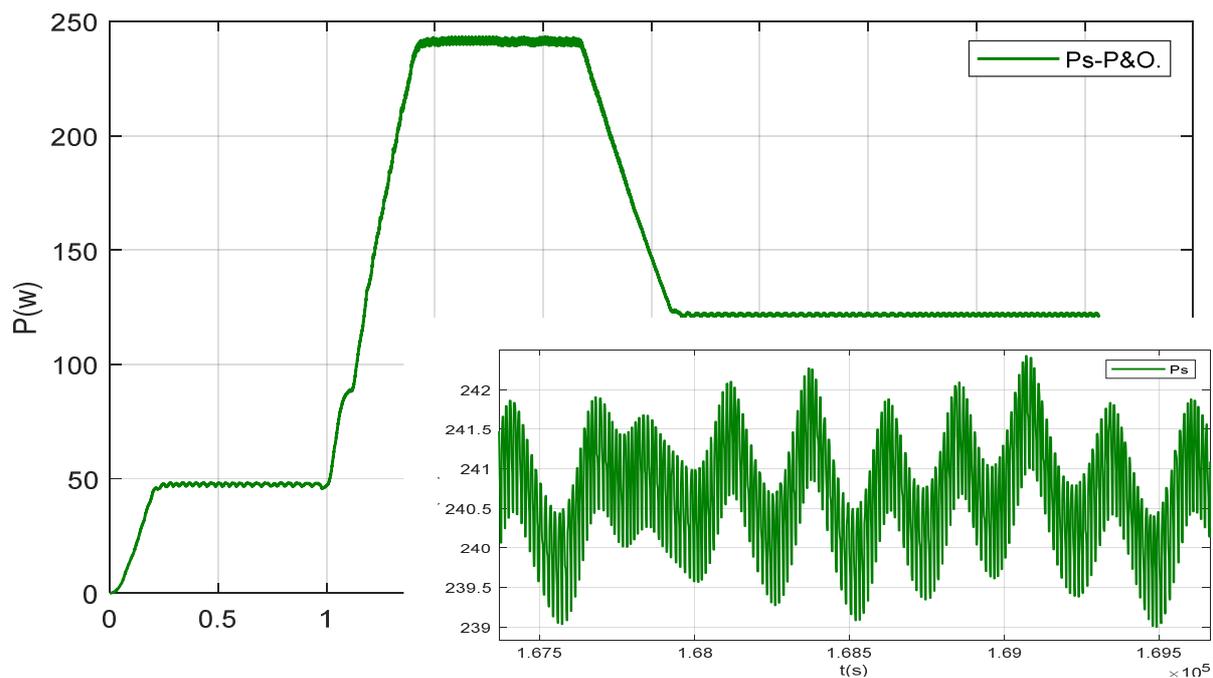


Figure II.20. Puissance de sortie du système.

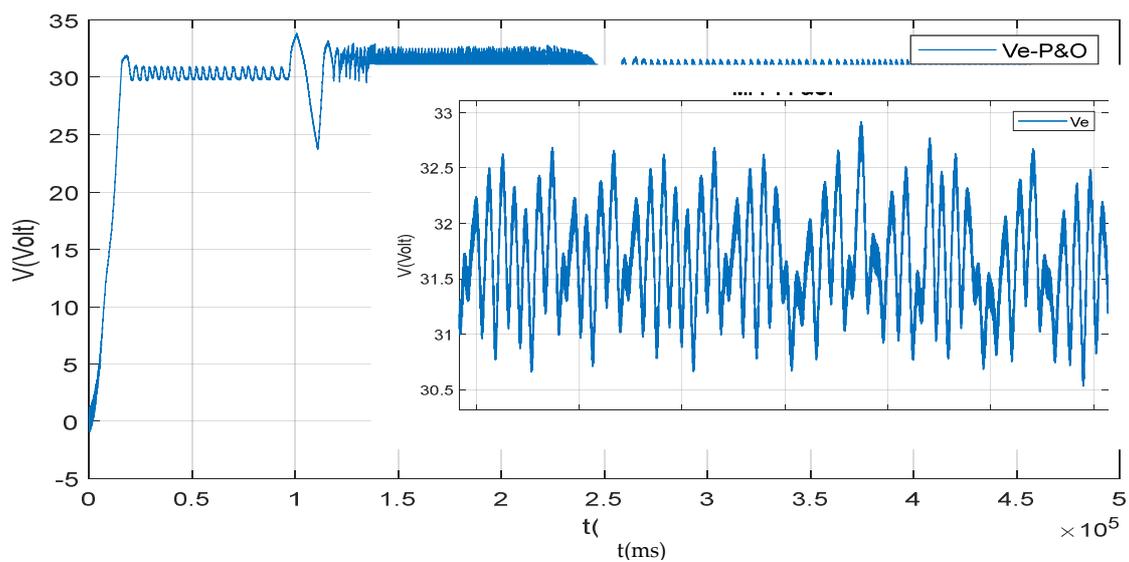


Figure II.21. Tension aux bornes du générateur photovoltaïque.

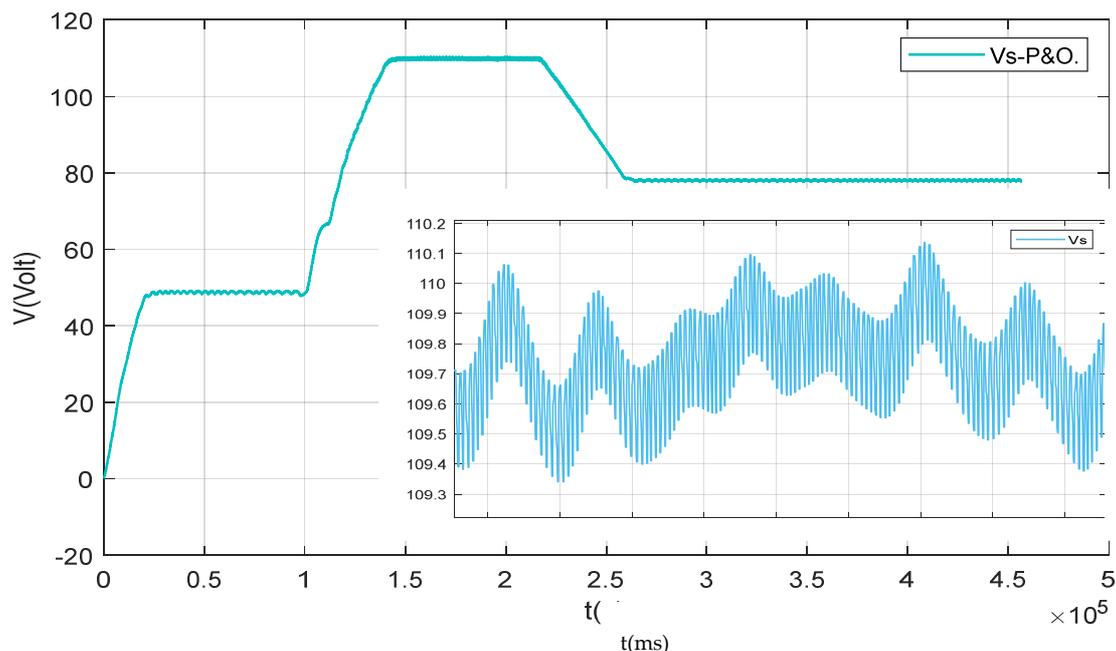


Figure II.22. Tension de sortie du système.

Analyse des résultats de PO :

À partir des résultats obtenus, on remarque que malgré que nous avons démarré la simulation avec des conditions initiales nulles, la commande PO a permis de retrouver le point de puissance maximale du panneau (la même valeur donnée par le constructeur).

Une caractéristique importante sur les oscillations de la courbe. Avec la présence de la commande PO, on remarque que : Pour un pas de 0.01 la courbe du rapport cyclique illustrée dans la Figure II.8 atteint jusqu'à 0.74 avec de grandes oscillations, ce qui conduit à des oscillations importantes de la puissance du PV (Figure II.9).

À partir des courbes présentées pour les différents cas de simulation, le hacheur survolteur fournit une tension de sortie V_s supérieure à celle du générateur photovoltaïque, car : $D \approx 0.7$, ce qui vérifie l'équation (I-20) du chapitre 2.

Dans le cas du fonctionnement avec l'irradiation variable, on note que le rapport cyclique varie avec l'éclairement dans le but de poursuivre le PPM.

II.1.3.2. Simulation avec la commande INC.

Cette méthode est basée sur l'évolution de la conductance et la variation de la conductance du générateur PV. Pour atteindre le PPM, il faut comparer à chaque fois la valeur de la conductance avec celle de l'incrément de conductance (dI/dV), si

l'incrément de conductance est supérieur à l'opposé de la conductance on diminue le rapport cyclique.

La Figure ci-dessous indique un masque de sous-bloc utilisé pour faciliter le paramétrage du rapport cyclique et de la fréquence de la commande.

Figure II.23. Masque de paramètre de la commande INC.

3. Simulation sous des conditions climatiques stable.

Pour une évaluation des performances du système photovoltaïque de la commande MPPT du type INC, nous avons simulé le fonctionnement d'un ensemble (GPV-BOOST-MPPT et une charge) sous des conditions atmosphériques fixes (un éclairement 1000W/m^2 et une température de 25°C)

Les résultats de simulation du fonctionnement du système photovoltaïque muni de la commande MPPT « Incremental conduction » sont représentés par les figures suivantes pour un pas de perturbation de 0.01 et 0.002.

Pas du rapport cyclique $\Delta D=0.01$

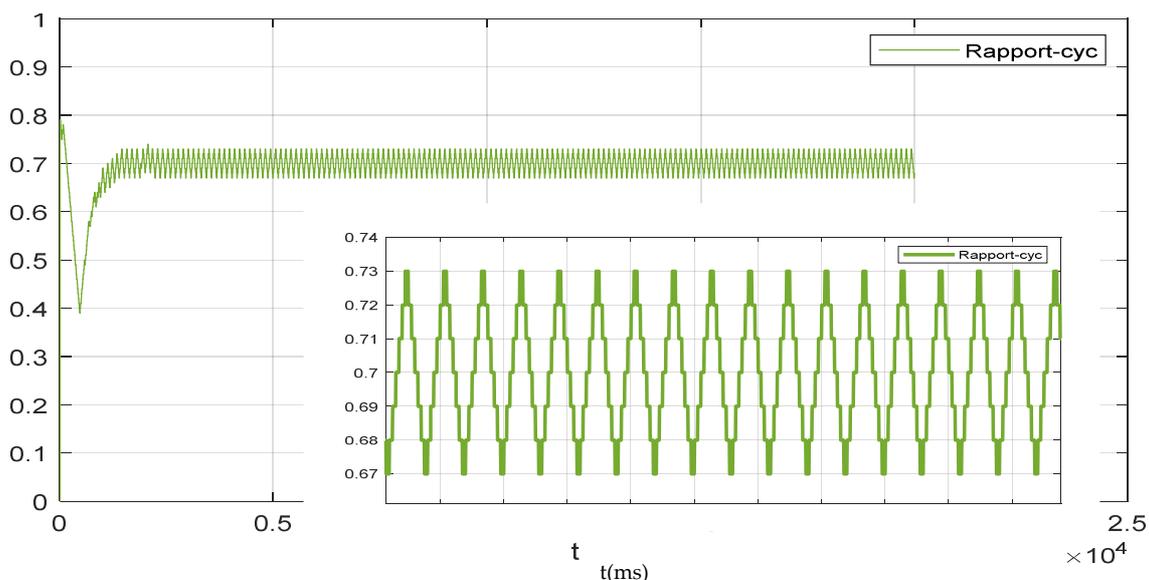


Figure II.24. Courbe du rapport cyclique pour un pas de 0.01.

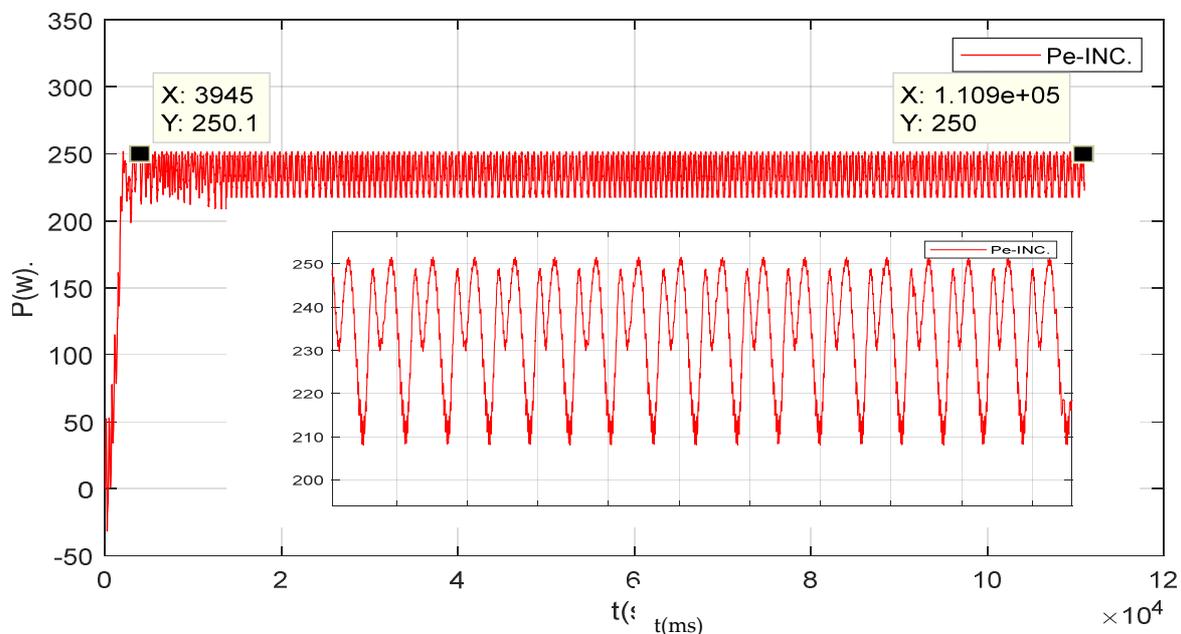


Figure II.25. Puissance aux bornes du générateur PV pour un pas de 0.01.

Pas du rapport cyclique $\Delta D=0.002$

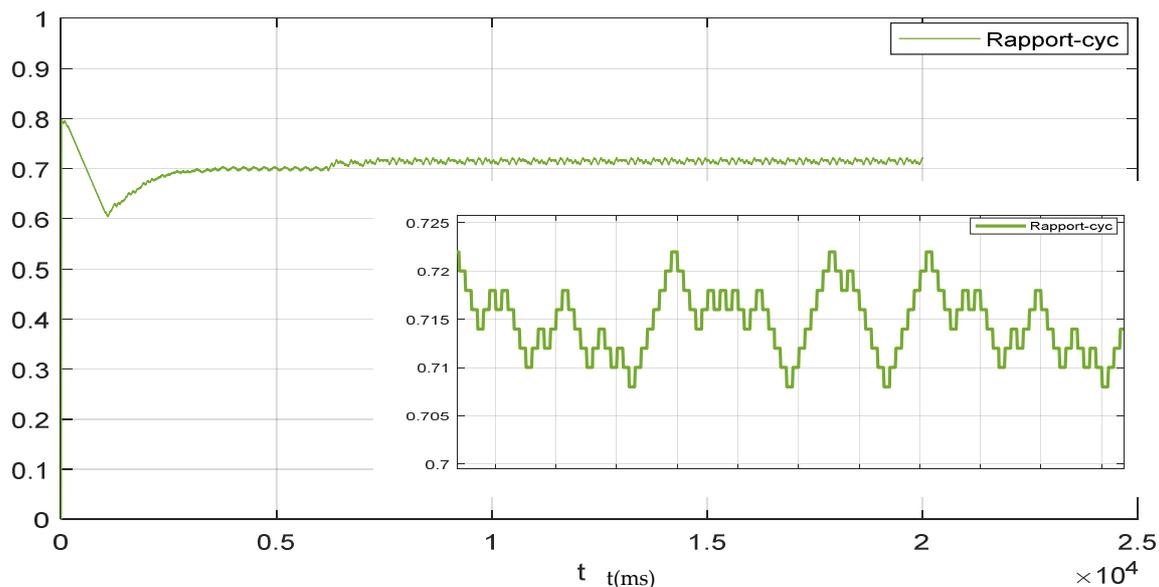
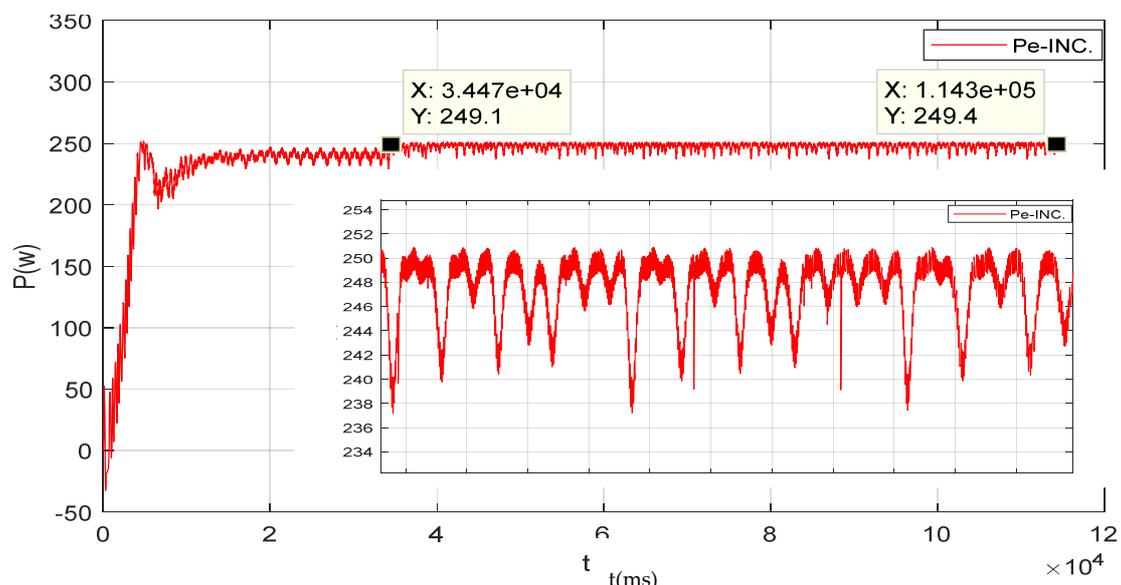


Figure II.26. Courbe du rapport cyclique pour un pas de 0.002.



4. Fonctionnement sous des conditions climatiques variables.

Nous avons testé le fonctionnement du système étudié sous une température fixe à 25°C et un éclairage variable (200W/m^2 , 1000W/m^2 , 500W/m^2) comme illustré dans la figure suivante.

La structure nous montre le fonctionnement de la puissance de GPV suivant le changement de l'éclairage, et les figures suivantes nous montrent les résultats.

Pour un pas de 0.002 on a alors :

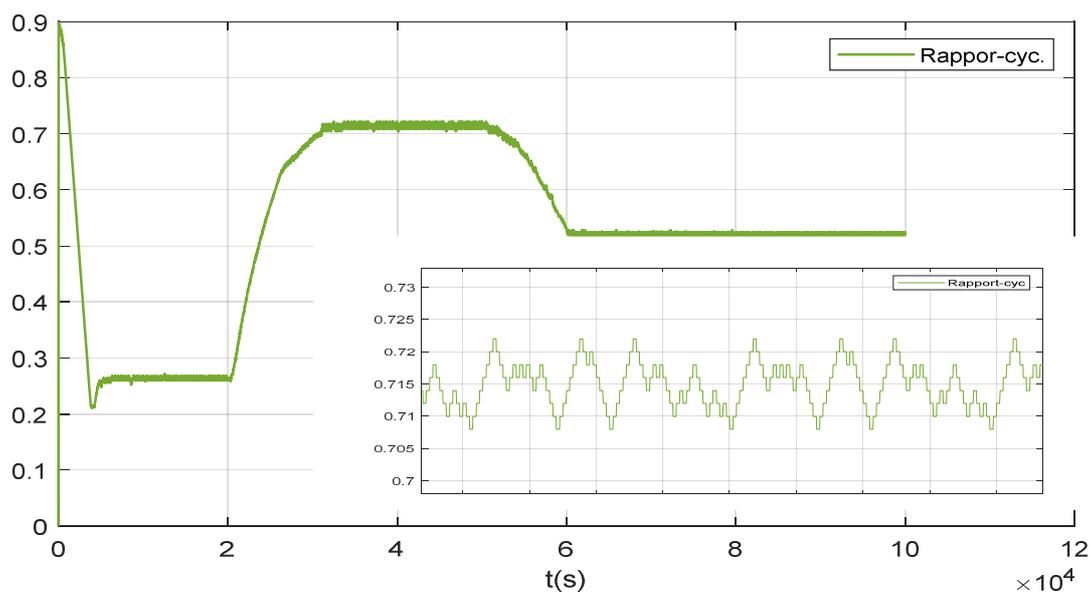


Figure II.27. Courbe du rapport cyclique pour un pas de 0.002.

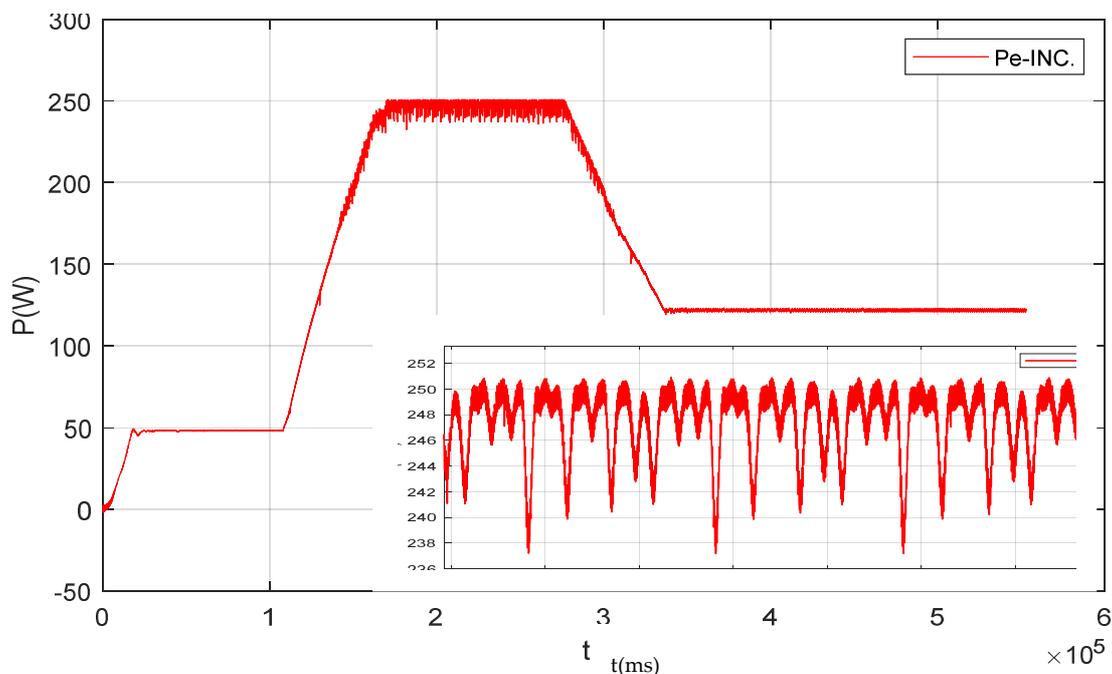


Figure II.28. Puissance aux bornes du générateur PV.

Analyse des résultats d'INC

Comme remarque générale par rapport à l'évolution de la tension et la puissance, malgré que nous avons démarré la simulation avec des conditions initiales nulles, la commande IC a permis de retrouver le point de fonctionnement optimal pour un éclairage et une température standards.

Les résultats de simulation montrent que la commande utilisée répond correctement aux caractéristiques du panneau qui atteint la valeur maximale de la

puissance générée avec un temps relativement rapide. Bien qu'un inconvénient se présente durant le régime permanent qui figure des ondulations d'amplitude.

On remarque à partir des paramètres de la commande, de la Figure II.7 et Figure II.23, que pour atteindre la valeur maximale, on a utilisé presque les mêmes paramètres de la commande PO, on note aussi avec la diminution du pas du rapport cyclique, les oscillations autour du point de puissance maximale diminuent ce qui rend le système plus stable.

Pour le fonctionnement dans des conditions d'éclairement variables, on note que la commande INC répond correctement pour les conditions de fonctionnement du système comme il est vérifié pour la commande PO tel que avec l'augmentation de l'éclairement le rapport cyclique diminue bien que la tension de GPV augment suit à celle de la puissance, ce qui vérifie l'équation II.17 de chapitre 2.

Comparaison entre les deux méthodes :

Tableau II.2. Comparaison entre les commandes pour un pas de 0.01.

	INC	PO
Rapport Cyclique	0.74	0.74
P-GPV	250	250
Ps	234.32	237
V-GPV	34	34
Vs	108	109
Temps attient PPM	0.39	0.4
Temps d'arrêt	11.09	10.37
Amplitude d'oscillation	41	35

Tableau II.3. Comparaison entre les commandes pour un pas de 0.002.

	INC	PO
Rapport Cyclique	0.723	0.728
P-GPV	250	250

Temps attient PPM	3.44	0.83
Temps d'arrêt	11.43	10.5
Amplitude d'oscillation	15	7

Les résultats des tableaux montrent l'efficacité de la commande dans la poursuite du point de puissance maximale. Parlant de la stabilité du système, on note que si le pas du rapport cyclique est grand l'algorithme MPPT répondra rapidement au changement des conditions de fonctionnement du système, mais les pertes seront accrues dans la stabilité.

Nous constatons aussi que la technique INC présente des oscillations autour de PPM avec une amplitude plus grande que celle de la Méthode PO, car il est difficile de remplir la condition $dp/dv=0$.

II.1.3.3. Simulation avec la logique floue.

Précédemment nous avons optimisé les deux commandes PO et INC, le critère a donné des réponses satisfaisantes avec beaucoup de similarités en régime permanent, néanmoins pour certaines réponses le régime transitoire été moins performant.

Pour cela nous avons testé la commande par la logique floue qui représente la commande la plus populaire depuis l'évolution des microcontrôleurs et des capacités de calcul. La commande est déterminée sur la base de la satisfaction de deux critères de variable d'entrée à savoir l'erreur « E » et la variation de l'erreur « CE ».

La technique à commande numérique de MPPT floue a été simulée en utilisant un convertisseur DC-DC sous un environnement MATLAB/SIMULINK, la figure suivante montre le schéma équivalent :

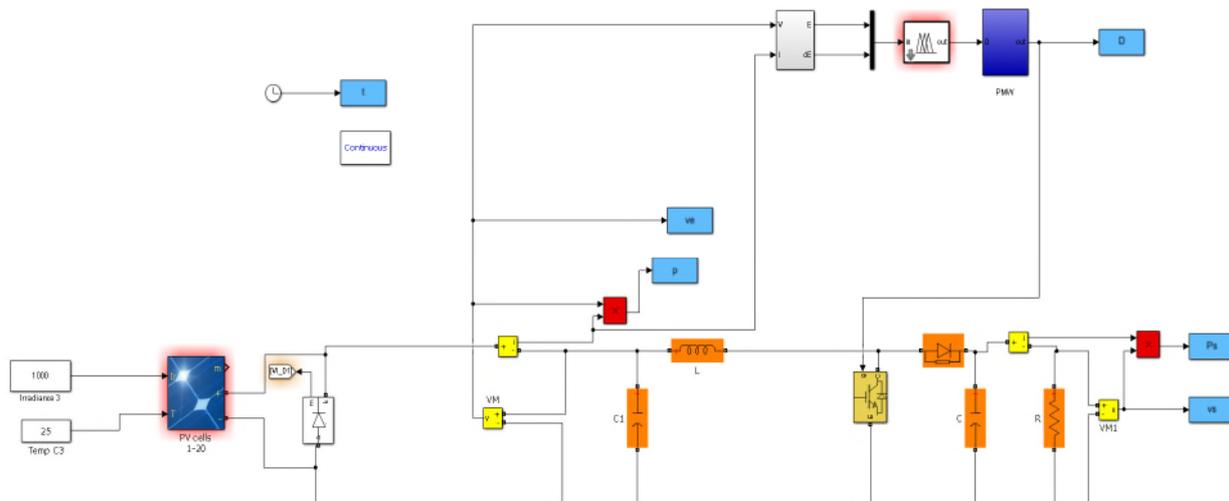


Figure II.29. Schéma MATLAB SIMULLINK d'un SPV avec la commande floue

La mise en place d'un contrôleur flou se réalise en trois étapes qui sont : la Fuzzification, l'inférence et la Défuzzification. Comme nous l'avons mentionné dans le chapitre II, pour le bon fonctionnement du contrôleur, il faut bien choisir ces paramètres qui sont les fonctions d'appartenance et règles d'inférences.

A. Fonctions d'appartenances.

Pour chaque variable, on définit cinq (5) fonctions qui sont représentées par des fonctions de triangulaires et trapézoïdales aux extrémités des univers de [19].

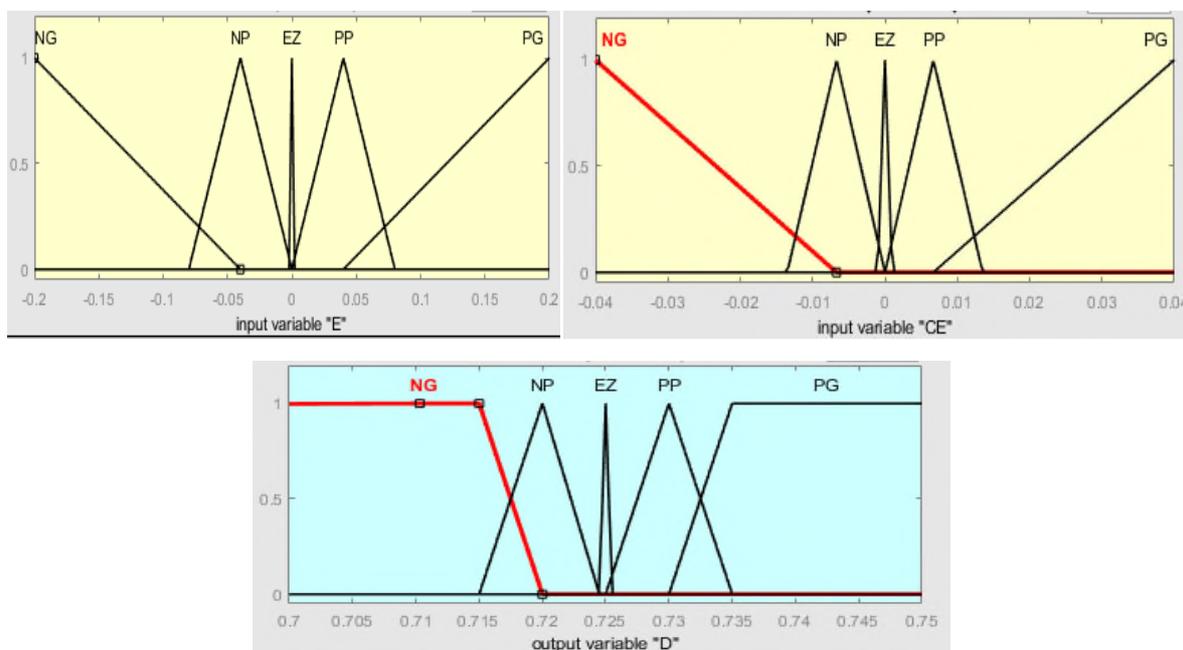


Figure II.30. Fonction d'appartenance de la logique floue.

B. Règles floues.

Le tableau suivant donne l'ensemble des règles qui permettant de déterminer le signal de sortie d'un régulateur MPPT a l'aide des deux signaux d'entrées (E et CE).

Tableau 4. Règle d'inférence de la commande par logique floue

E			CE		
	NG	NP	EZ	PP	PG
NG	PG	NG	NG	NP	NP
NP	PG	NG	NG	NP	NP
EZ	NP	NP	NP	PG	PG
PP	NP	PG	PP	NG	PG
PG	NG	NG	PG	PP	PG

Simulation sous des conditions climatiques stables.

Pour une évaluation des performances du système photovoltaïque avec la commande de la logique floue nous avons simulé le fonctionnement d'un ensemble (GPV-BOOST-MPPT et une charge) sous des conditions atmosphériques fixes (un éclairement $1000W/m^2$ et une température de $25^{\circ}C$)

Les résultats de simulation du fonctionnement du système photovoltaïque muni de la commande MPPT «logique flou» sont représentés par les figures suivantes :

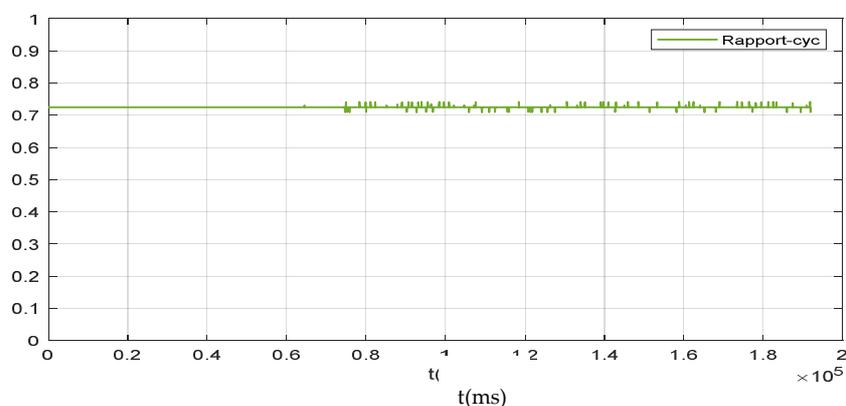


Figure II.31. Courbe du rapport cyclique.

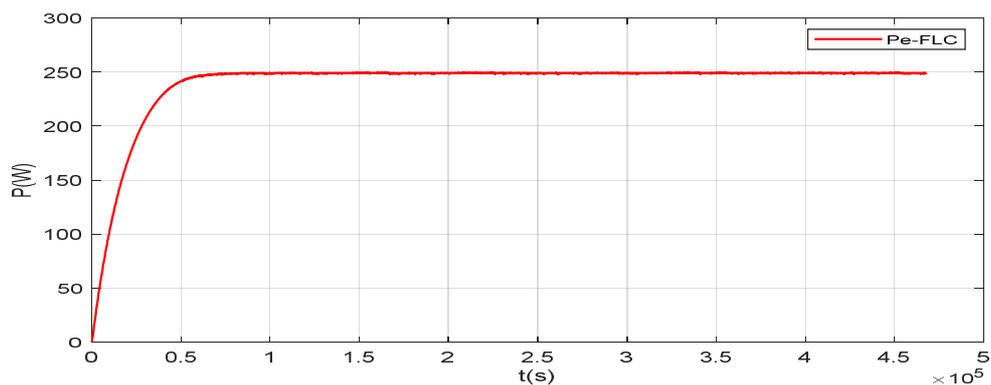


Figure II.32. Puissance de sortie avec la logique floue.

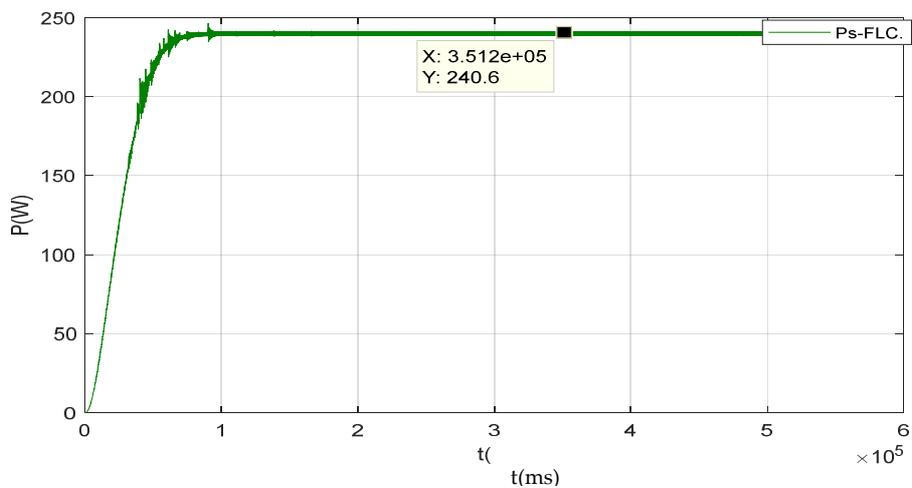


Figure II.33. Puissance d'entrée avec la logique floue

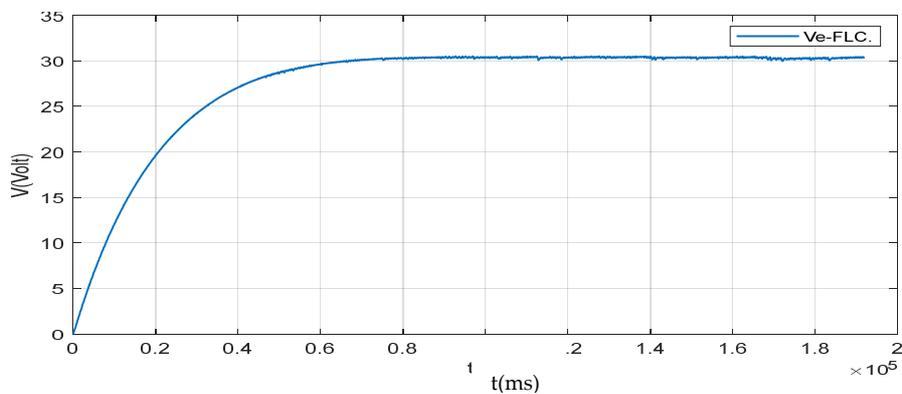


Figure II.34. Tension de sortie avec la logique floue.

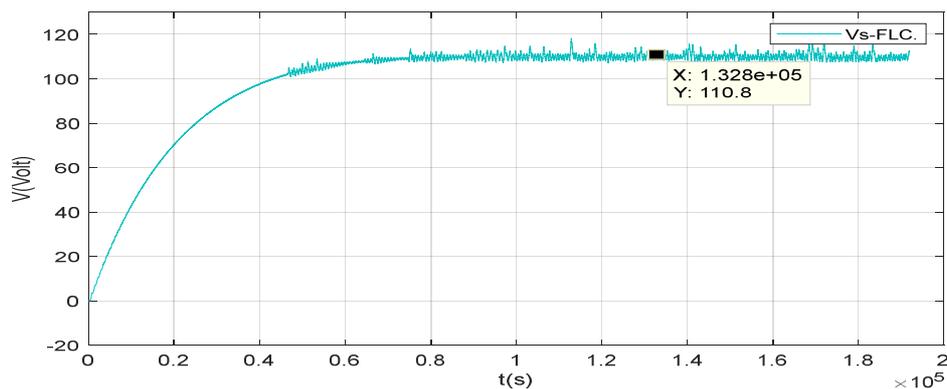


Figure II.35. Tension d'entrée avec la logique floue.

5. *Fonctionnement sous des conditions climatiques variables.*

Nous avons testé le fonctionnement du système étudié sous une température fixe à 25°C et un éclairement variable ($200\text{W}\backslash\text{m}^2$, $1000\text{W}\backslash\text{m}^2$, $500\text{W}\backslash\text{m}^2$) comme illustré dans la figure suivante.

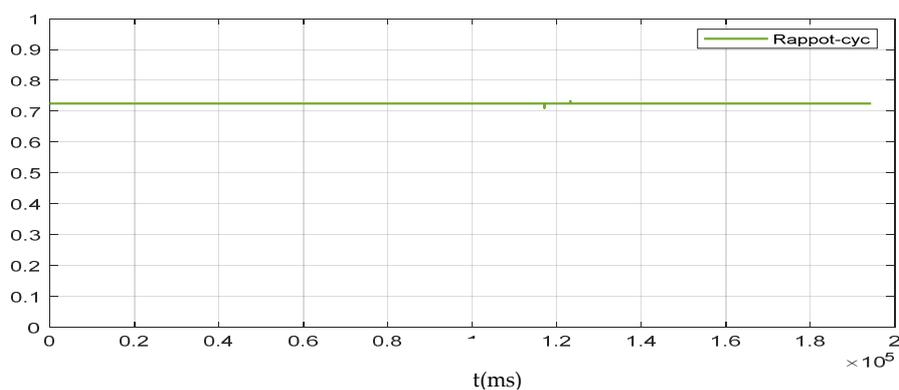


Figure II.36. Courbe du rapport cyclique pour un ensoleillement variable.

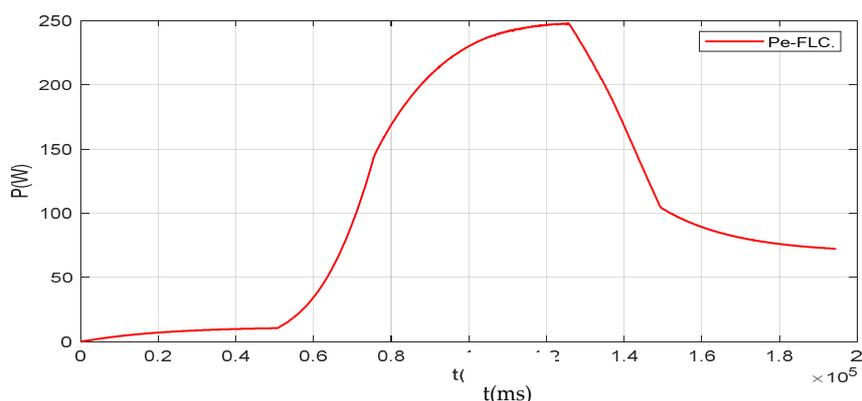


Figure II.37 Puissance de sorti avec la logique floue.

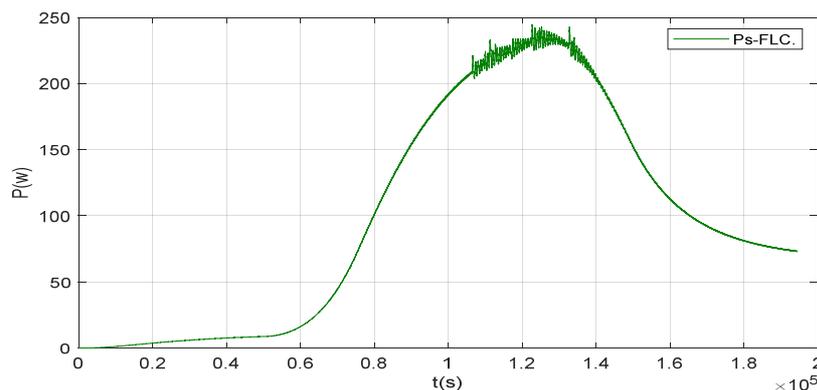


Figure II.38 Puissance d'entrée avec la logique floue.

Analyse des résultats de la commande floue :

Les résultats obtenus, Figure III.32 et Figure III.33, montrent que le contrôle à base de la logique floue répond correctement aux caractéristiques du panneau. La puissance électrique générée par le panneau solaire est toujours maintenue à sa puissance maximale, quelles que soient les conditions atmosphériques.

Le contrôle par la logique floue est un pas vers une approche mathématique précise basée sur la prise de décision, ou l'expertise, humaine. L'algorithme basé sur la logique floue est une technique robuste et efficace qui fonctionne, dans le cas du MPPT, au point optimal. Cependant, l'implémentation de ce type de commande est plus complexe que les algorithmes classiques. La difficulté principale consiste à bien choisir les paramètres de la commande floue (le choix des fonctions d'appartenance et des règles d'inférence). C'est pour cela qu'on va opter à l'optimisation de ce contrôleur, dans le cas de l'ombrage partiel, avec une approche évolutionnaire.

II.2. Panneau photovoltaïque avec ombrage partiel

II.2.1. Choix du panneau et des conditions atmosphériques

Dans le cas de l'ombrage partiel, nous avons utilisé un autre modèle du panneau PV. Ses caractéristiques sont présentées dans la Figure III. 41, dans des conditions d'éclairement variable comme indiqué dans la figure III. 42.

La première courbe de la Figure III.41 présente les caractéristiques Courant-Tension du panneau PV. Le premier panneau étant soumis à un éclairement de $G = 1000 \text{ W/m}^2$, le deuxième panneau soumis à un éclairement de $G=300 \text{ W/m}^2$ et le dernier est soumis à un éclairement de 600 W/m^2 . La température est fixée à $T = 25^\circ \text{C}$.

La deuxième courbe présente les caractéristiques Puissance-Tension du PV sous les mêmes conditions décrites en haut.

Les conditions atmosphériques choisies rendent le problème de la commande MPPT multimodal. Si l'on analyse les caractéristiques P-V, données en Figure III. 41, on remarque qu'il existe deux maximum locaux et un seul maximum global. Le problème de la commande MPPT devient alors plus complexe.

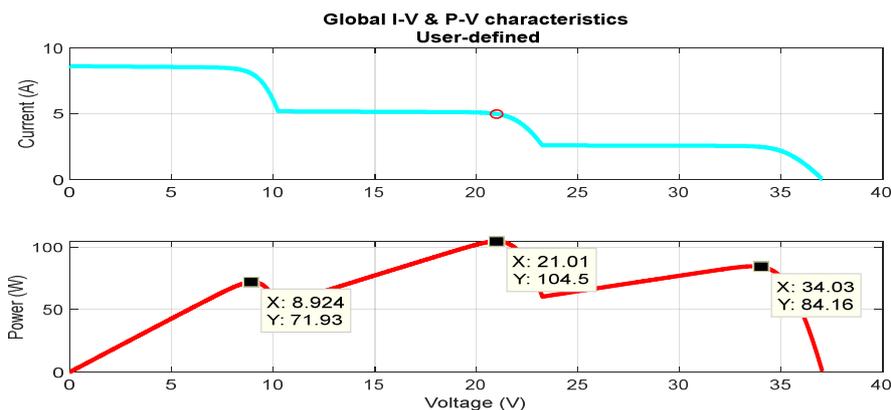


Figure II.39. Courbe des caractéristiques du I-V et P-V du panneau avec l'ombrage partiel.

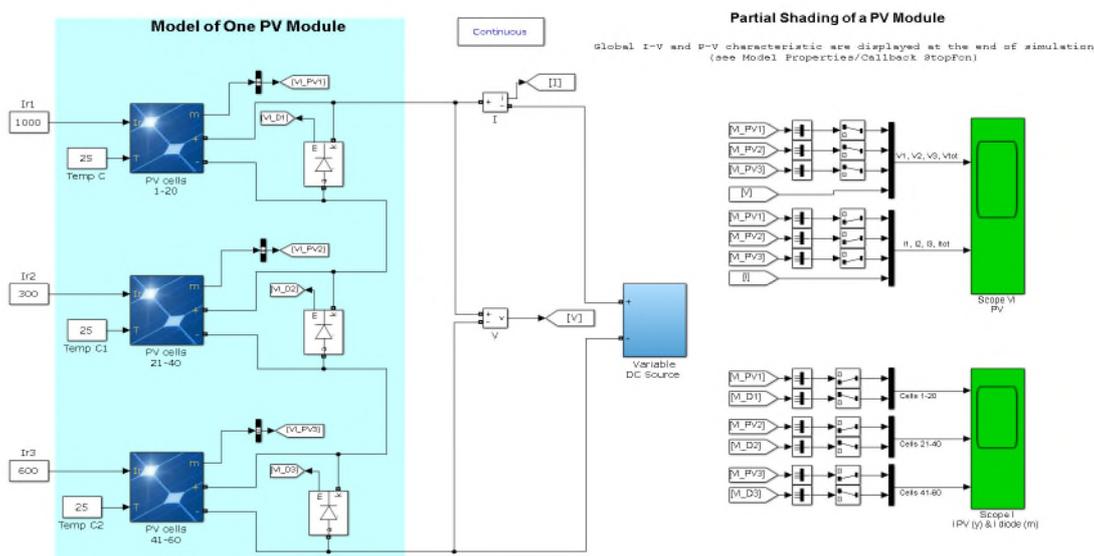


Figure II.40. Schéma de simulation d'un panneau PV avec l'ombrage partiel.

II.2.2. Ombrage partiel du GPV avec la commande MPPT.

On donne dans la Figure III. 43 le schéma SIMULINK du groupe de panneaux décrits en haut. Les trois panneaux sont connectés en parallèle utilisant des diodes qui jouent le rôle de la protection.

Pour étudier les performances des méthodes MPPT utilisées dans ce mémoire, à savoir PO, INC et logique floue, et pour connaître l'influence de l'ombrage partiel, on a effectué plusieurs simulations pour ces différentes techniques.

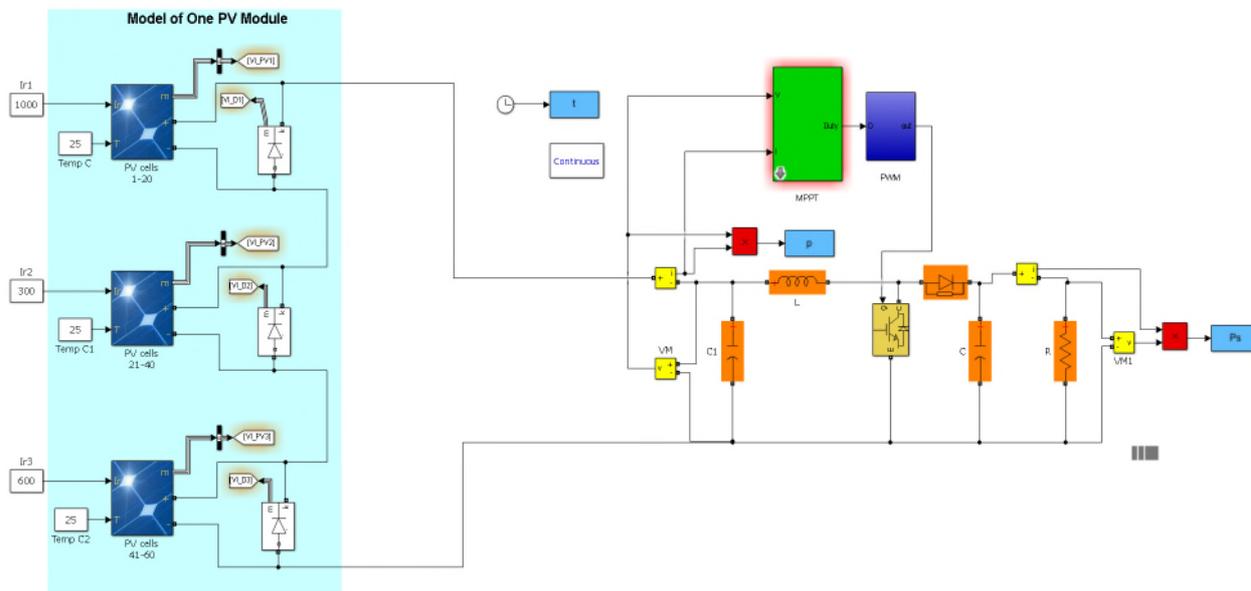


Figure II.41. Schéma SIMULINK du système étudié.

II.2.3. Commande PO sous l'ombrage partiel

Pour tester les performances de l'algorithme PO, nous avons simulé l'ensemble du modèle du panneau solaire pour des conditions d'éclaircements variables. Par l'utilisation des mêmes paramètres du cas des conditions standards, on retrouve les résultats de la figure suivante.

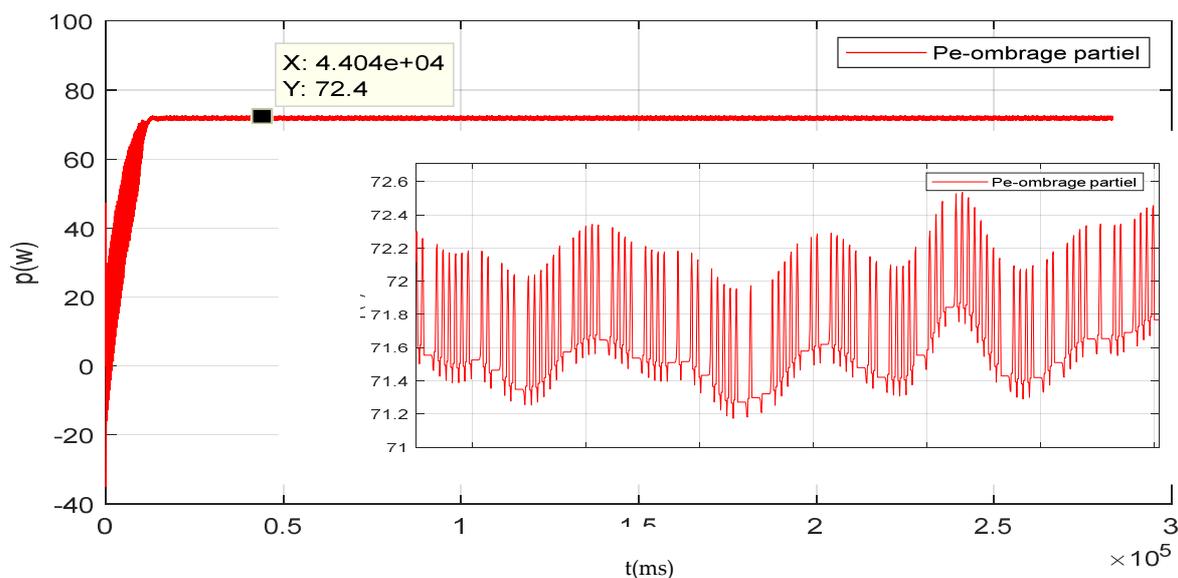


Figure II.42. Courbe de la puissance d'entrée et de sortie avec l'ombrage partiel.

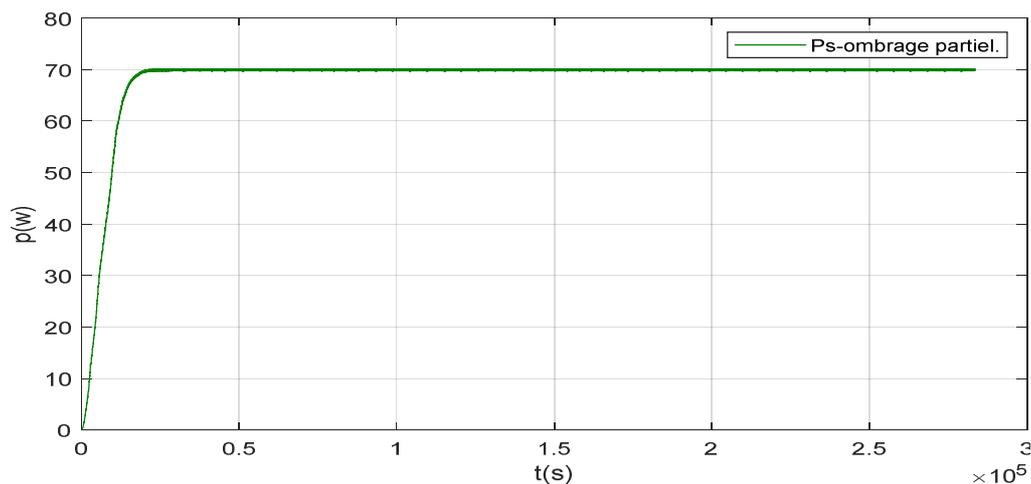


Figure II.43. Courbe de tension du panneau et de sortie avec l'ombrage partiel.

Analyse de la méthode PO :

A partir des résultats de la courbe de la Figure III. 44, on remarque que la puissance aux bornes du panneau reste bloquée sur un maximum (72.4 Watt). La puissance de sortie qui suit la puissance d'entrée explique le bon fonctionnement de la commande. Mais la recherche s'effectue autour d'un maximum local. On constate alors que l'algorithme PO ne converge pas vers le PPM.

II.2.4. Ombrage partiel avec la commande INC

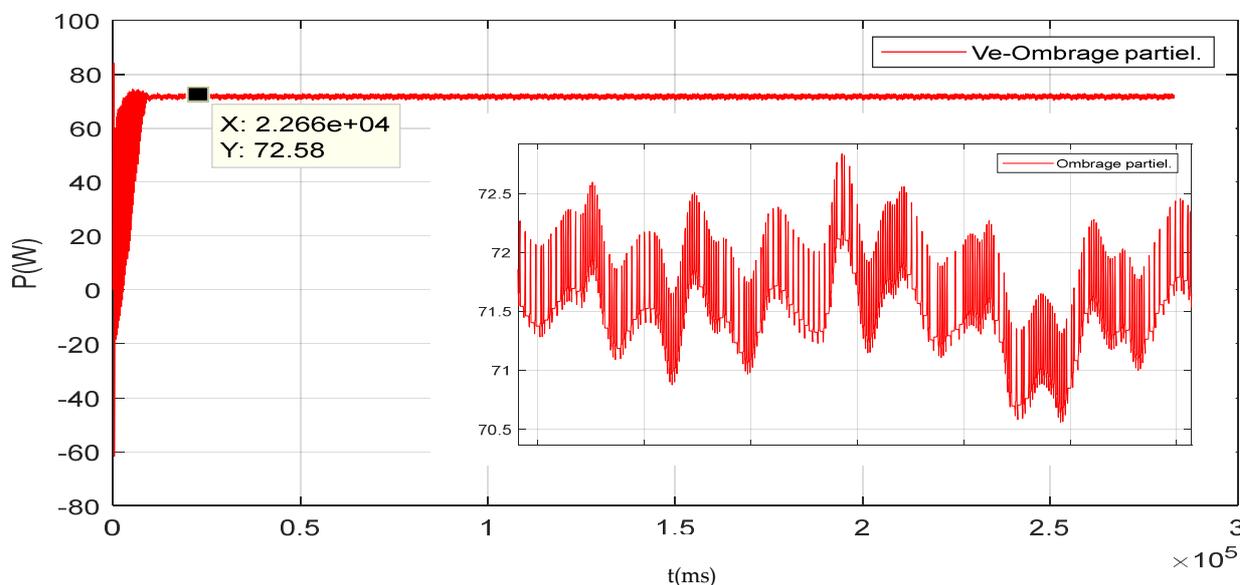


Figure II.44. Courbe de la puissance aux bornes du générateur avec l'ombrage partiel

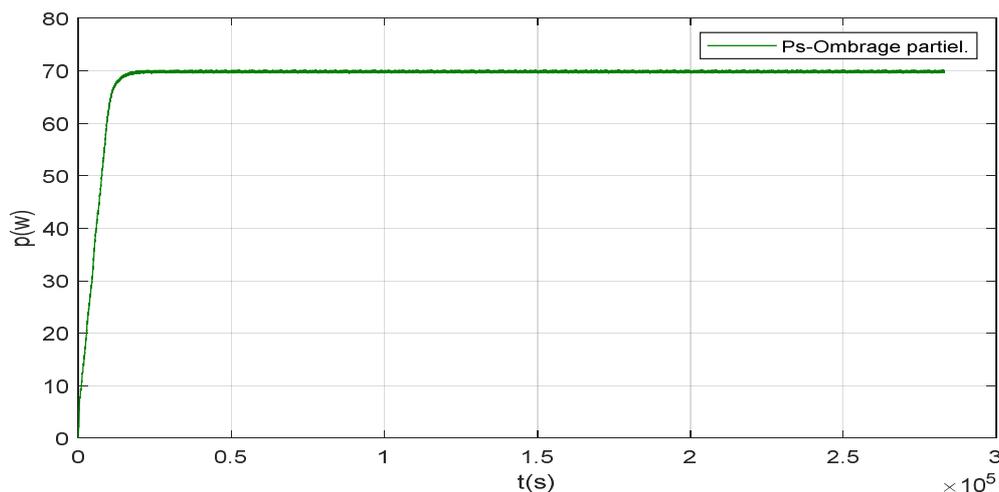


Figure II.45. Courbe de la puissance de sortie avec Ombrage partiel.

Analyse de l'algorithme INC :

On rappelle pour le lecteur que les paramètres utilisés sont les mêmes que dans le cas précédent. La figure III. 47 représente la puissance du panneau avec la technique INC. A partir des résultats de la courbe, on remarque que la méthode utilisée donne une puissance insuffisante. La puissance obtenue n'atteint pas le point PPM (72.58 Watt). Si l'on compare ce résultat avec la technique PO, on remarque que les deux commandes donnent presque les mêmes résultats.

II.2.5. Commande floue en ombrage partiel

Le réglage utilisé par le contrôleur flou est le même que celui utilisé dans le cas des conditions atmosphériques standards. Autrement dit, on a utilisé la même fonction d'appartenance et les mêmes règles d'inférences. Les résultats obtenus suite à l'application de la logique floue, dans le cas de l'ombrage partiel, sont présentés dans la Figure III.48.

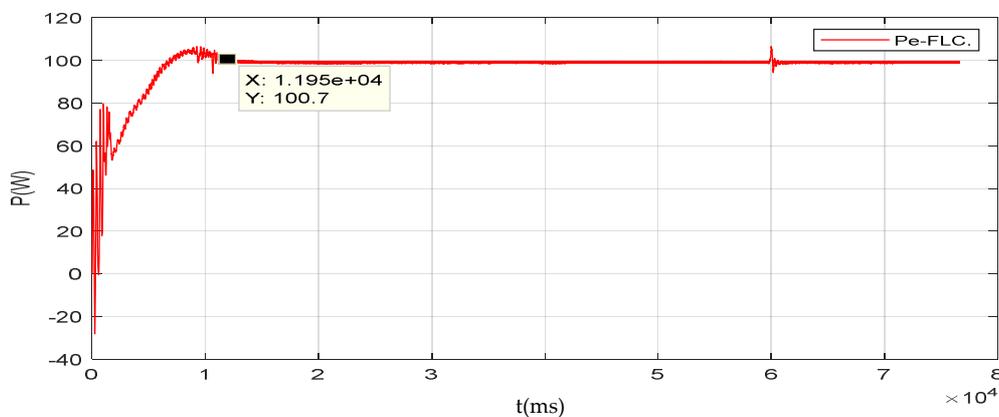


Figure II.46 La puissance d'entrée avec l'ombrage partiel

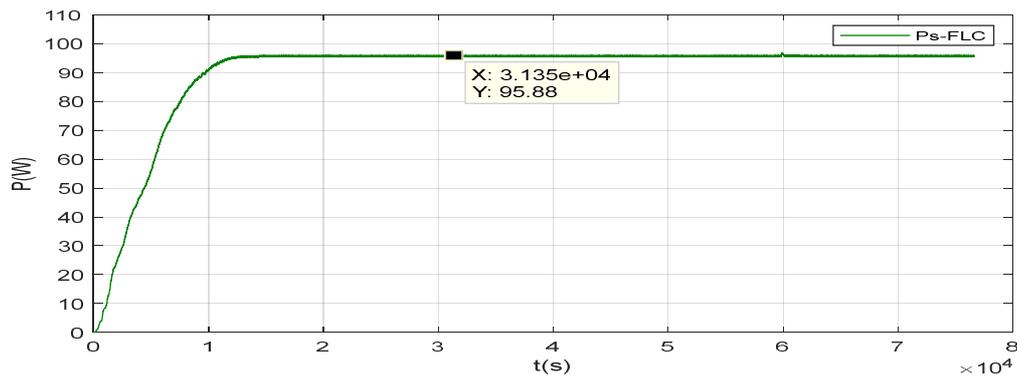


Figure II.47 la puissance de sortie avec l'ombrage partiel.

Analyse des résultats de la commande par logique floue

D'après la Figure III. 48, on peut remarquer que la puissance délivrée par le panneau PV est de 100.7 Watts. Si l'on compare ce résultat avec les deux méthodes PO et INC, on déduit que la commande floue est plus performante que les deux autres. Cependant cette technique ne converge pas vers le PPM. Elle reste bloquée autour d'un minimum local. On remarque aussi que les oscillations de la puissance sont moindres par rapport aux deux autres méthodes étudiées dans ce mémoire. Néanmoins, l'utilisation d'un contrôleur flou nécessite un agent expert qui sait trouver les bonnes fonctions d'appartenance et les meilleures règles d'inférence pour un fonctionnement optimal du contrôleur. Ceci est l'un des inconvénients majeurs de la commande par logique floue. C'est pour cela que nous avons opté à utiliser d'autres approches de l'intelligence artificielle computationnelle afin d'optimiser le contrôleur flou.

Dans les dernières décades, les algorithmes bio-inspirés ont été souvent utilisés par les scientifiques pour développer des approches de recherche et d'optimisation pseudo-aléatoire destinées à la résolution des problèmes d'ingénierie difficiles. Dans cette étude, nous avons choisi le PSO pour retrouver et optimiser le bon contrôleur flou qui peut extraire le maximum d'énergie (puissance) du panneau photovoltaïque.

II.2.6. Optimisation du contrôleur floue par le PSO

Les difficultés rencontrées dans la conception des contrôleurs flous nous a guidé à nous orienter vers leur optimisation. Nous allons essayer dans la suite de ce travail de trouver les fonctions d'appartenances optimales en utilisant la méthode dite *partical swarm optimization* (PSO).

II.2.7. Application à l'optimisation du contrôleur flou

Dans cette section, nous allons présenter l'application du PSO à l'optimisation du contrôleur flou destiné à la commande MPPT. En principe, le contrôleur garde les mêmes règles d'inférence présentées à la section III.1.3.3. L'objectif est donc de retrouver les bonnes fonctions d'appartenance pour la maximisation de la puissance produite par le panneau PV.

II.2.7.1. Paramètres à optimiser

L'un des inconvénients majeurs de l'utilisation de la méthode PSO est son coût de calcul très élevé. En effet, un grand ordinateur est nécessaire pour partir d'une population initiale, générée aléatoirement dans l'espace de recherche, et arriver à la solution optimale. Dans notre cas, la convergence de l'algorithme nécessite un temps de calcul très élevé voilà pourquoi nous avons opté à l'utilisation des fonctions d'appartenance décrites dans la section III.1.3.3 lors de la génération de la population initiale. Nous rappelons le lecteur que ces fonctions d'appartenance ont été retrouvées manuellement après plusieurs tests. Le PSO va donc utiliser ces fonctions pour générer la population initiale pour converger plus rapidement. La population initiale est générée par la perturbation des fonctions trouvées manuellement.

Les fonctions d'appartenance des entrées du contrôleur flou seront notées par E et celles de la sortie par S . Nous allons donc utiliser l'écriture kE_j ou kS_i . On note que l'indice k donne l'indice (le numéro) de l'entrée ou de la sortie. Dans notre cas, il peut avoir les valeurs de 1 et 2 pour les entrées (car il y a deux entrées E et CE) et pour la sortie, il ne peut avoir que la valeur 1 (une seule sortie qui est D). L'indice j désigne la fonction d'appartenance de chaque variable floue. Pour les entrées, $j \in \{1,2,3,4,5\}$, car on compte cinq fonctions d'appartenance pour chaque entrée. Pour la sortie $j \in \{1,2,3,4,5\}$, car on dénombre aussi cinq fonctions d'appartenance pour la sortie. L'indice i désigne les trois points qui définissent la fonction triangulaire (i donc fait partie de l'ensemble $\{1,2,3\}$) tel qu'il illustré à la figure suivante.

L'objectif de l'utilisation du PSO est de retrouver les positions des points qui définissent les fonctions d'appartenance triangulaires. Autrement dit, c'est de retrouver les points kE_j avec $k \in \{1,2\}$, $i \in \{1,2,3\}$ et $j \in \{1,2,3,4,5\}$ ainsi que les points kS_i avec $k \in \{1\}$, $i \in \{1,2,3\}$ et $j \in \{1,2,3,4,5\}$. Nous avons donc 45 points à optimiser par le PSO, ces points définissent les fonctions d'appartenance triangulaires (la dimension du problème est $D=45$).

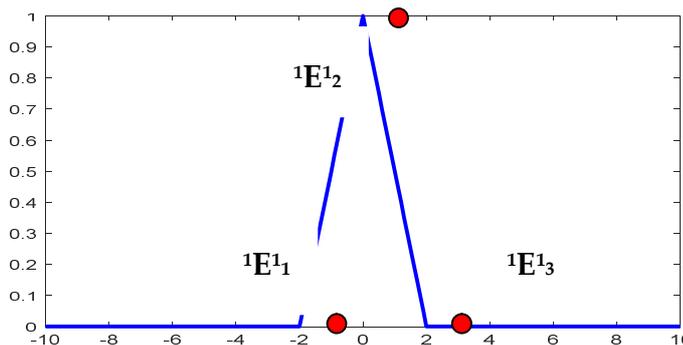


Figure II.48. Exemple des positions de la fonction d'appartenance.

La fonction fitness est la puissance délivrée par PV. Les paramètres du PSO sont tirés de la littérature originale et sont : $c_1=c_2=2.05, N=D, w_{max}=1, w_{min}=0.1$

$$w = w_{max} - (w_{max} - w_{min}) * \frac{k}{Max_{iteration}}$$

II.2.7.2. Résultats et discussion

Les positions des points qui définissent chaque fonction d'appartenance sont données au **Tableau III.5**. La courbe de la puissance obtenue est donnée aux **Figure II.49** et **Figure II.50**

D'après les résultats obtenus, on remarque que l'optimisation du contrôleur flou par le PSO aboutit à la convergence de l'algorithme au PPM. L'algorithme PSO a donc réussi à retrouver de meilleures fonctions d'appartenance que celles retrouvées manuellement. L'objectif est alors atteint.

Tableau III.5 Valeurs des points obtenus par le PSO

${}^1E^1_1$	-1.335	${}^1E^4_1$	0	${}^2E^2_1$	-0.001687	${}^2E^5_1$	0.0007461	${}^1S^3_1$	0.7251
${}^1E^1_2$	-0.8939	${}^1E^4_2$	0.18	${}^2E^2_2$	- 0.0008375	${}^2E^5_2$	0.005117	${}^1S^3_2$	0.7254
${}^1E^1_3$	-0.1977	${}^1E^4_3$	0.36	${}^2E^2_3$	0	${}^2E^5_3$	0.006815	${}^1S^3_3$	0.7347
${}^1E^2_1$	-0.36	${}^1E^5_1$	0.1882	${}^2E^3_1$	2.105e-05	${}^1S^1_1$	-3.645	${}^1S^4_1$	0.7198
${}^1E^2_2$	-0.18	${}^1E^5_2$	0.9212	${}^2E^3_2$	8.67e-05	${}^1S^1_2$	0.7041	${}^1S^4_2$	0.7394
${}^1E^2_3$	0	${}^1E^5_3$	1.295	${}^2E^3_3$	0.0001286	${}^1S^1_3$	0.7204	${}^1S^4_3$	0.7394

${}^1E^3_1$	-0.02431	${}^2E^1_1$	-0.007729	${}^2E^4_1$	0	${}^1S^2_1$	0.712	${}^1S^5_1$	0.7198
${}^1E^3_2$	0.02371	${}^2E^1_2$	-0.005268	${}^2E^4_2$	0.000838	${}^1S^2_2$	0.7154	${}^1S^5_2$	0.7492
${}^1E^3_3$	0.02537	${}^2E^1_3$	- 0.0009795	${}^2E^4_3$	0.00169	${}^1S^2_3$	0.7331	${}^1S^5_3$	0.7562

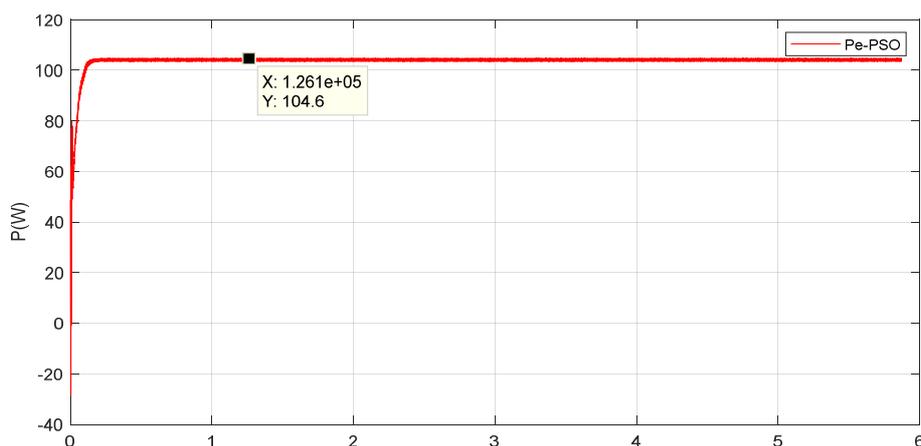


Figure II.49. Puissance d'entrée avec effet ombrage partiel

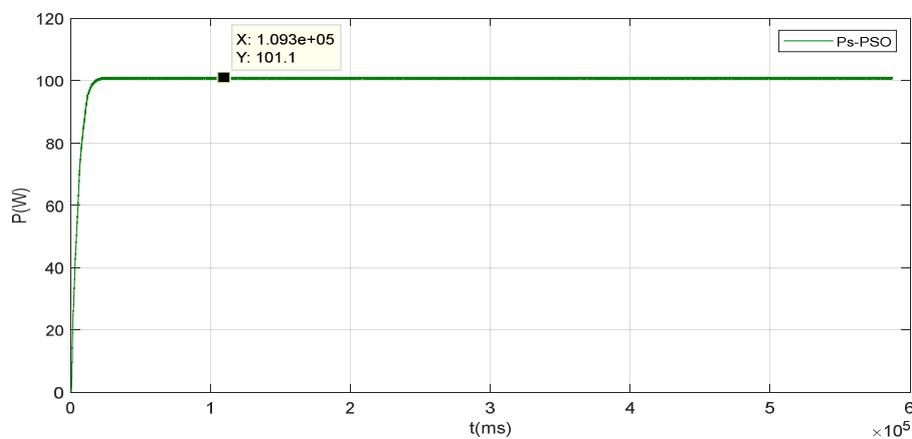


Figure II.50. Puissance de sortie avec effet ombrage partiel

Comparaison entre les quatre méthodes :

méthode	Valeur de PPM	Amplitude d'oscillation
PO	72.4	1.8
INC	72.58	2.8
Méthode de FL	100.7	0
Méthode de FL optimisé	104.6	0

Conclusion

Ce chapitre présente les résultats obtenus par trois méthodes de commande de MPPT appliqué à un générateur PV. Le travail a été réalisé sous l'environnement MATLAB/SIMULINK. Nous dénombrons deux cas de figure : conditions atmosphériques idéales (25° et 1000 w/m^2) et l'ombrage partiel. Nous avons effectué une étude comparative entre trois méthodes MPPT, la première est la méthode P&O, la deuxième est la méthode INC et la troisième est la commande floue. Dans le cas des conditions atmosphériques standards, les trois méthodes donnent d'assez bons résultats. Cependant, à partir des résultats obtenus, en ombrage partiel, la commande par logique floue présente des résultats très compétitifs par rapport aux deux autres méthodes, mais n'aboutit pas à l'extraction maximale de la puissance. Nous avons alors opté à l'optimisation de ce dernier par le PSO qui a servi à retrouver les bonnes fonctions d'appartenances pour les variables floues. Les résultats alors obtenus par l'utilisation du PSO et de la logique floue sont beaucoup plus prometteurs et donnent un rendement meilleur avec convergence au PPM.

Conclusion Générale

Conclusions

Ce travail est un mémoire de Master 2 en automatique réalisé à l'université A. Mira de Bejaïa sur la commande MPPT des panneaux PV. Il peut être vu comme une étude comparative entre trois méthodes MPPT qui sont P&O, INC et la commande par logique floue. L'objectif principal consiste à mettre en évidence la méthode qui aboutit à l'extraction de la puissance maximale à partir du panneau PV.

Pour atteindre cet objectif, après avoir présenté des généralités sur les systèmes PV, nous avons commencé par la modélisation mathématique d'un panneau photovoltaïque. Le modèle obtenu formalise un regroupement de cellules en série ou en parallèle en se basant sur les caractéristiques du panneau étudié.

La présentation de ce modèle nous a permis d'élaborer le schéma SIMULINK de notre système. En conditions atmosphériques normales, les cellules du panneau sont exposées à une température de 25° C et un éclairement de 1000 w/m². La puissance que peut délivrer le panneau PV est alors de (250Watts).

Après l'étape de la modélisation, nous nous sommes intéressés au problème de maximisation de la puissance délivrée par générateur PV. Pour ce faire, nous avons testé et comparé plusieurs méthodes MPPT qui sont la méthode « P&O », « INC » et la commande par logique floue. Les résultats montrent que toutes les méthodes testées sous les conditions atmosphériques standards atteignent le point MPP avec succès. Cependant, nous avons constaté que les deux méthodes « P&O » et « INC » présentent des oscillations autour du MPP tandis que la commande floue donne la meilleure réponse en termes de précision.

Notre simulation ne s'est pas limitée aux conditions atmosphériques standards. En effet, nous avons testé aussi les trois méthodes en cas de l'ombrage partiel. Les résultats de simulation nous ont montré que les deux techniques « P&O » et « INC » convergent vers optimum local. Par contre, la commande floue optimisée par le PSO donne des résultats beaucoup plus meilleurs et converge vers le MPP. D'après cette étude, on peut dire que :

- Le convertisseur statique DC-DC est un convertisseur idéal pour le système. Il permet d'avoir une tension à sa sortie supérieure à celle fournie par le GPV.
- L'utilisation de la commande MPPT permet d'améliorer le rendement des installations PV.

- La commande floue est efficace, mais elle nécessite un agent expert pour construire les fonctions d'appartenance et les règles d'inférence.
- L'utilisation du PSO permet d'optimiser le contrôleur flou.

Perspectives et travaux à venir

Ce travail peut être amélioré dans l'avenir. Nous proposons dans les travaux à venir de :

- 1- Réaliser la commande sur un dispositif pratique.
- 2- Utiliser les méthodes PSO modernes (Social Learning PSO, Compréhensive Learning PSO, Barebone PSO etc) reconnues d'être plus efficaces que la méthode PSO canonique.
- 3- Explorer le domaine des stratégies évolutionnaires les plus efficaces afin de trouver les résultats les plus prometteurs en toute condition.

Bibliographie

- [1] : Durukan, I. K., Bayal, Ö., Kurtuluş, G., Baş, Y., Gültekin, A., Öztürk, M. K., ... & Özbay, E. (2015). Examination of the temperature related structural defects of InGaN/GaN solar cells. *Superlattices and Microstructures*, 86, 379-389.f.
- [2] : R. Merahi, Modélisation d'un diapositif MPPT pour l'étude de l'augmentation de la puissance produite par les générateurs photovoltaïques, *Université de Annaba*, 2010.
- [3] : M. Bouafia, & L. Deblaoui, Modélisation et simulation d'une cellule solaire en couche mince à base de diséléniure de Cuivre, d'Indium et de Gallium (CIGS), *Université Kasdi Merbah. Ouargla*, 2012.
- [4] : Hua, C., Lin, J., & Shen, C. (1998). Implementation of a DSP-controlled photovoltaic system with peak power tracking. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 45(1), 99-107.
- [5] : Djarallah, M. (2008). contribution à l'étude des systèmes photovoltaïques résidentiels couplés au réseau électrique. *Université de Batna Thèse de Doctorat en Science*.
- [6] : MEFLAH, A. (2011). Modélisation et commande d'une chaîne de pompage photovoltaïque.
- [7] : Singh, P., Singh, S. N., Lal, M., & Husain, M. (2008). Temperature dependence of I-V characteristics and performance parameters of silicon solar cell. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 92(12), 1611-1616.
- [8] : Petrova-Koch, V., Hezel, R., & Goetzberger, A. (Eds.). (2008). *High-efficient low-cost photovoltaics: recent developments* (Vol. 140). Springer.
- [9] : BOUALEM, DENDIB, "Technique conventionnelles et avancée de poursuite MPPT pour des applications photovoltaïque : étude comparative.", Université Ferhat Abbes-Sétif Mémoire de Magister, Département d'électronique, 2007.
- [10] : Vinchah, M. R., Kargar, A., & Markadeh, G. A. (2014). A hybrid control method for maximum power point tracking (MPPT) in photovoltaic systems. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 39(6), 4715-4725.
- [11]: A.Luque, S. Hegedus: Handbook of Photovoltaic Science and Engineering Ltd, 2003.
- [12] : Cabal, C. (2008). *Optimisation énergétique de l'étage d'adaptation électronique dédié à la conversion photovoltaïque*(Doctoral dissertation, Université de Toulouse, Université Toulouse III-Paul Sabatier).
- [13] : Abbes, H., Abid, H., Loukil, K., Toumi, A., & Abid, M. (2014). Etude comparative de cinq algorithmes de commande MPPT pour un système photovoltaïque. *Revue des Energies Renouvelables*, 17(3), 435-445.

- [14] : Yubazaki, N., Otani, M., Ashida, T., & Hirota, K. (1995, March). Dynamic fuzzy control method and its application to positioning of induction motor. In *Proceedings of 1995 IEEE International Conference on Fuzzy Systems*. (Vol. 3, pp. 1095-1102). IEEE.
- [15] : A. Mechernene, *Commande Neuro-Floue Adaptative pour la Régulation de Vitesse d'un Moteur Asynchrone*, Mémoire de Magister, Ecole Normale Supérieure d'Enseignement Technique d'Oran, Algérie, 2008.
- [16] : M. BOUKLI HACENE OMAR, *Conception et Réalisation d'un générateur photovoltaïque Muni d'un convertisseur MPPT pour une Meilleure Gestion Energétique*, Mémoire Magister, Université Abou BakrBelekaid, 2011.
- [17]: Leuca, M. Novac, *Optimization Of Eddy-Current Heating Process Using Genetic Algorithms*. Rev. Roum. Sci. Techn.-Électrotechn. etÉnerg., 2009.
- [18] : Michalewicz, Z. (2013). *Genetic algorithms+ data structures= evolution programs*. Springer Science & Business Media.
- [19] : Alabedin, A. Z., El-Saadany, E. F., & Salama, M. M. A. (2011, July). Maximum power point tracking for photovoltaic systems using fuzzy logic and artificial neural networks. In *2011 IEEE Power and Energy Society General Meeting* (pp. 1-9). IEEE.