

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Djilali Bounaâma de Khemis Miliana
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de la technologie



Mémoire de fin d'étude

*En vue de l'obtention d'un diplôme de **Master** en **Automatique***

Option : Automatique et Informatique Industriel

Thème :

Commande MPPT basée sur la logique floue d'un système photovoltaïque

Réalisé par :

BOUTOUCHENT Soheyb

HOUASNI Sid-Ahmed

Devant le jury composée de :

Dr. TIDJANI Naoual

Dr. MAHDAB Salim

Dr. FEKIR Mohamed

Encadreur

Président

Examineur

REMERCIEMENTS

Je souhaite exprimer ma gratitude à Allah qui m'a donné la possibilité de vivre ce jour et de réaliser ce travail. Je Le loue pour Ses bienfaits. Et pour m'avoir accordé la force et le courage nécessaire pour mener ce projet à terme.

En particulier, je tiens à exprimer mes sincères remerciements à mon encadreur, Dr. TIDJANI NAOUAL, pour son accompagnement précieux tout au long de ce travail. Sa patience, ses conseils avisés qu'il m'a prodigués.

Mes remerciements s'adressent également à tous les membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à mon travail et pour leur évaluation. Je voudrais remercier mes proches, ma famille et mes amis pour leur soutien indéfectible tout au long de cette étude. Leurs encouragements consistants qui m'ont permis de garder le cap et de rester motivé jusqu'au bout.

Un grand merci à tous les enseignants qui ont contribué à ma formation durant mes études.

Enfin, je souhaite exprimer ma gratitude envers toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à ma formation et au développement de mes connaissances. Leur soutien a été précieux et a contribué à façonner ma trajectoire académique. Que mes remerciements soient également adressés à tous ceux qui ont joué un rôle dans ce humble travail.

Résumé :

Dans cette étude, nous avons proposé une méthode de contrôle basée sur la logique floue pour maximiser la puissance produite par les générateurs photovoltaïques, connue sous le nom de stratégie MPPT (Maximum Power Point Tracking). Notre approche de logique floue, basée sur un choix spécifique d'entrées et de sorties, a démontré des performances élevées en termes de suivi de la puissance de sortie, avec une vitesse maximale de suivi du point de puissance maximale, une bonne stabilité et une grande robustesse.

Notre contrôleur flou repose sur une décomposition des fonctions d'appartenance des entrées et des sorties en utilisant seulement trois ensembles de variables linguistiques, ce qui en fait un modèle flou très simple. À l'aide de Matlab-Simulink®, nous avons simulé le comportement du générateur PV, du convertisseur de puissance, de la tension et du courant, en utilisant à la fois la méthode P&O et notre contrôleur basé sur la logique floue. Nous avons analysé et comparé les performances relatives dans différents scénarios, en tenant compte de conditions climatiques fixes ou variables.

Nos résultats ont démontré que notre approche de contrôle basée sur la logique floue permet d'obtenir les meilleurs résultats en réponses pour le système photovoltaïque (PV). Cette méthode simple et efficace, offrant des performances supérieures dans la maximisation de la puissance produite par les générateurs photovoltaïques.

Mot clé : MPPT (Maximum Power Point Tracking), Générateurs photovoltaïques, Contrôle basé sur la logique floue, Performance de suivi de la puissance, Méthode P&O, Rendement des panneaux solaires, Optimisation de la conception du système PV Convertisseurs DC/DC, Extraction de la puissance maximale, Algorithme MPPT, Modélisation du système photovoltaïque, Énergie solaire et énergie renouvelable, Réponse du système photovoltaïque.

Abstract:

In this study, we proposed a control method based on fuzzy logic to maximize the power output of photovoltaic generators, known as the Maximum Power Point Tracking (MPPT) strategy. Our fuzzy logic approach, based on a specific choice of inputs and outputs, demonstrated high performance in terms of power output tracking, with maximum tracking speed of the maximum power point, good stability, and robustness.

Our fuzzy controller relies on decomposing the membership functions of the inputs and outputs using only three sets of linguistic variables, making it a very simple fuzzy model. Using Matlab-Simulink®, we simulated the behavior of the PV generator, power converter, voltage, and current, using both the P&O method and our fuzzy logic-based controller. We analyzed and compared the relative performance in different scenarios, considering fixed or variable weather conditions.

Our results demonstrated that our fuzzy logic-based control approach achieves the best results and responses for the photovoltaic (PV) system. This simple and effective method offers superior performance in maximizing the power output of photovoltaic generators.

Keywords : MPPT (Maximum Power Point Tracking), Photovoltaic generators, Fuzzy logic-based control, Power tracking performance, P&O method, Solar panel efficiency, PV system design optimization, DC/DC converters, Maximum power extraction, MPPT algorithm, Photovoltaic system modeling, Solar energy and renewable energy, Photovoltaic system response.

الخلاصة:

في هذه الدراسة، اقترحنا طريقة تحكم قائمة على المنطق الضبابي لتعظيم الطاقة المنتجة من مولدات الطاقة الشمسية، والتي تعرف باسم استراتيجية تتبع نقطة الطاقة القصوى (MPPT). أظهرت نهجنا المبني على المنطق الضبابي أداءً عاليًا في تتبع الطاقة المنتجة، مع سرعة قصوى في تتبع نقطة الطاقة القصوى، واستقرار جيد، ومرونة عالية.

يعتمد تحكمنا الضبابي على تقسيم وظائف العضوية للمدخلات والمخرجات باستخدام ثلاثة مجموعات فقط من المتغيرات اللغوية، مما يجعله نموذج ضبابي بسيط جدًا. باستخدام برنامج Matlab-Simulink®، قمنا بمحاكاة سلوك مولد الطاقة الشمسية، ومحول الطاقة، والجهد، والتيار، باستخدام طريقتي P&O والتحكم القائم على المنطق الضبابي. قمنا بتحليل ومقارنة الأداء النسبي في سيناريوهات مختلفة، مع مراعاة ظروف جوية ثابتة أو متغيرة.

أظهرت نتائجنا أن نهجنا للتحكم القائم على المنطق الضبابي يحقق أفضل النتائج والاستجابات لنظام الطاقة الشمسية. هذه الطريقة البسيطة والفعالة تقدم أداءً متفوقًا في تعظيم الطاقة المنتجة من مولدات الطاقة الشمسية.

كلمات مفتاحية: تتبع نقطة القدرة القصوى (MPPT)، مولدات الطاقة الشمسية، التحكم بناءً على المنطق الضبابي، أداء تتبع القدرة، طريقة P&O، كفاءة الألواح الشمسية، تحسين تصميم نظام الألواح الشمسية، محولات التيار المستمر / التيار المستمر، استخراج الطاقة القصوى، خوارزمية MPPT، نمذجة نظام الطاقة الشمسية، الطاقة الشمسية والطاقة المتجددة، استجابة نظام الطاقة الشمسية.

TABLE DES MATIÈRES

TABLE DES MATIÈRES	I
LISTE DES FIGURES	III
LISTE DES TABLEAUX	V
1 LE SYSTÈME PHOTOVOLTAÏQUE	3
1.1 INTRODUCTION	4
1.2 RAYONNEMENT SOLAIRE	4
1.2.1 Les types des rayonnements	5
1.3 CARACTÉRISTIQUES ÉLECTRIQUES D'UNE CELLULE PHOTOVOLTAÏQUE	6
1.3.1 Paramètres d'une cellule photovoltaïque	7
1.4 SIMULATION DE LA CELLULE PHOTOVOLTAÏQUE	8
1.4.1 Influence de l'éclairement	9
1.4.2 Influence de la température	10
1.4.3 Influence de l'association série des cellules PV	11
1.4.4 Influence de l'association parallèle des cellules PV	13
1.4.5 Influence de l'association mixte (Série+Parallèle) des cellules PV	14
1.5 AVANTAGES ET INCONVÉNIENTS D'ÉNERGIE PHOTOVOLTAÏQUE	16
1.5.1 Les avantages	16
1.5.2 Les inconvénients	17
1.6 LE POTENTIEL SOLAIRE EN ALGÉRIE	17
1.6.1 Le future d'énergie solaire photovoltaïque en Algérie	18
1.7 CONCLUSION	18
2 MODÉLISATION DU CONVERTISSEUR DC-DC	19
2.1 INTRODUCTION	20
2.2 LES PRINCIPES DE CONVERSION DANS LES SYSTÈMES PV	20
2.2.1 Etage d'adaptation entre un Générateur PV et une charge	21
2.2.2 Convertisseur DC/DC	21
2.3 LES TYPES DES CONVERTISSEURS	23
2.3.1 Convertisseur abaisseur (Buck)	23
2.3.2 Simulation d'un convertisseur buck	27
2.3.3 Convertisseurs survolteur (Boost Converter)	28
2.3.4 Simulation d'un convertisseur boost	33
2.3.5 Convertisseur BUCK-BOOST	34
2.3.6 Simulation d'un convertisseur Buck-Boost	38
2.4 CONCLUSION	39

3	LA COMMANDE MPPT	40
3.1	INTRODUCTION	41
3.2	PRINCIPE DE LA COMMANDE MPPT	41
3.3	CLASSIFICATION DES COMMANDES MPPT	42
3.3.1	Classification Des Commandes MPPT Selon Le Type De Recherche	42
3.3.2	Classification Des Commandes MPPT Selon Les Paramètres D'entrée	43
3.4	LES ALGORITHMES MPPT	44
3.4.1	Approche de la Tension Constante (CV, Constant Voltage)	44
3.4.2	Approche Du Courant Constant (Constant Current) . . .	45
3.4.3	Perturbation Et Observation (P&O, Perturb And Observe)	46
3.4.4	Conductance Incrémentale (IncCond, Incremental Conductance)	49
3.4.5	La Commande Mppt Floue	52
3.5	AUTRES MÉTHODES	54
3.6	CONCLUSION	55
4	COMMANDE MPPT BASÉE SUR LA LOGIQUE FLOUE	56
4.1	INTRODUCTION	57
4.2	PRINCIPE DE LA LOGIQUE FLOUE	57
4.2.1	La fuzzification	58
4.2.2	Inférence floue	61
4.2.3	La défuzzification	61
4.3	RÉSULTATS DE SIMULATION DE LA MÉTHODE MPPT FLOU . .	61
4.3.1	Comparaison des deux commande MPPT P&O et MPPT basée de logique floue :	63
4.4	CONCLUSION	67
	LISTE DES ABRÉVIATIONS	73

LISTE DES FIGURES

1.1	Réponse spectrale d'un cellule PV [6]	4
1.2	Types des rayonnement solaire reçus au sol	5
1.3	Schéma électrique d'une cellule photovoltaïque	6
1.4	Schéma de simulation du module PV de type «de KC6P-220 ».	9
1.5	L'effet de l'éclairement sur la caractéristique Courant-Tension.	9
1.6	L'effet de l'éclairement sur la caractéristique Puissance-Tension	10
1.7	L'effet de la température sur la caractéristique Courant-Tension.	10
1.8	L'effet de la température sur la caractéristique Puissance-Tension.	11
1.9	L'association en série de N modules solaires.	12
1.10	Caractéristique de nombre des modules en série $I=f(V)$. [10]	12
1.11	Caractéristique de nombre des modules en série $I=f(V)$. [10]	13
1.12	L'association de N_p modules solaires en parallèle	13
1.13	Caractéristique de nombre des modules en parallèles $I=f(V)$ [10]	14
1.14	Caractéristique de nombre des modules en parallèles $I=f(V)$ [10]	14
1.15	L'association mixte $N_s \times N_p$ modules solaires.	15
1.16	Caractéristique de nombre des modules en série et parallèle $P=f(V)$ [3].	15
1.17	Caractéristique de nombre des modules en série et parallèle $P=f(V)$ [3].	16
1.18	Moyenne annuelle de l'irradiation globale en Algérie [13].	18
2.1	Le système de conversion photovoltaïque.	20
2.2	Etage d'adaptation entre un GPV et une charge [17]	21
2.3	Convertisseur DC/DC [9]	22
2.4	Le circuit électrique d'un convertisseur Buck	23
2.5	Le fonctionnement du convertisseur Buck pendant l'état ON. [9]	24
2.6	Le fonctionnement du convertisseur Buck pendant l'état OFF. [9]	24
2.7	Circuit de convertisseur BUCK	27
2.8	Courant de sortie de convertisseur buck	28
2.9	Tension de sortie convertisseur buck	28
2.10	Schéma du circuit électrique d'un convertisseur Boost	29

2.11	Le fonctionnement du convertisseur Boost pendant l'état OFF. [9]	29
2.12	Le fonctionnement du convertisseur Boost pendant l'état ON. [9]	30
2.13	Circuit de convertisseur BOOST sur SimPowerSystem . . .	33
2.14	tension de Sortie Boost.	33
2.15	Courant de Sortie Boost	34
2.16	Circuit équivalent du convertisseur Buck-Boost	34
2.17	Circuit de convertisseur BUCK-BOOST sur SimPowerSystem	38
2.18	Courant de Sortie Buck-Boost	38
2.19	: tension de Sortie Buck-Boost	39
3.1	Schéma de principe du convertisseur MPPT [3]	41
3.2	Principe de la commande MPPT [22]	42
3.3	Algorithme de la Tension Constante	45
3.4	Algorithme du constant courant	46
3.5	Recherche du PPM par la méthode (P&O) [22]	47
3.6	l'algorithme de P&O classique	48
3.7	Divergence de la méthode P&O	49
3.8	caractéristique de tension-puissance du panneau	50
3.9	l'algorithme IncCond classique	52
3.10	structure de base de la commande floue	53
4.1	Structure de base du contrôleur MPPT à base logique floue	57
4.2	Mise en œuvre du contrôleur MPPT basée sur la logique floue	58
4.3	La fonction d'appartenance de l'entrée E	59
4.4	La fonction d'appartenance de l'entrée CE	60
4.5	La fonction d'appartenance de la sortie D	60
4.6	Simulation du system photovoltaïque avec technique P&O-MPPT	62
4.7	Simulation du system photovoltaïque avec technique Logique floue-MPPT	62
4.8	Schéma générale du contrôleur MPPT floue	63
4.9	Variation de la puissance en fonction du temps par logique flou et P & O dans PV system	64
4.10	Variation de la puissance en fonction de la tension par la logique flou et P&O pour le PV system	65
4.11	Variation du courant en fonction de la tension par logique flou et P& O pour le PV system	65
4.12	Variation de rapport cyclique D en fonction du temps	66

LISTE DES TABLEAUX

1.1	caractéristique de modèle photovoltaïque KC6P-220.	8
1.2	Taux d'ensoleillement pour chaque région de l'Algérie.	17
2.1	Complexité de chaque type de convertisseur DC-DC.	22
3.1	Tableau de vérité de l'algorithme « perturbation & observation.	47
3.2	table de vérité pour une commande logique floue.	53
4.1	Règles du contrôleur à logique floue.	61

INTRODUCTION GÉNÉRALE

La demande en énergie électrique ne cesse d'augmenter ces dernières années, tandis que les contraintes liées à sa production, telles que la pollution et le réchauffement climatique global, poussent les recherches vers le développement des sources d'énergie renouvelables. Dans ce contexte, les systèmes photovoltaïques (PV) représentent une solution très compétitive [1]. Pour maximiser l'efficacité des panneaux solaires et obtenir un rendement optimal, il est essentiel d'optimiser la conception de toutes les composantes du système PV [2]. De plus, il est nécessaire d'optimiser les convertisseurs DC/DC utilisés comme interfaces entre le générateur PV et la charge, afin d'extraire la puissance maximale et de faire fonctionner le générateur PV à son point de puissance maximale (MPP) en utilisant un contrôleur MPPT (maximum power point tracking). Ainsi, on peut obtenir un courant électrique maximal en adaptant aux variations de charge et aux conditions atmosphériques (luminosité et température) [3]. Depuis les années 70, un grand nombre de techniques de commande MPPT ont été développées. Elles vont des approches simples telles que les contrôleurs MPPT basés sur le retour d'état de la tension et du courant, aux contrôleurs plus performants utilisant des algorithmes pour calculer le point de puissance maximale (MPP) du générateur photovoltaïque (GPV). Parmi les techniques les plus couramment utilisées, on retrouve :

- Perturbation et Observation (P&O)
- Incrémentation de la Conductance (IC)

Au cours des dernières années, des techniques de commande plus robustes ont été associées à la commande MPPT, telles que la logique floue, afin d'améliorer le rendement des panneaux solaires [4].

Dans cette optique, nous allons présenter les différentes composantes d'un système photovoltaïque (PV), étudier et comparer les commandes P&O à une commande MPPT utilisant un contrôleur flou.

Ce mémoire est divisé en quatre chapitres, comme suit :

Le premier chapitre de ce mémoire aborde les notions générales relatives au soleil, à l'énergie solaire et à l'énergie photovoltaïque et quel qu'information sur le potentiel algérien et le future d'énergie photovoltaïque dans Algérie. Il sera également consacré à la modélisation d'un système photovoltaïque intégrant le générateur photovoltaïque (GPV).

Le deuxième chapitre se concentre sur la présentation des différents hacheurs et leur modélisation. Il inclut également la présentation des résultats de simulations correspondants.

Le troisième chapitre est consacré à la présentation de la définition de quelques algorithmes de MPPT (Maximum Power Point Tracking).

Le quatrième chapitre détaillera la simulation du système photovol-

taïque en utilisant la théorie des ensembles flous pour améliorer l'efficacité de conversion d'énergie.

Une conclusion générale dressera le bilan de cette étude en donnant quelques perspectives pour de futurs travaux.

LE SYSTÈME PHOTOVOLTAÏQUE

1

1.1 INTRODUCTION

Depuis longtemps, les humains cherchent à exploiter l'énergie considérable fournie par le soleil, qui est une source pratiquement illimitée d'énergie. Les systèmes photovoltaïques (PV) ont permis de rendre cela possible.

Le nom "photovoltaïque" a une origine grecque et se compose de deux parties : "photo" qui signifie lumière et "volt" qui est l'unité de tension électrique (V), nommée d'après Alessandro Volta.

1.2 RAYONNEMENT SOLAIRE

Le soleil est une étoile parmi tant d'autres. Il a un diamètre de 1390000 km, soit environ 50 fois celui de la terre. Il est composé à 80% d'hydrogène, 19% d'hélium et 1% d'un mélange de 100 éléments, soit pratiquement tous les éléments chimiques connus depuis que Langevin et Perrin, s'appuyant sur la théorie de la relativité d'Einstein, ont émis l'idée il y a une soixantaine d'années que c'est l'énergie de fusion nucléaire qui fournit au soleil sa puissance, il est aujourd'hui admis que le soleil est une bombe thermonucléaire hydrogène-hélium transformant chaque seconde 564 millions de tonnes d'hydrogène en 560 millions tonnes d'hélium; la réaction se faisant dans son noyau à la température d'environ 25 millions de degrés Celsius. Ainsi, à chaque seconde, le soleil est allégé de 4 millions de tonnes dispersées sous forme de rayonnement [5].

Dans une longueur variant de 0.22 à 10 μm , l'énergie associée à ce rayonnement solaire se décompose approximativement comme suit [6] :

- 9 % dans la bande des ultraviolets ($< 0.4 \mu\text{m}$)
- 47 % dans la bande visibles ($0.4 \text{ à } 0.8 \mu\text{m}$)
- 44 % dans la bande des infrarouges ($> 0.8 \mu\text{m}$).

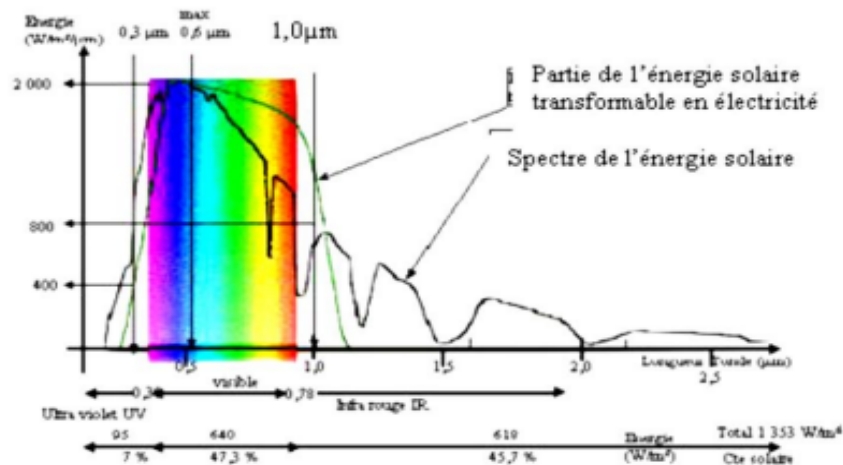


FIGURE 1.1 – Réponse spectrale d'une cellule PV [6]

1.2.1 Les types des rayonnements

Il est nécessaire de connaître le spectre du rayonnement solaire reçu sur sol. En effet, quatre types de rayonnement [7,8]

Le rayonnement direct :

Le rayonnement direct Est reçu directement du soleil, sans diffusion par l'atmosphère. Ces rayons sont parallèles entre eux. Il forme donc des ombres et peut être concentré par des miroirs. Il peut être mesuré par un Pyromètre.

Le rayonnement diffus :

Est constitué par la lumière diffusée par l'atmosphère (air, nébulosité, aérosols). La diffusion est le phénomène qui répartit un faisceau parallèle en une multitude de faisceaux partant dans toutes les directions. Dans le ciel, ce sont à la fois les molécules d'air, les gouttelettes d'eau (nuages) et les poussières qui produisent cet (éclatement) des rayons du soleil. Cela dépend donc avant tout des conditions météorologiques.

Le rayonnement solaire réfléchi :

Ou l'albédo du sol est le rayonnement qui est réfléchi par le sol ou par des objets se trouvant à sa surface. Cet albédo peut être important lorsque le sol est particulièrement réfléchissant (eau, neige).

Le rayonnement global :

Est la somme de tous les rayonnements reçus, y compris le rayonnement réfléchi par le sol et les objets qui se trouvent à sa surface. Il est mesuré par un pyranomètre ou un solarimètre sans écran

Le rayonnement solaire sur une surface au sol est composé comme suit Figure (1.2)

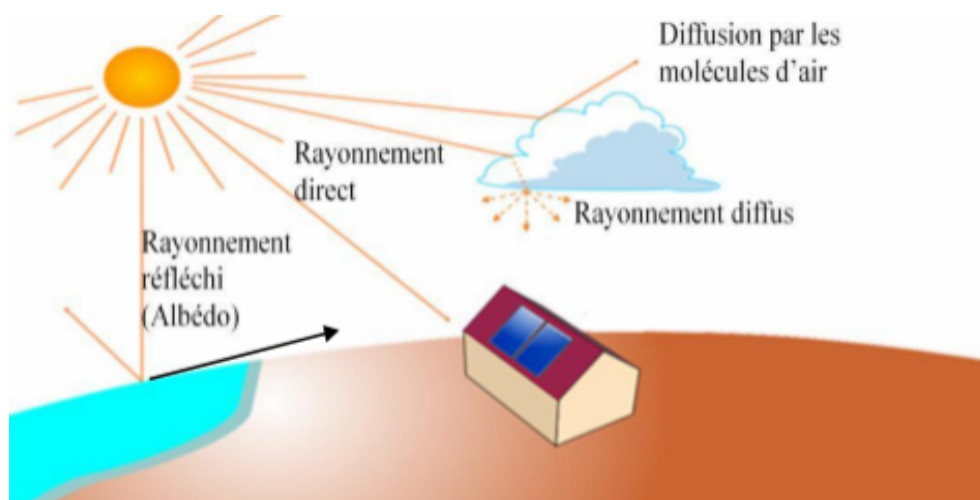


FIGURE 1.2 – Types des rayonnement solaire reçus au sol

1.3 CARACTÉRISTIQUES ÉLECTRIQUES D'UNE CELLULE PHOTOVOLTAÏQUE

La figure (I.3) présente le schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque sous éclairage. Il correspond à un générateur de courant (I_{ph}) monté en parallèle avec une diode. Deux résistances parasites sont introduites dans ce schéma. Ces résistances ont une certaine influence sur la caractéristique $I = f(V)$ de la cellule :

- La résistance série (R_s) est la résistance interne de la cellule; elle dépend principalement de la résistance du semi-conducteur utilisé, de la résistance de contact des grilles collectrices et de la résistivité de ces grilles. [9]

- La résistance shunt (R_p) est due à un courant de fuite au niveau de la jonction; elle dépend de la façon dont celle-ci a été réalisée

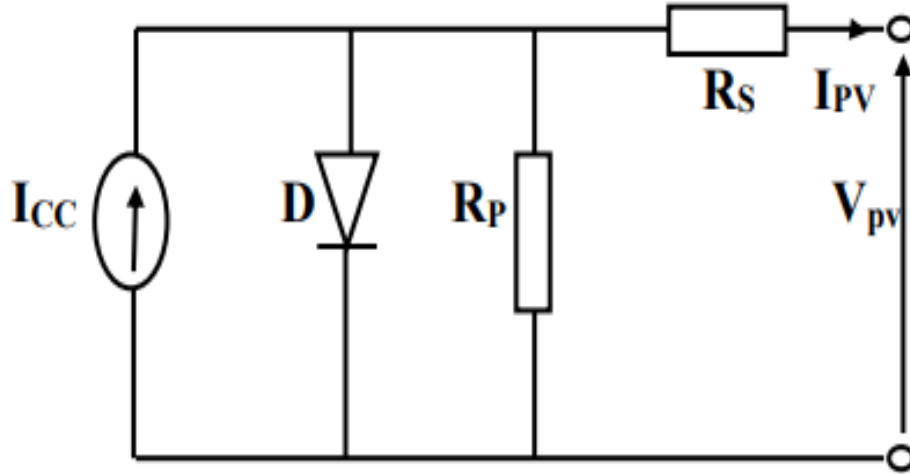


FIGURE 1.3 – Schéma électrique d'une cellule photovoltaïque

Le modèle mathématique pour la caractéristique courant-tension d'une cellule PV est donné par :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_{sa} \left[\exp \left(\frac{q (V_{pv} + (I_{pv} * R_s))}{n \cdot K \cdot T} \right) - 1 \right] - \frac{(V_{pv} + (I_{pv} * R_s))}{R_p} \quad (1.1)$$

Ou :

V_{pv} : Tension de sortie de la cellule(V).

I_{pv} : Courant de sortie de la cellule(A).

I_{ph} : Courant photo-générer ou photo-courant (A).

I_{sat} : Courant de saturation de la diode (A).

q : Charge d'électron $q = 1.6 \cdot 10^{-19}$ (C).

K : Constant de Boltzmann ($k = 1.38 \cdot 10^{-23}$ J/k).

T : Température absolue de fonctionnement de la jonction (k°).

n : Facteur d'idéalité de la diode ($n \in [1, 3]$).

R_p : Résistance parallèle(Ω).

R_s : Résistance série(Ω).

1.3.1 Paramètres d'une cellule photovoltaïque

Ces paramètres peuvent être déterminés à partir des courbes courant-tension, ou de l'équation caractéristique.

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

C'est le courant pour lequel la tension aux bornes de la cellule ou du générateur PV est nulle. Dans le cas idéal (R_s nulle et R_p infinie), ce courant se confond avec le photo-courant I_{ph} dans le cas contraire, en annulant la tension V dans l'équation (1.1), on obtient :

$$I_{cc} = I_{ph} - I_{sc} \left[\exp \left(\frac{q((I_{cc} * R_s))}{n \cdot K \cdot T} \right) - 1 \right] - \frac{(I_{cc} * R_s)}{R_p} \quad (1.2)$$

Pour la plupart des cellules (dont la résistance série est faible), on peut négliger le terme $I_{sat} \left[\exp \left(\frac{q((I_{cc} * R_s))}{n \cdot K \cdot T} \right) - 1 \right]$ devant I_{ph} . L'expression approchée du courant de court-circuit est alors :

$$I_{cc} \approx \frac{I_{ph}}{\left(1 + \frac{R_s}{R_p} \right)} \quad (1.3)$$

Quantitativement, il a la plus grande valeur du courant généré par la cellule (pratiquement $I_{cc} = I_{ph}$).

Tension de circuit-ouvert (V_{co}) :

C'est la tension V_{co} pour laquelle le courant débité par le générateur photovoltaïque est nul (c'est la tension maximale d'une photopile ou d'un générateur photovoltaïque).

$$0 = I_{cc} - I_{sa} \left[\exp \left(\frac{qV_{pv}}{nKT} \right) - 1 \right] - \frac{V_{pv}}{R_p} \quad (1.4)$$

Dans le cas idéal, sa valeur est légèrement inférieure à :

$$V_{co} = V_T \ln \left[\frac{I_{ph}}{I_{sat}} + 1 \right] \quad (1.5)$$

La puissance maximale :

C'est la puissance électrique maximale que peut fournir le module, qui est associé à une tension maximale V_m et à une intensité maximale I_m lorsqu'il est question de puissance maximale dans les conditions normalisées d'ensoleillement STC standard (25° et un éclairement de 1000W/m^2), on parle alors de puissance crête, mesurée en watts-crête

Facteur de forme FF :

C'est le rapport de la puissance maximale qui peut être délivré à la charge sur le produit de (I_{CC}, V_{CO}).

$$FF = \frac{P_{\max}}{I_{cc} \cdot V_{co}} = \frac{I_{mpp} \cdot V_{mpp}}{I_{cc} \cdot V_{co}} \quad (1.6)$$

Pour les cellules ayant moyen rendement, le FF des valeurs d'ordre 0.7 à 0.85. Le facteur de forme FF diminue si la température augmente.

L'efficacité (rendement) de la conversion :

C'est le rapport de la puissance électrique maximale pouvant être extraite, à la puissance de rayonnement incident sur la surface X de la cellule.

$$\eta = \frac{p_{\max}}{P_{\text{inc}}} = \frac{I_{mpp} \cdot V_{mpp}}{S \cdot G_a} = \frac{V_{co} I_{\infty} FF}{P_{\text{inc}}} \quad (1.7)$$

Avec P_{inc} est égale au produit de l'éclairement et de la surface totale des photopiles. Ce paramètre reflète la qualité de conversion de l'énergie solaire en énergie électrique.

1.4 SIMULATION DE LA CELLULE PHOTOVOLTAÏQUE

Pour réaliser cette modélisation, nous avons utilisé MATLAB comme outil de tests et de simulation. Nous avons choisi le modèle photovoltaïque de Konca solar cell KC6P-220. Le module est composé de 60 cellules solaires multi cristallines en silicone connectées en série pour produire une puissance maximale de 220.336 W. Les caractéristiques électriques de ce module photovoltaïque ont la température 25°C et l'irradiation 1000W/m² sont données dans le tableau suivant :

TABLE 1.1 – caractéristique de modèle photovoltaïque KC6P-220.

ParamètreElectrique	Konca solar cel1 KC6P-220
Puissance max (PM)	220,336 W
Vmpp	29,23 V
Impp	7,52 A
Isc	8,09 A
Voc	36,6 V
Nombre de cellules en série	60

Pour augmenter la puissance de sortie, les modules PV sont associés dans le panneau. Dans cette structure, les modules peuvent être connectés en série, en parallèle ou les deux, dans notre cas (NS=2, NP=3).

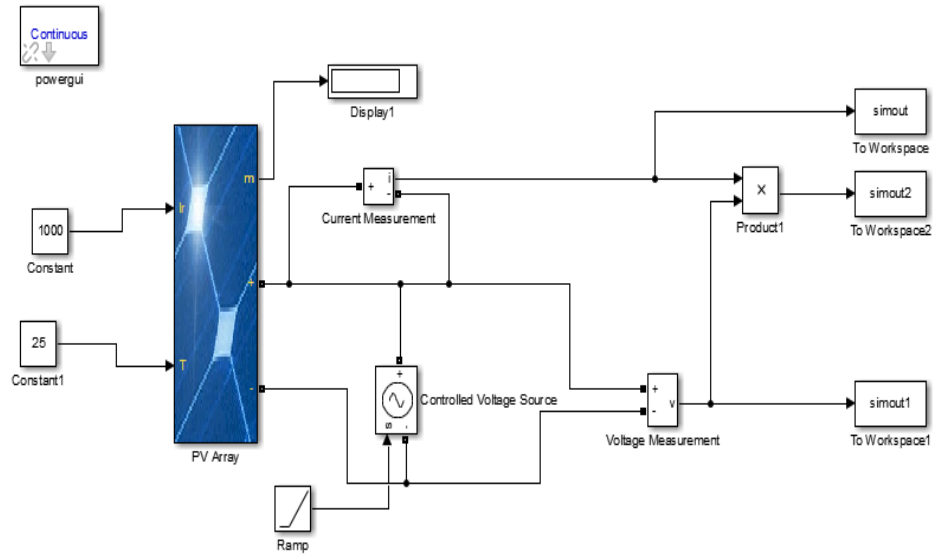


FIGURE 1.4 – Schéma de simulation du module PV de type « de KC6P-220 ».

Pour visualiser l'influence de l'éclairement, on a fixé la température à $T=25^\circ$ et on a fait varier l'éclairement dans une gamme de $[200, 1000]$ w/m^2 . Les caractéristiques I-V et P-V sont donnés par la figure (1.5) et la figure (1.6).

1.4.1 Influence de l'éclairement

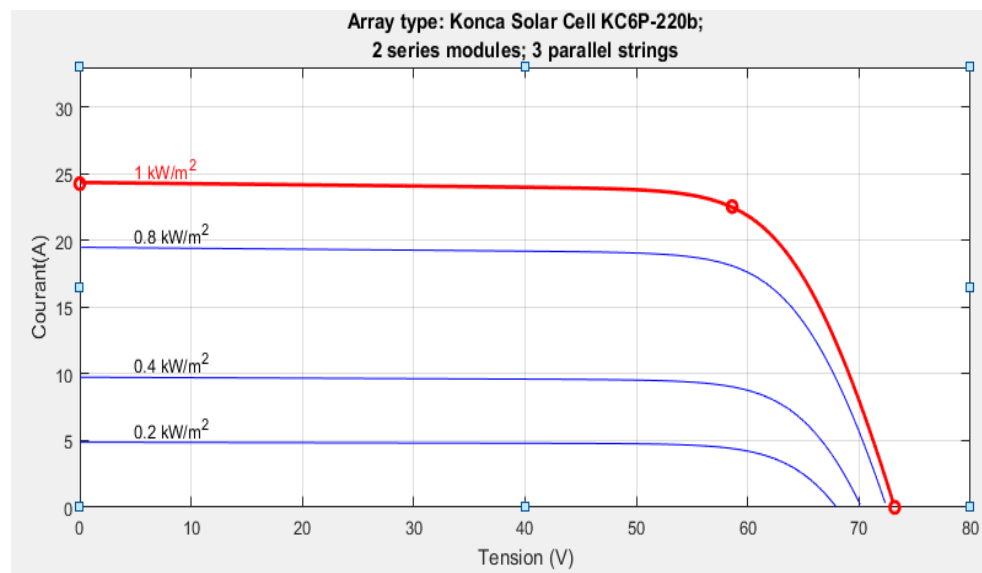


FIGURE 1.5 – L'effet de l'éclairement sur la caractéristique Courant-Tension.

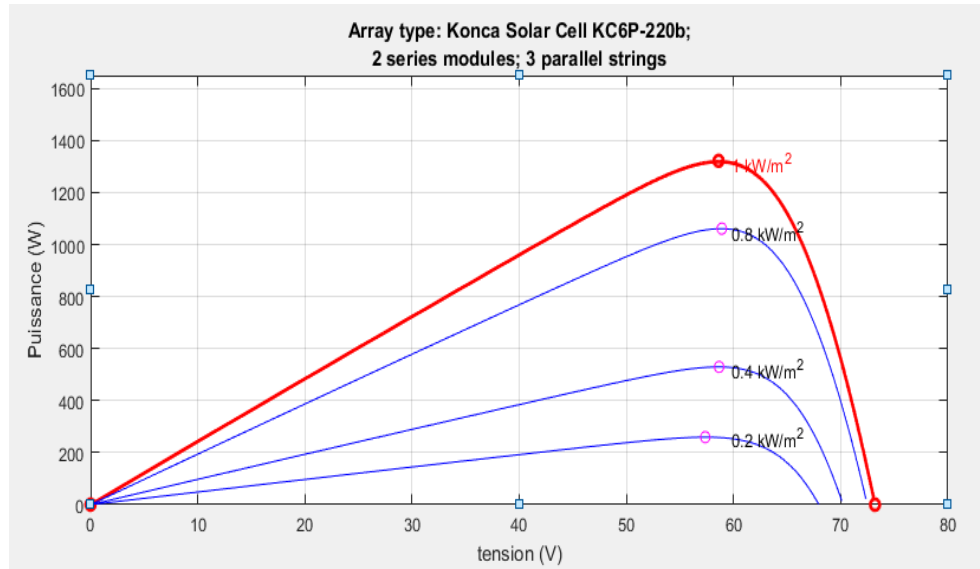


FIGURE 1.6 – L'effet de l'éclairement sur la caractéristique Puissance-Tension

La figure (1.6) montre comment la puissance fournie par le générateur varie en fonction de la tension pour différentes valeurs d'éclairement, ce qui nous permet de déterminer l'effet de l'éclairement sur la caractéristique $P(V)$.

1.4.2 Influence de la température

La température a une influence importante sur la conception des panneaux et des systèmes photovoltaïques. C'est un paramètre essentiel car les cellules solaires sont exposées aux rayonnements solaires, qui peuvent les chauffer. De plus, une partie de l'énergie solaire absorbée par les cellules n'est pas convertie en énergie électrique, mais se dissipe sous forme de chaleur, ce qui explique pourquoi la température de la cellule (T_c) est toujours plus élevée que la température ambiante (T_a).

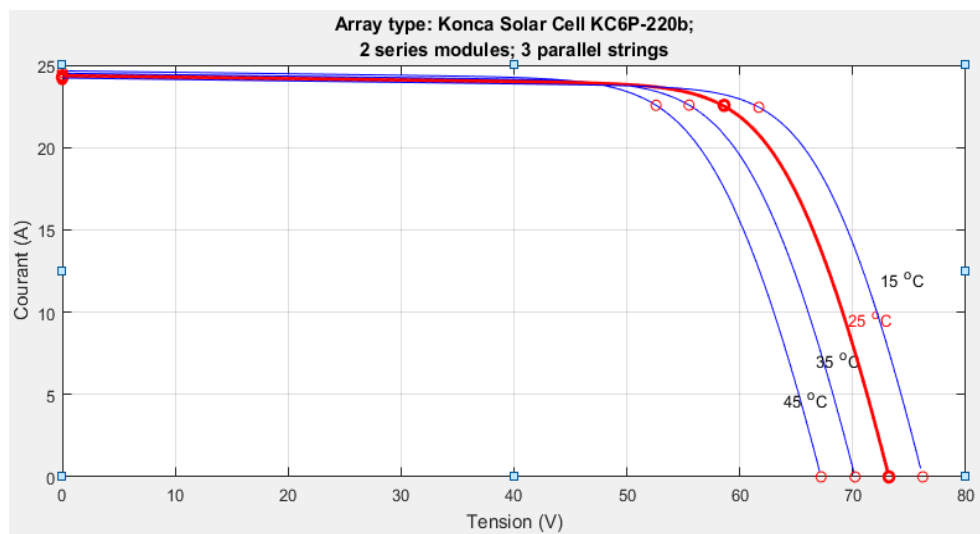


FIGURE 1.7 – L'effet de la température sur la caractéristique Courant-Tension.

La figure (1.7) montre comment la température affecte la caractéristique $I=f(V)$ d'une cellule solaire. Il est important de comprendre comment la température peut modifier cette caractéristique. Le courant qui traverse la cellule varie légèrement avec la température, augmentant progressivement lorsque la température augmente. En revanche, la tension de circuit ouvert diminue avec la température, ce qui a un effet négatif sur la puissance maximale du générateur. En conséquence, la puissance maximale délivrée par la cellule diminue lorsque la température augmente.

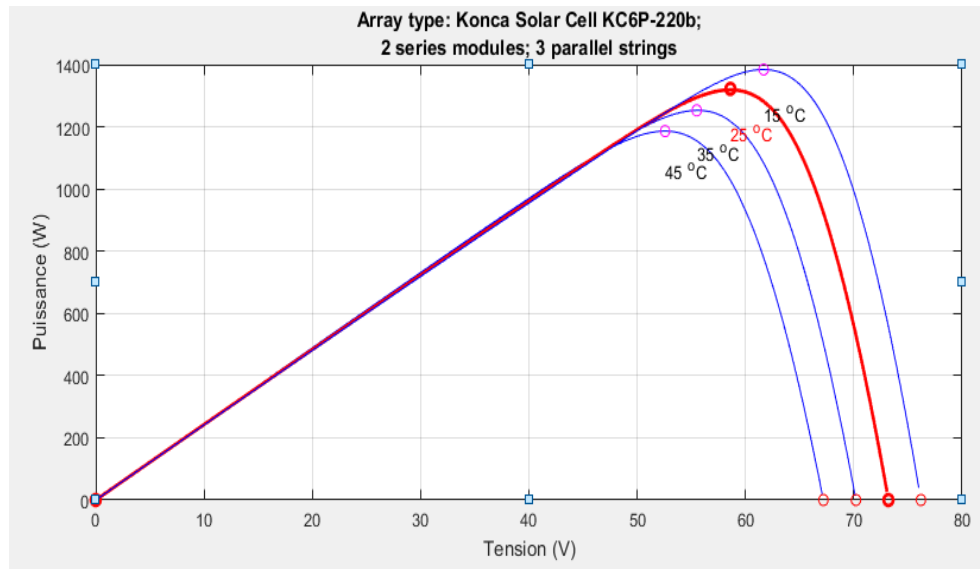


FIGURE 1.8 – L'effet de la température sur la caractéristique Puissance-Tension.

La figure (1.8) montre comment la puissance fournie par le générateur varie en fonction de la tension pour différentes valeurs de température, ce qui permet de déterminer l'effet de la température sur la caractéristique $P=f(V)$.

1.4.3 Influence de l'association série des cellules PV

Le système photovoltaïque utilise des cellules solaires individuelles comme unité de base pour produire de l'électricité. Cependant, chaque cellule ne produit qu'une très faible puissance électrique, généralement autour de 0,5 W avec une tension inférieure à un volt. Pour augmenter la puissance électrique, les cellules sont assemblées en modules ou panneaux solaires.

Un module de 54 cellules assemblées en série permet d'obtenir une tension compatible avec la charge. Pour augmenter la tension, il suffit d'assembler en série plusieurs modules (N_s). Pour augmenter le courant généré, il faut assembler en parallèle un nombre de modules (N_p) et utiliser des diodes de protection série et parallèles pour protéger le circuit contre le retour de courant.

L'association en série des cellules solaires permet d'obtenir une tension égale à la somme des tensions individuelles, tandis que le courant est égal à celui d'une seule cellule.

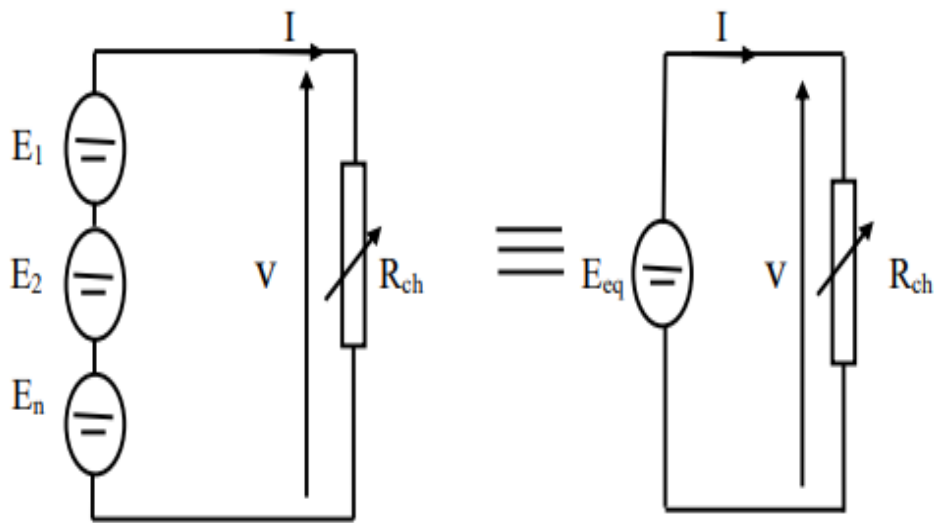


FIGURE 1.9 – L'association en série de N modules solaires.

La caractéristique d'un groupement de N_s modules solaires en série est représentée par la figure suivante :

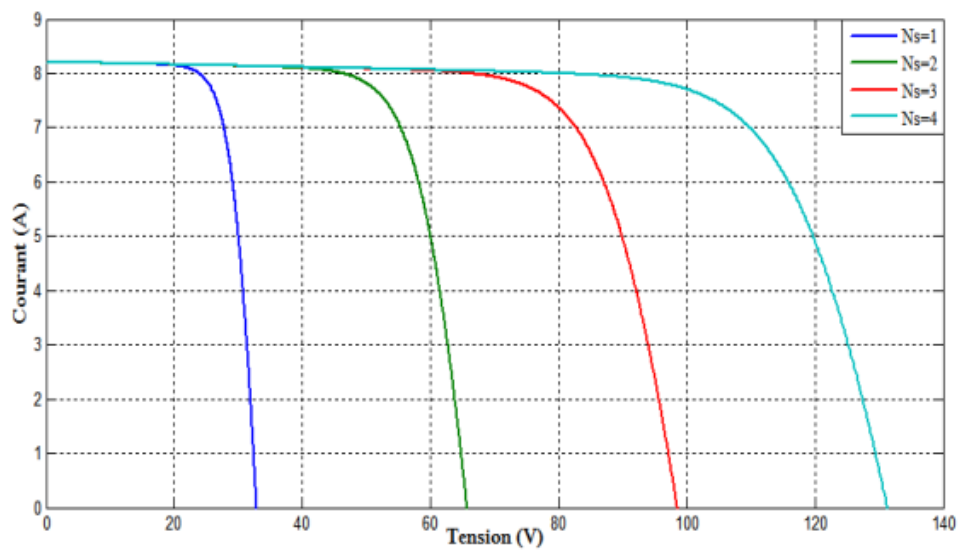


FIGURE 1.10 – Caractéristique de nombre des modules en série $I=f(V)$. [10]

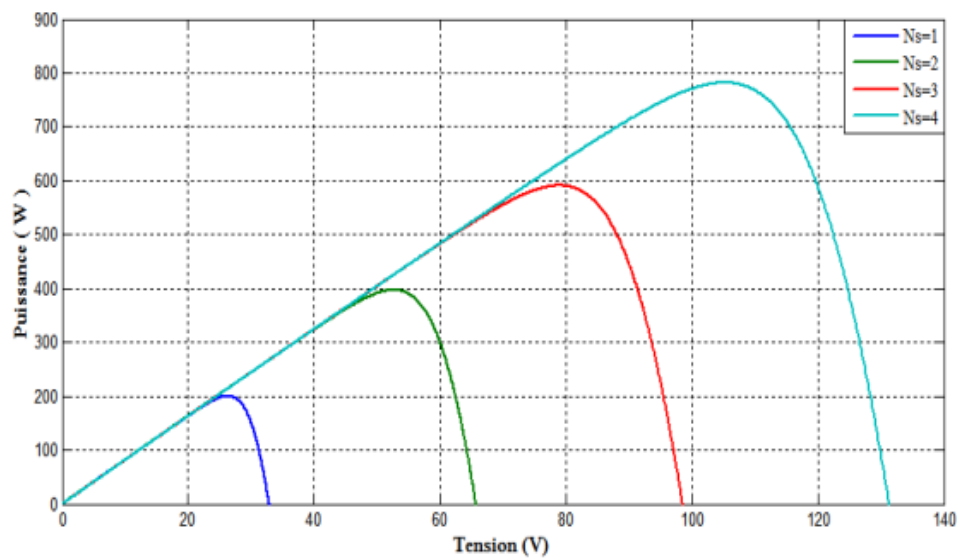


FIGURE 1.11 – Caractéristique de nombre des modules en série $I=f(V)$. [10]

1.4.4 Influence de l'association parallèle des cellules PV

Lorsque des cellules solaires sont connectées en parallèle, le courant total délivré est la somme des courants individuels de chaque cellule. En revanche, la tension reste la même que celle d'une seule cellule. Cela signifie que l'association en parallèle de cellules solaires permet d'augmenter le courant total délivré, mais pas la tension. Cela peut être utile pour obtenir une puissance totale plus élevée à partir des cellules solaires, mais cela ne permet pas d'augmenter la tension de sortie

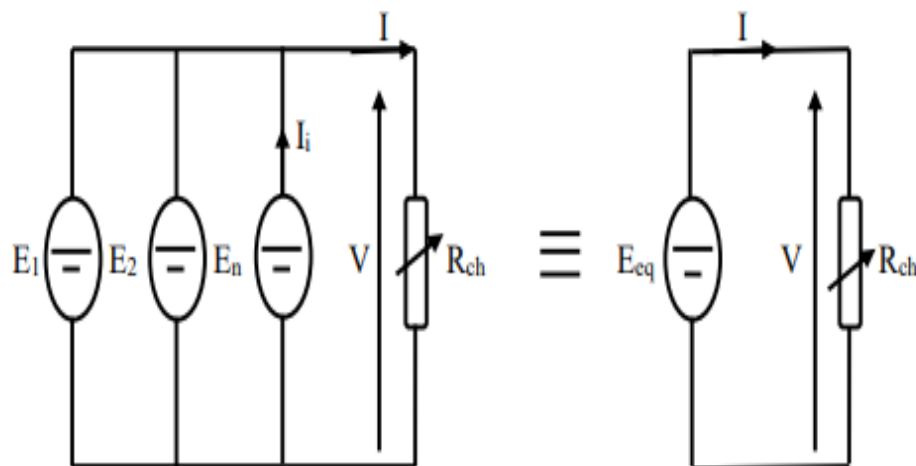


FIGURE 1.12 – L'association de N_p modules solaires en parallèle

La caractéristique d'un groupement de N_p modules solaires en parallèle est représentée par la figure suivante :

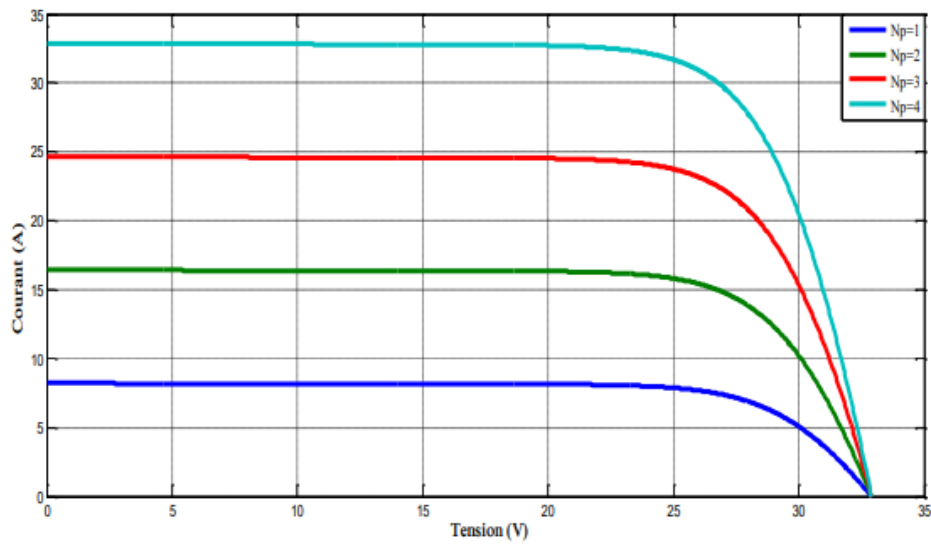


FIGURE 1.13 – Caractéristique de nombre des modules en parallèles $I=f(V)$ [10]

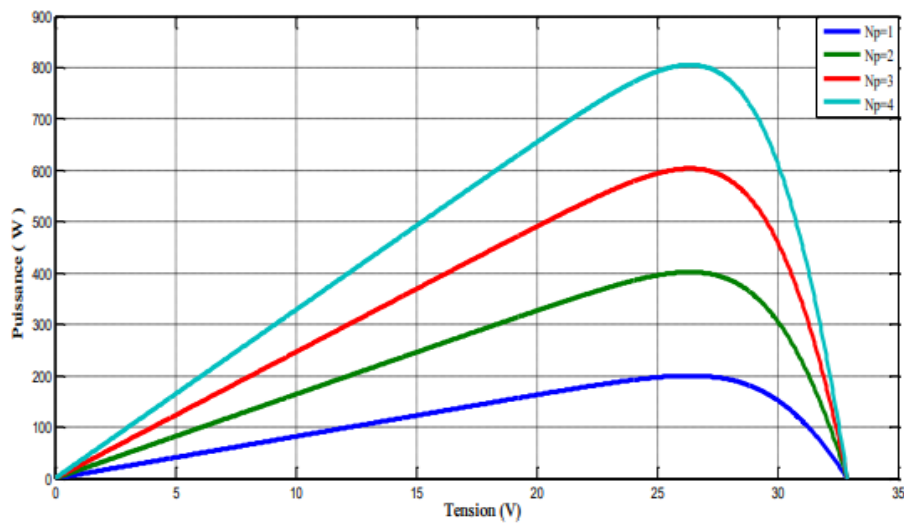


FIGURE 1.14 – Caractéristique de nombre des modules en parallèles $I=f(V)$ [10]

1.4.5 Influence de l'association mixte (Série+Parallèle) des cellules PV

Pour obtenir des niveaux de courant et de tension satisfaisants, il est souvent nécessaire d'utiliser une combinaison de connexions en série et en parallèle, appelée groupement mixte.

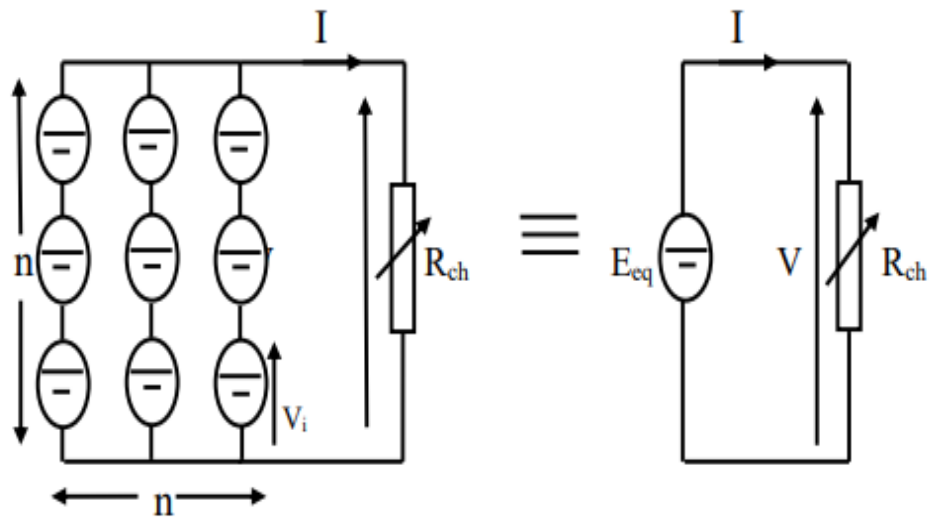


FIGURE 1.15 – L'association mixte $N_S \times N_P$ modules solaires.

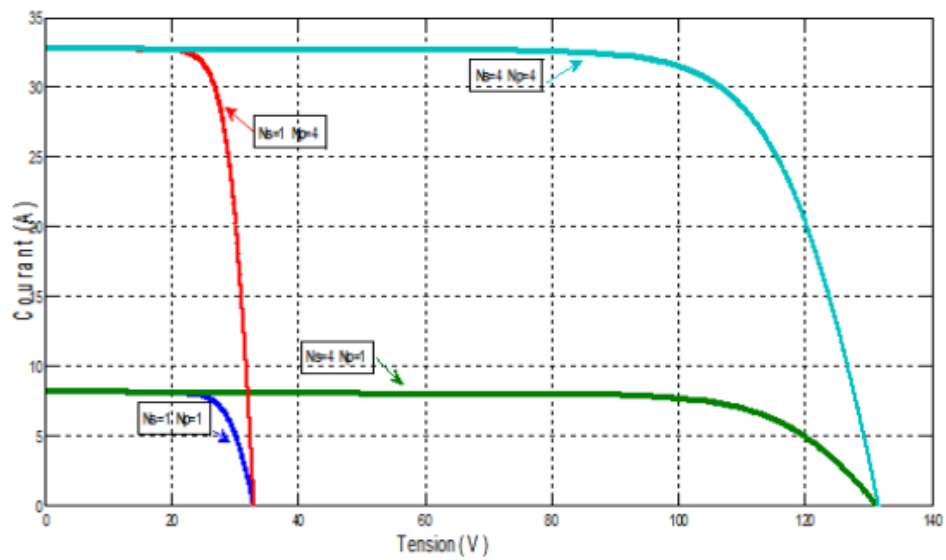


FIGURE 1.16 – Caractéristique de nombre des modules en série et parallèle $P=f(V)$ [3].

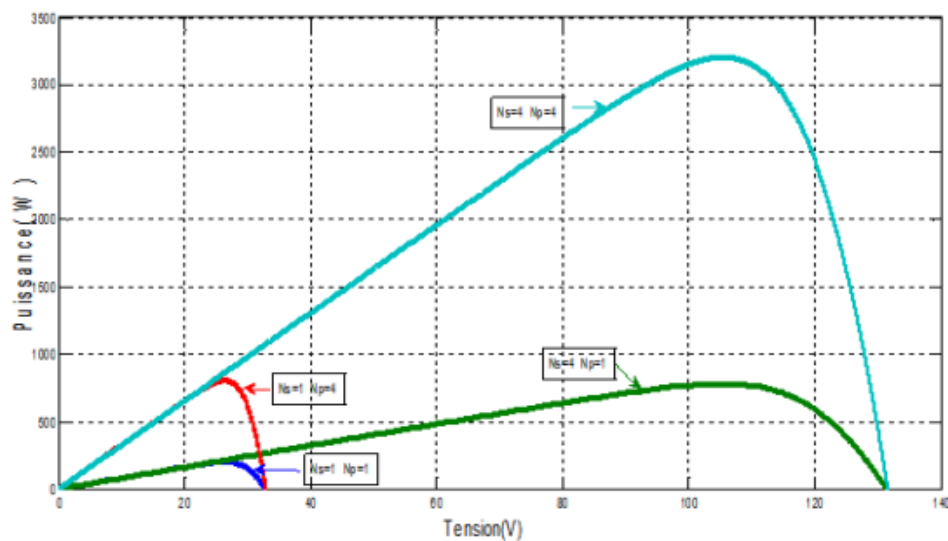


FIGURE 1.17 – Caractéristique de nombre des modules en série et parallèle $P=f(V)$ [3].

1.5 AVANTAGES ET INCONVÉNIENTS D'ÉNERGIE PHOTOVOLTAÏQUE

Les systèmes photovoltaïques offrent de nombreux avantages tout en ayant quelques inconvénients [11,12]

1.5.1 Les avantages

- La haute fiabilité.
- Le caractère modulaire des panneaux photovoltaïques permet un montage simple et adaptable à des besoins énergétiques divers.
- Son potentiel illimité. 5% de la surface des déserts suffiraient pour alimenter la planète entière
- La technologie photovoltaïque présente des qualités sur le plan écologique car le produit fini est non polluant, silencieux et n'entraîne aucune perturbation du milieu.
- L'utilisation de l'énergie solaire permet d'éviter l'utilisation d'énergies fossiles ou nucléaires pour fabriquer la même quantité d'électricité et donc de diminuer d'autant les émissions de gaz à effet de serre ou la production de déchets nucléaires.

1.5.2 Les inconvénients

- La fabrication du module photovoltaïque relève de la haute technologie et requiert des investissements d'un coût élevé.
- Le rendement réel de conversion d'un module est faible (la limite théorique pour une cellule au silicium cristallin est de 28%).
- Beaucoup d'appareils vendus dans le marché fonctionnent au 220 à 230 V alternatif. Or, l'énergie issue du générateur PV est unidirectionnelle et de faible voltage (<30V), elle doit donc être transformée par l'intermédiaire d'un onduleur.
- Lorsque le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batterie) est nécessaire, le coût du générateur photovoltaïque est accru. La fiabilité et les performances du système restent cependant équivalentes pour autant que la batterie et les composants de régulations associés soient judicieusement choisis.
- La puissance est réduite lorsque les conditions climatiques sont défavorables (nuages).

1.6 LE POTENTIEL SOLAIRE EN ALGÉRIE

De par sa situation géographique, l'Algérie dispose d'un des gisements solaires les plus élevés au monde. La durée d'insolation sur la quasi-totalité du territoire national dépasse les 2000 heures annuellement et peut atteindre les 3900 heures (hauts plateaux et Sahara). L'énergie reçue quotidiennement sur une surface horizontale de 1m² est de l'ordre de 5KWh sur la majeure partie du territoire national, soit près de 1700KWh/m² /an au nord et 2263kwh/m² /an au sud du pays. Au Sahara, ce potentiel peut constituer un facteur important de développement durable s'il est exploité de manière économique. Le tableau suivant indique le taux d'ensoleillement pour chaque région de l'Algérie [13,14].

TABLE 1.2 – Taux d'ensoleillement pour chaque région de l'Algérie.

Régions	Régions côtières	Hauts plateaux	Sahara
Superficie	4%	10%	86%
Durée moyenne d'ensoleillement (Heurs=an)	2650	3000	3500
Energie moyenne reçue (KWh/m ² / an)	1700	1900	2650

La Figure (I.18) illustre la moyenne annuelle de l'irradiation globale en Algérie [3].

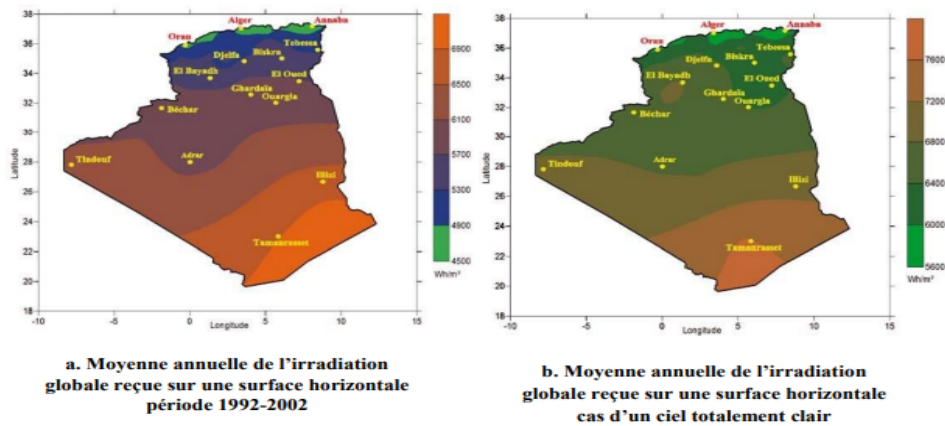


FIGURE 1.18 – Moyenne annuelle de l'irradiation globale en Algérie [13].

1.6.1 Le future d'énergie solaire photovoltaïque en Algérie

Cette énergie est une source d'énergie non polluante qui répond parfaitement aux besoins des sites isolés et dont le raccordement au réseau électrique est trop onéreux. Modulaires, ses composants se prêtent bien à une utilisation innovante et esthétique en architecture. La stratégie énergétique de l'Algérie repose sur l'accélération du développement de l'énergie solaire. Le gouvernement prévoit le lancement de plusieurs projets solaires photovoltaïques d'une capacité totale d'environ 800 MWc d'ici 2020. D'autres projets d'une capacité de 200 MWc par an devraient être réalisés sur la période 2021-2030 [15].

1.7 CONCLUSION

Dans ce chapitre nous avons présenté quelques notions sur le rayonnement solaire, l'énergie solaire et l'énergie photovoltaïque, et nous avons présenté la modélisation d'une cellule photovoltaïque et sa caractéristique. Ainsi, l'influence de quelques paramètres sur ses caractéristiques. Pour le fonctionnement optimal d'un système photovoltaïque. Avec à la fin un aperçu de cette énergie en Algérie.

Dans le prochain chapitre, nous présenterons les convertisseurs statiques DC/DC qui sont les Hacheurs ainsi que la commande MPPT.

MODÉLISATION DU CONVERTISSEUR DC-DC

2

2.1 INTRODUCTION

Pour atteindre un rendement optimal des panneaux solaires et maximiser la production d'énergie, il est crucial d'optimiser la conception de toutes les composantes du système PV. Cela inclut l'optimisation des convertisseurs DC/DC utilisés pour connecter le générateur PV à la charge, afin d'extraire la puissance maximale en permanence et de faire fonctionner le GPV à son point de puissance maximum (PPM). Cette extraction de puissance maximale doit être réalisée sans perte d'énergie grâce à un contrôleur MPPT. Cela permet d'obtenir une puissance maximale en tenant compte des variations de charge et des conditions environnementales telles que la luminosité et la température.

Pour améliorer le rendement des systèmes photovoltaïques, il est important d'optimiser la conception de toutes les parties du système, y compris les convertisseurs DC/DC utilisés pour extraire la puissance maximale du générateur PV. Pour atteindre cet objectif, il existe des lois de commande spécifiques, appelées "Recherche du Point de Puissance Maximum" ou "Maximum Power Point Tracking" (MPPT), qui permettent de trouver et de maintenir le générateur PV à son point de puissance maximale (PPM) en ajustant en permanence l'interface entre le générateur et la charge. L'objectif est d'assurer une parfaite adaptation entre le générateur et sa charge afin de transférer le maximum de puissance, même si les points de fonctionnement changent en raison des conditions atmosphériques ou de la variation de la charge.

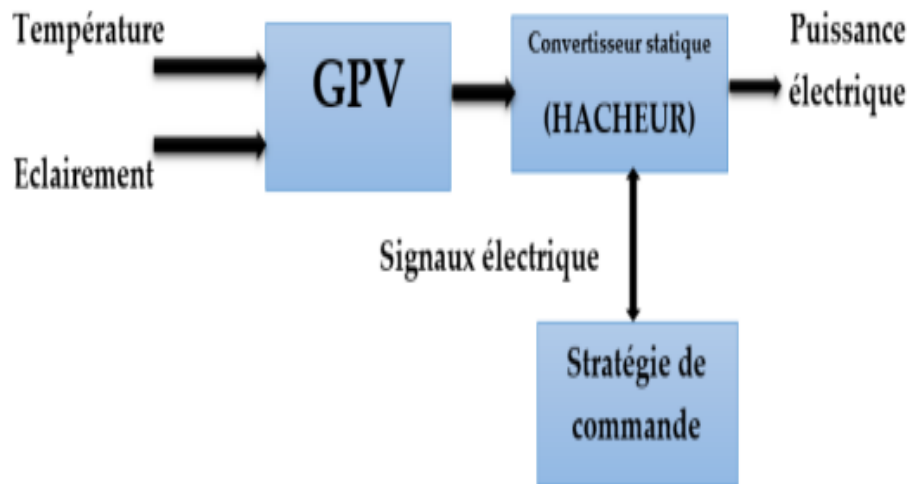


FIGURE 2.1 – Le système de conversion photovoltaïque.

2.2 LES PRINCIPES DE CONVERSION DANS LES SYSTÈMES PV

Le générateur photovoltaïque (PV) constitue le cœur d'un système PV, mais pour une utilisation pratique, d'autres composants sont indispensables, notamment pour le stockage d'énergie, la régulation du flux d'éner-

gie ou l'injection dans le réseau électrique. Cependant, ces éléments supplémentaires représentent une part importante des coûts, peuvent réduire l'efficacité globale et ont une influence considérable sur le comportement et les performances de l'ensemble du système.

2.2.1 Etage d'adaptation entre un Générateur PV et une charge

Pour les conditions environnementales et de charge données. Cette technique est appelée Maximum Power Point Tracking (MPPT) et elle est essentielle pour optimiser l'efficacité de tout système PV.

Le MPPT utilise un contrôleur électronique pour réguler la tension et le courant du GPV, de manière à maintenir la tension à ses bornes constantes et à obtenir la puissance de sortie maximale possible. Le contrôleur MPPT compare la puissance délivrée par le GPV avec la puissance maximale théorique et ajuste la tension et le courant en conséquence pour maintenir le GPV à son PPM. Ce contrôle se fait en temps réel et permet de suivre les variations de l'ensoleillement et de la température pour optimiser en permanence la production d'énergie.

L'étage d'adaptation peut être un convertisseur DC/DC ou un onduleur, en fonction de la configuration du système. Dans tous les cas, il est important que l'étage d'adaptation ait un rendement élevé afin de minimiser les pertes d'énergie. [16]

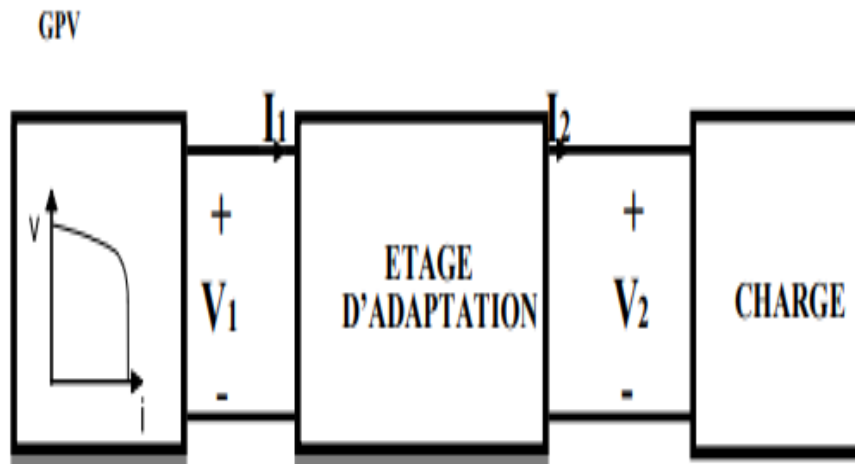


FIGURE 2.2 – Etage d'adaptation entre un GPV et une charge [17]

2.2.2 Convertisseur DC/DC

Les convertisseurs DC-DC sont essentiels pour la conversion de puissance électrique, car ils permettent un contrôle précis de la puissance dans les circuits fonctionnant en courant continu, avec un rendement élevé et une grande souplesse. Les circuits de hacheurs sont composés de condensateurs, d'inductances et de commutateurs. Dans le cas idéal, ces dispositifs ne consomment aucune puissance active, ce qui se traduit par de

bons rendements. Les commutateurs, réalisés avec des dispositifs semi-conducteurs tels que les transistors MOSFET ou les IGBT, fonctionnent en mode bloqué/saturé. Si le dispositif semi-conducteur est bloqué, son courant est nul, ce qui permet une dissipation de puissance nulle. Si le dispositif est saturé, la chute de tension à ses bornes sera presque nulle, ce qui réduira la puissance perdue à un niveau très faible. [18,19]

La figure II.3 montre que Le convertisseur DC/DC est l'interface utilisée entre la source PV et la charge.

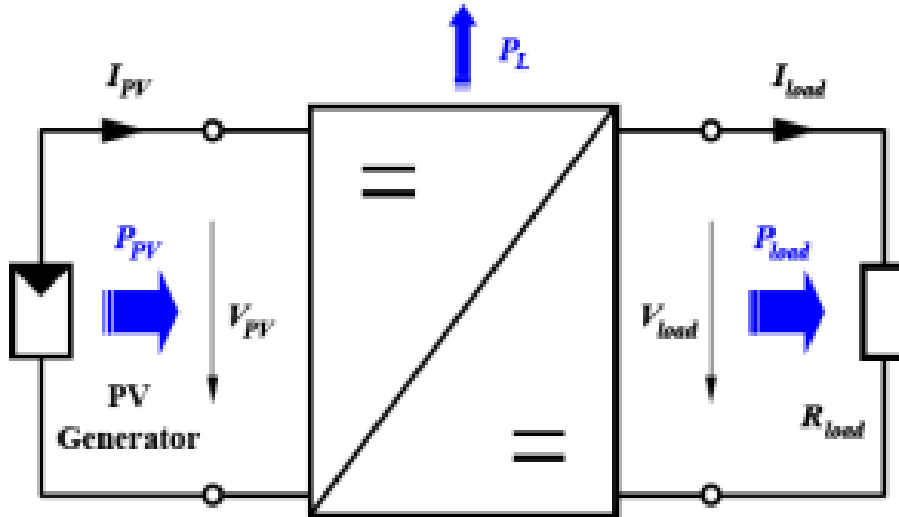


FIGURE 2.3 – Convertisseur DC/DC [9]

Il y a différents types de convertisseurs DC-DC. Le tableau suivant donne une idée sur la complexité de chaque type de convertisseur

TABLE 2.1 – Complexité de chaque type de convertisseur DC-DC.

Type	Fonction	Inter-rupteur	Diode	Transfor-mateur	Complex-ité
Buck	Abaisseur	1	1	Non	Faible
Boost	Elévateur	1	1	Non	Faible
Buck-Boost	Abais/ Elévat	1	1	Non	Faible
Flyback	Abais/ Elévat	1	1	Oui	Moyen
Half Forward	Abais/ Elévat	1	1	Oui	Moyen
Push Pull	Abais/ Elévat	2	2	Oui	Forte
Half Bridge	Abais/ Elévat	2	2	Oui	Forte
Full Bridge	Abais/ Elévat	4	4	Oui	Très Forte

Dans notre étude nous présentons le principe d'un convertisseur DC/DC de types Boost, qui est utilisé fréquemment dans les systèmes photovoltaïques pour générer les tensions et les courants souhaités. Ce type de convertisseur n'est constitué que par des éléments réactifs (Selfs, Capacités) qui, dans le cas idéal, ne consomment aucune énergie. C'est pour cette raison qu'ils sont caractérisés par un grand rendement [20]

2.3 LES TYPES DES CONVERTISSEURS

2.3.1 Convertisseur abaisseur (Buck)

Un convertisseur Buck, également appelé hacheur série, est une alimentation à découpage qui permet de convertir une tension continue élevée en une tension continue plus basse. Il est composé d'un interrupteur, d'une inductance, d'une diode et d'un condensateur. Lorsque l'interrupteur est fermé, le courant circule dans l'inductance, stockant ainsi de l'énergie sous forme d'énergie magnétique. Lorsque l'interrupteur est ouvert, la diode est polarisée directement et le courant circule dans la charge via la diode et le condensateur, transférant ainsi l'énergie stockée dans l'inductance vers la charge. Ce type de convertisseur peut être utilisé comme adaptateur source-charge lorsque le point de fonctionnement en couplage direct est à gauche du point de puissance maximale.

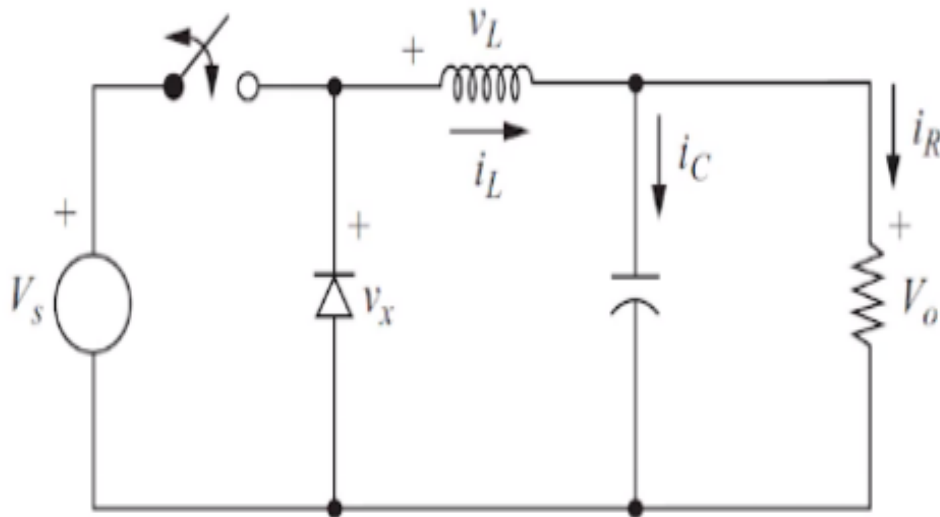


FIGURE 2.4 – Le circuit électrique d'un convertisseur Buck

principe de fonctionnement

Le fonctionnement d'un convertisseur Buck peut être divisé en deux configurations en fonction de l'état de l'interrupteur S :

- État passant : Lorsque l'interrupteur S est fermé, la tension aux bornes de l'inductance augmente et le courant traversant l'inductance augmente linéairement. La diode est bloquée car la tension aux bornes de la diode est négative et aucun courant ne la traverse.

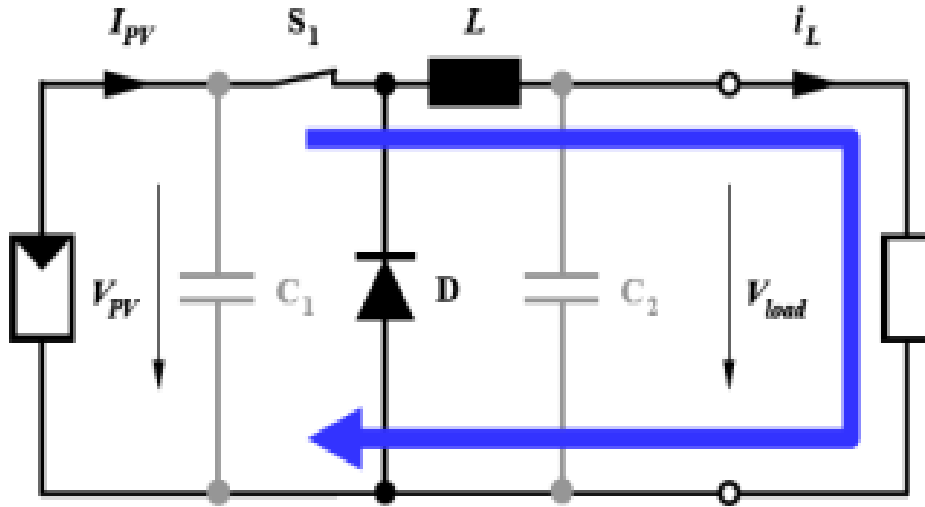


FIGURE 2.5 – Le fonctionnement du convertisseur Buck pendant l'état ON. [9]

- État bloqué : Lorsque l'interrupteur S est ouvert, la diode devient passante pour assurer la continuité du courant dans l'inductance. La tension aux bornes de l'inductance diminue et le courant traversant l'inductance décroît.

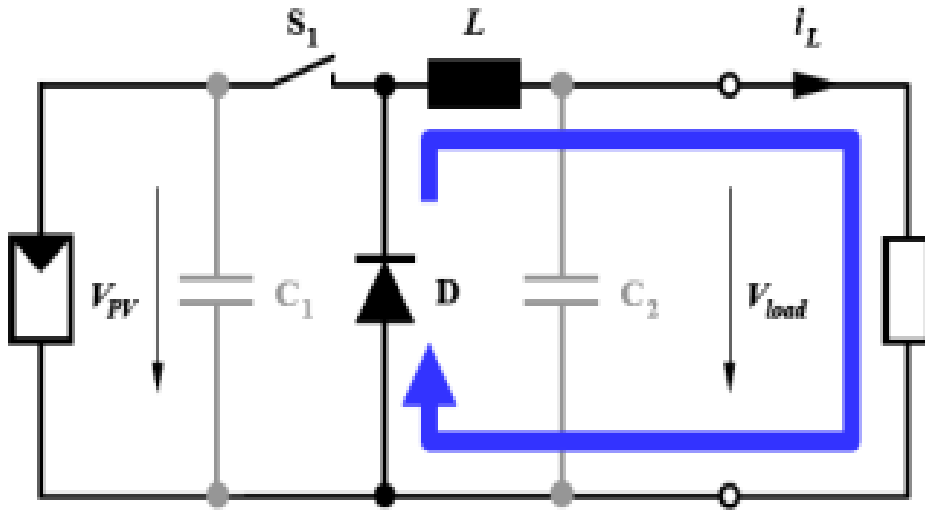


FIGURE 2.6 – Le fonctionnement du convertisseur Buck pendant l'état OFF. [9]

Modélisation le circuit

$$V_o = V_A = DV_s \quad (2.1)$$

$$D_{iL} = \frac{1}{L} (V_s - V_o) DT_s = \frac{1}{L} V_o (1 - D) T_s \quad (2.2)$$

$$I_L + I_o = \frac{V_o}{R} \quad (2.3)$$

$$i(t) = C \frac{dv(t)}{dt} \quad (2.4)$$

$$v(t) = L \frac{di(t)}{dt} \quad (2.5)$$

Représentation d'état :

Dans le cas où le système considéré est linéaire, la représentation d'état se met sous la forme :

$$\begin{cases} \dot{X} = A_1 x + Bu \\ Y = C_1 X \end{cases}$$

$$X = \begin{bmatrix} I_L \\ V_C \end{bmatrix}$$

avec : $U = V_0$

X : vecteur d'état, Y : vecteur de sortie, u : vecteur de commande et A : matrice d'état.

Pour étudier le convertisseur abaisseur et extraire son modèle mathématique, on analyse le fonctionnement du circuit équivalent pour S ouvert et fermé.

— Pour $T = [0, DT_s]$, S est fermé :

$$i_{C1}(t) = C_1 \frac{dV_s(t)}{dt} = i(t) - i_L(t) \quad (2.6)$$

$$i_{C2}(t) = C_2 \frac{dV_o(t)}{dt} = i_L(t) - i_o(t) \quad (2.7)$$

$$V_L(t) = L \frac{di_L(t)}{dt} = V_s - V_o(t) \quad (2.8)$$

$$\begin{cases} L \frac{di_L}{dt} = V_O - V_C \\ C \frac{dV_C}{dt} = i_L - \frac{V_C}{R} \end{cases}$$

donc :

$$\begin{bmatrix} \dot{X}_1 \\ \dot{X}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{C} & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L} \\ 0 \end{bmatrix} V_O$$

— Pour $T = [DT_s, T_s]$ est ouvert :

$$i_{C1}(t) = C_1 \frac{dV_s(t)}{dt} = i(t) \quad (2.9)$$

$$i_{C2}(t) = C_2 \frac{dV_o(t)}{dt} = i_L(t) - i_o(t)$$

$$V_L(t) = L \frac{di_L(t)}{dt} = -V_o(t)$$

$$\begin{cases} L \frac{di_L}{dt} = -V_O \\ C \frac{dV_C}{dt} = i_L - \frac{V_C}{R} \end{cases}$$

Donc le système sous forme matricielle devient :

$$\begin{bmatrix} \dot{X}_1 \\ \dot{X}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ \frac{1}{C} & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\frac{1}{L} \\ 0 \end{bmatrix} V_O$$

La tension moyenne d'inductance est égale à zéro en régime permanent :

$$V_L(t) = D(V_s - V_O) + (1 - D)(-V_O) = 0 \quad (2.10)$$

La relation de la tension d'entrée V_s et de sortie V_O en fonction du rapport cyclique D est donnée par l'équation :

$$(V_L - V_O)DT_s = V_O(1 - D)T_s$$

A partir de l'équation, le rapport de conversion du hacheur dévolteur est donné par la forme suivant :

$$M(D) = \frac{V_O}{V_s} = D$$

Le rapport de conversion $M(D)$ varie proportionnellement avec le rapport cyclique de commutation D .

Dimensionnement des Eléments du Convertisseur BUCK

Nous allons faire le dimensionnement des éléments du convertisseur Buck en mode de conduction continu ayant les caractéristiques définies par le cahier des charges suivant :

- Tension d'entrée : $V_s = 48V$
- Tension de sortie : $V_O = 18V$
- Fréquence de découpage : $f = 40KHz$
- Ondulation relative de la tension de sortie : $\Delta V_O = 0.5\%$ de V_O
- Courant de sortie : $I_O = 1.8A$

D'après le cahier des charges , nous allons calculer les paramètres suivants :

- Rapport cyclique D :

$$V_O = DV_s \Rightarrow D = \frac{V_O}{V_s} = \frac{18}{48} = 0.375 \quad (2.11)$$

- La résistance de charge :

$$R = \frac{V_O}{I_O} = \frac{18}{1.8} = 10\Omega \quad (2.12)$$

- La période de fonctionnement :

$$T = \frac{1}{f} = \frac{1}{40 \times 10^3} = 25\mu s \quad (2.13)$$

- Les temps de conduction :

$$t_{on} = DT = 0.375 \times 25 \times 10^{-6} = 9.375 \mu s \quad (2.14)$$

— La valeur min de l'inductance : d'après l'équation 3.9 :

$$L_{min} = \frac{(1-D)R}{2.F} = \frac{(1-0.375) \times 10}{2 \times 40 \times 10^3} = 19.5 \mu H \quad (2.15)$$

— La valeur du 25% pour min inductance :

$$L = 0.25L_{min} = (0.25) (78 \times 10^{-6}) = 97.5 \mu H \quad (2.16)$$

— La valeur max du courant de l'inductance : après l'équation 3.7 on a :

$$I_{L_{max}} = \frac{V_O}{R} + \frac{V_O}{2.L}(1-D)T = \frac{18}{10} + \frac{18}{2 \times 97.5 \times 10^{-6}}(1-0.375) \times 25 \times 10^{-6} = 3.25 \text{ A} \quad (2.17)$$

— Calcule min de capacité :

$$C = \frac{1-D}{8L(\Delta V_O / V_O) f^2} = \frac{1-0.375}{8(97.5)(10^{-6})(0.005)(40000)^2} = 100 \mu F \quad (2.18)$$

2.3.2 Simulation d'un convertisseur buck

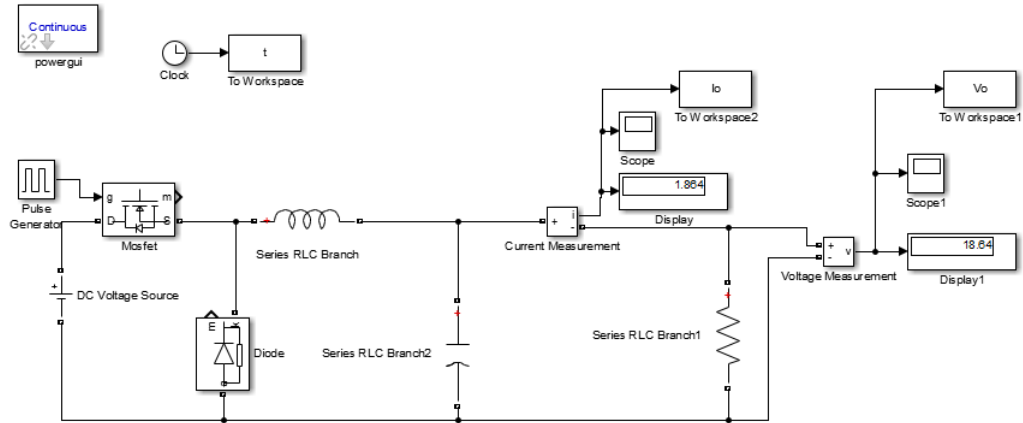


FIGURE 2.7 – Circuit de convertisseur BUCK

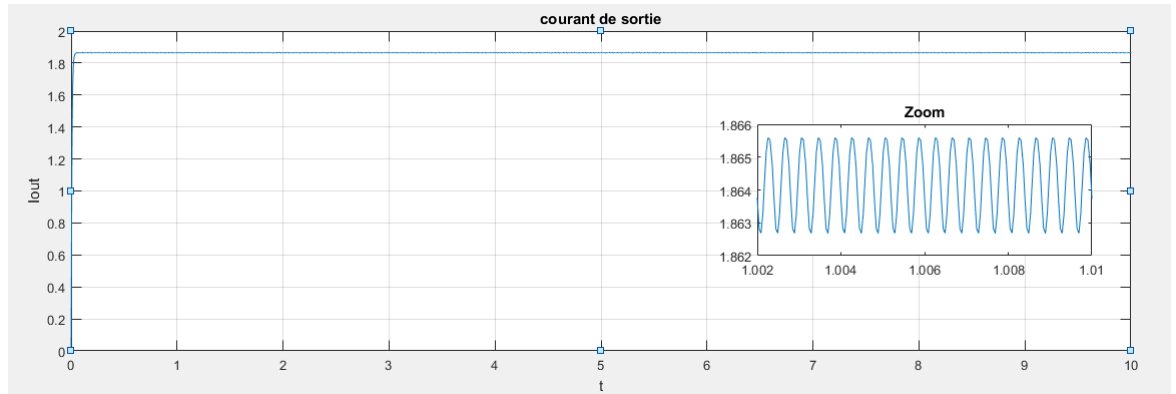


FIGURE 2.8 – *Courant de sortie de convertisseur buck*

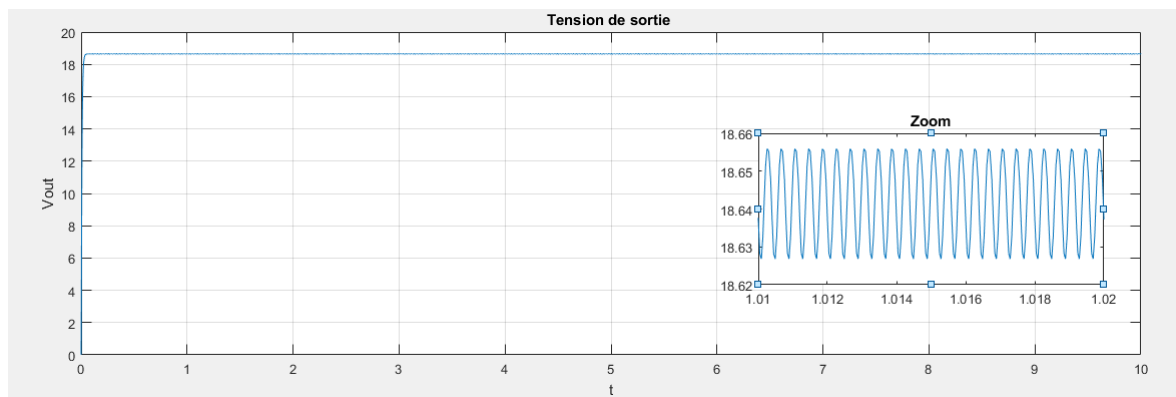


FIGURE 2.9 – *Tension de sortie convertisseur buck*

2.3.3 Convertisseurs survolteur (Boost Converter)

Un convertisseur Boost, également appelé hacheur parallèle, est un type de convertisseur continu-continu qui convertit une tension continue basse en une tension continue plus élevée. Le convertisseur Boost est composé d'un interrupteur (S), d'une inductance (L), d'une diode qui protège S en empêchant le courant inverse, et d'un condensateur (C) qui lisse la tension de sortie. Ce type de convertisseur peut être utilisé comme adaptateur source-charge lorsque le point de fonctionnement en couplage direct est à droite du point de puissance maximale (MPP).

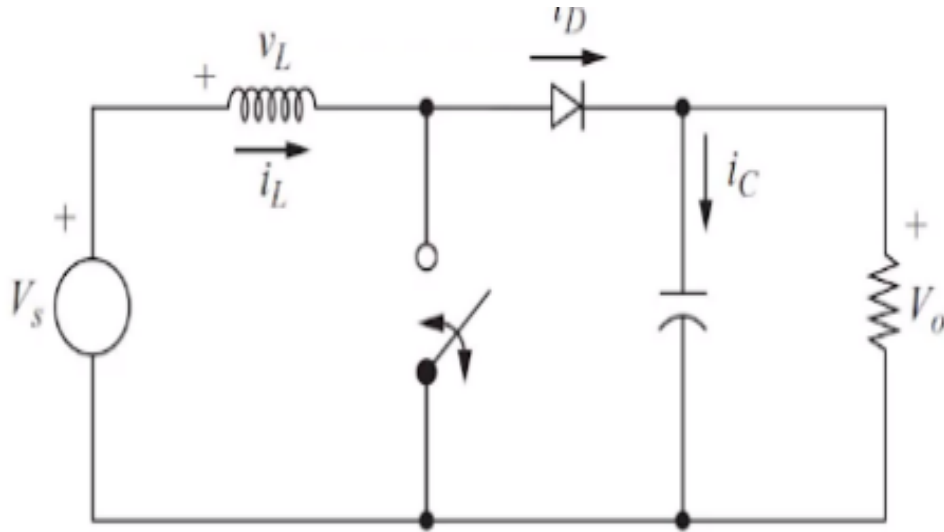


FIGURE 2.10 – Schéma du circuit électrique d'un convertisseur Boost

Principe de fonctionnement :

Le fonctionnement d'un convertisseur Boost se décompose en deux phases distinctes selon l'état de l'interrupteur S :

- Une phase d'accumulation d'énergie : lorsque l'interrupteur S est fermé, le courant dans l'inductance augmente, stockant ainsi une quantité d'énergie sous forme d'énergie magnétique. Pendant cette phase, la diode D est bloquée et la charge est déconnectée de l'alimentation.

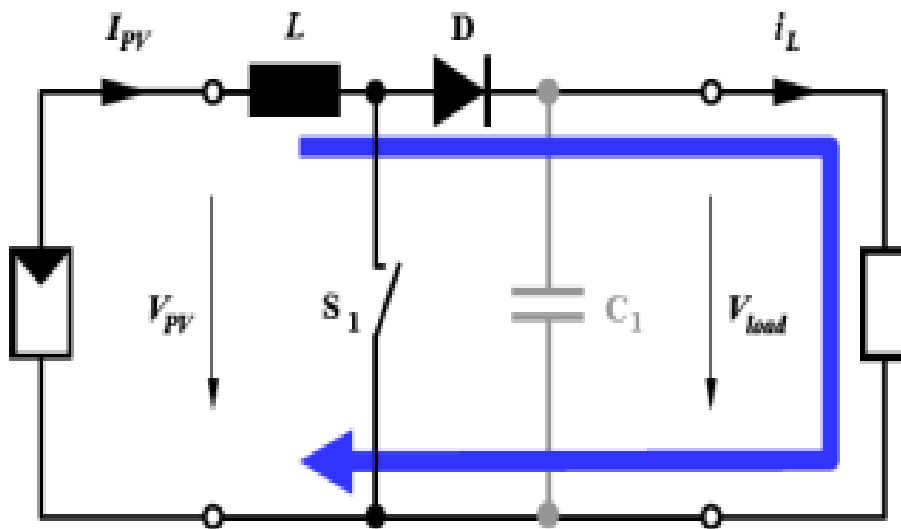


FIGURE 2.11 – Le fonctionnement du convertisseur Boost pendant l'état OFF. [9]

- Une phase de transfert d'énergie : lorsque l'interrupteur S est ouvert, l'inductance se trouve en série avec le générateur et sa f.é.m. s'additionne à celle du générateur, ce qui augmente la tension à travers la diode D. Le courant traversant l'inductance est alors trans-

férent à la charge via la diode D, le condensateur C et la résistance R, permettant ainsi le transfert de l'énergie accumulée dans l'inductance vers la charge.

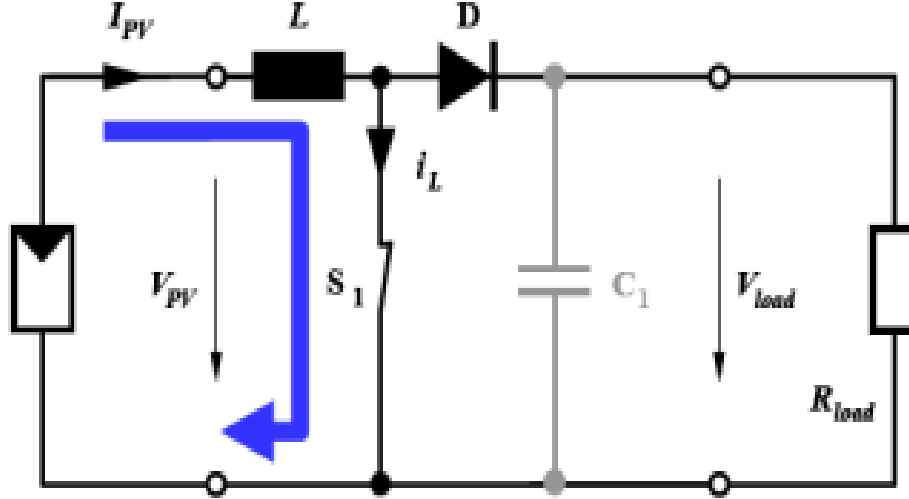


FIGURE 2.12 – Le fonctionnement du convertisseur Boost pendant l'état ON. [9]

Modélisation le circuit :

$$E = \frac{1}{2} L I_L^2 \quad (2.19)$$

$$\Delta I_{L_{on}} + \Delta I_{L_{off}} = 0 \quad (2.20)$$

$$\Delta I_{L_{on}} + \Delta I_{L_{aff}} = \frac{V_S D T}{L} + \frac{(V_S - V_O)(1 - D)T}{L} = 0 \quad (2.21)$$

$$R = \frac{V_C}{I_O} \quad (2.22)$$

Représentation d'état :

Dans le cas où le système considéré est linéaire, la représentation d'état se met sous la forme :

$$\begin{cases} \dot{X} = A_2 x + B_2 u \\ Y = C_2 X \end{cases} \quad (2.23)$$

avec :

$$X = \begin{bmatrix} I_0 \\ V_0 \end{bmatrix} \quad (2.24)$$

Pour étudier le convertisseur élévateur et extraire son modèle mathématique, on analyse le fonctionnement du circuit équivalent pour S ouvert et fermé.

— Pour $T = [0DT_s]$, S est fermé

$$\begin{cases} i_{C1}(t) = C_1 \frac{dV_L(t)}{dt} = i(t) - i_L(t) \\ i_{C2}(t) = C_2 \frac{dV_O(t)}{dt} = -i_O(t) \\ V_L(t) = L \frac{di_L(t)}{dt} = V_S(t) \end{cases} \quad (2.25)$$

Et

$$\begin{cases} V_O - L \frac{di_O}{dt} - Ri_O = 0 \\ \dot{V}_C = \frac{1}{C} \times \frac{V_C}{R} \end{cases} \quad (2.26)$$

Danc

$$\begin{bmatrix} \dot{X}_1 \\ \dot{X}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{R}{L} & 0 \\ 0 & \frac{1}{RC} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L} \\ 0 \end{bmatrix} V_0 \quad (2.27)$$

— Pour $T = [DT_s, T_s]$ est ouvert

$$\begin{cases} i_{C1}(t) = C_1 \frac{dV_S(t)}{dt} = i(t) - i_L(t) \\ i_{C2}(t) = C_2 \frac{dV_O(t)}{dt} = i_L(t) - i_O(t) \\ V_L(t) = L \frac{di_L(t)}{dt} = V_S(t) - V_O(t) \end{cases}$$

Danc

$$\begin{cases} V_O - L \frac{di_O}{dt} - Ri_O - V_C = 0 \\ C \frac{dV_C}{dt} = I_O - \frac{V_C}{R} \end{cases}$$

$$\begin{bmatrix} \dot{X}_1 \\ \dot{X}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{R}{L} & 0 \\ 0 & \frac{1}{RC} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L} \\ 0 \end{bmatrix} V_0$$

Donc le système sous forme matricielle devient :

$$\begin{cases} \dot{X} = (A_1 X + B V_0) D + (A_2 X + B V_0) (1 - D) \\ V_O = C_1 D + C_2 (1 - D) X \end{cases}$$

Et

$$\begin{cases} \dot{X}_1 = \frac{1-D}{L} X_2 + \frac{1}{L} V_0 \\ \dot{X}_2 = \frac{1-D}{L} X_1 - \frac{1}{RC} X_2 \end{cases}$$

Alors : le module global

$$\begin{bmatrix} \dot{X}_1 \\ \dot{X}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{1-D}{L} \\ \frac{1-D}{L} & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L} \\ 0 \end{bmatrix} V_0$$

A partir des équations, on peut écrire l'équation suivante :

$$(V_S) DT_S = (V_O - V_S) \times (1 - D) \times T_S \quad (2.28)$$

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

$$M(D) = \frac{V_o}{V_s} = \frac{1}{1 - D} \quad (2.29)$$

le rapport cyclique de commutation D :

$$D = 1 - \frac{V_S}{V_O} \quad (2.30)$$

Dimensionnement des Eléments du Convertisseur BOOST :

Nous allons faire le dimensionnement des éléments du convertisseur Boost en mode de conduction continu ayant les caractéristiques définies par le cahier des charges suivant :

- Tension d'entrée : $V_s = 12V$
- Tension de sortie : $V_0 = 25.5V$
- Fréquence de découpage : $f = 40KHz$
- Courant de sortie : $I_0 = 8.5A$

D'après le cahier des charges , nous allons calculer les paramètres suivants :

- Rapport cyclique D :

$$D = 1 - \frac{V_s}{V_0} = 1 - \frac{12}{25.5} = 0.5 \quad (2.31)$$

- La résistance de charge :

$$R = \frac{V_0}{I_0} = \frac{25.5}{8.5} = 3\Omega \quad (2.32)$$

- La période de fonctionnement :

$$T = \frac{1}{f} = \frac{1}{40 \times 10^3} = 25\mu s \quad (2.33)$$

- Les temps de conduction t_{on} :

$$t_{on} = DT = 0.5 \times 25 \times 10^{-6} = 12.5\mu s \quad (2.34)$$

- La valeur min de l'inductance :

$$L_{min} = \frac{D(1-D)^2 R}{2.F} = \frac{0.5(1-0.5) \times 10}{2 \times 40 \times 10^3} = 15.625\mu H \quad (2.35)$$

- La valeur du 25% pour min inductance :

$$L = 0.25L_{min} = (0.25) (15.625 \times 10^{-6}) = 3.91\mu H \quad (2.36)$$

- Calcule min de capacité :

$$C = \frac{D}{R_{1f}} = \frac{0.5}{(10)(0.05)(40000)} = 25\mu F \quad (2.37)$$

2.3.4 Simulation d'un convertisseur boost

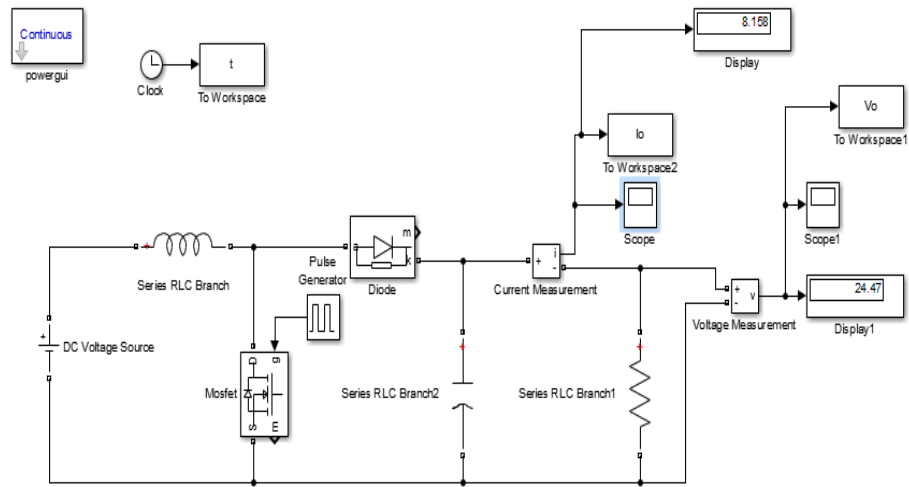


FIGURE 2.13 – Circuit de convertisseur BOOST sur SimPowerSystem

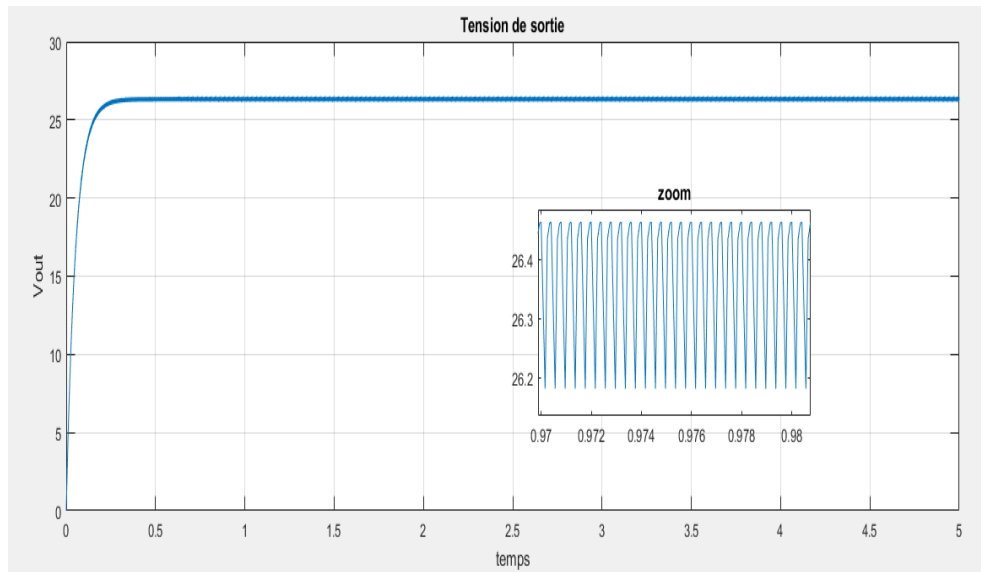


FIGURE 2.14 – tension de Sortie Boost.

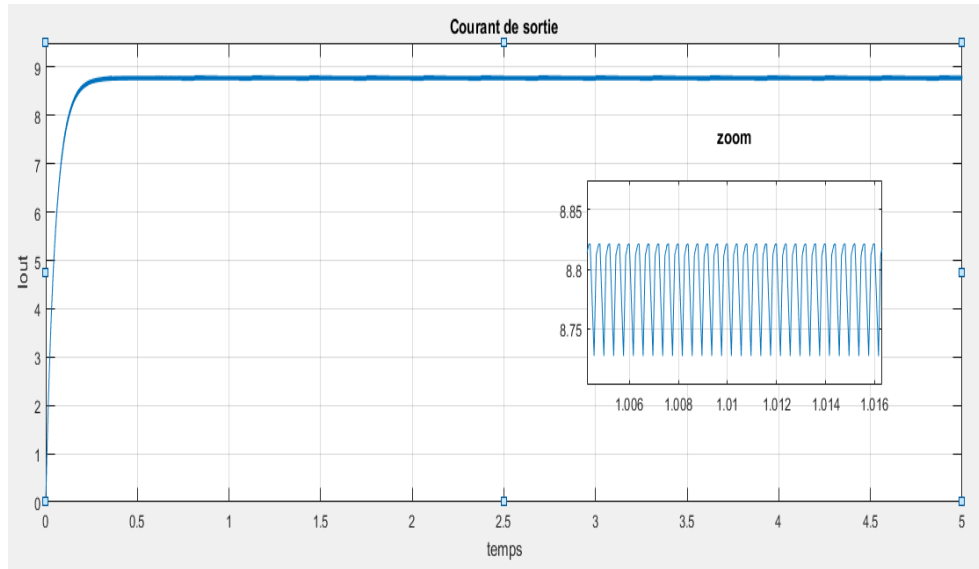


FIGURE 2.15 – Courant de Sortie Boost

2.3.5 Convertisseur BUCK-BOOST

Le convertisseur buck-boost est un type de convertisseur de mode commuté qui permet de convertir une tension continue d'entrée en une tension de sortie de valeur souhaitée, qui peut être supérieure ou inférieure à la tension d'entrée. Le fonctionnement de ce circuit est basé sur les mêmes principes que les convertisseurs précédents, avec l'utilisation d'un interrupteur, d'une inductance, d'une diode et d'un condensateur.

Lorsque l'interrupteur est fermé, l'inductance stocke de l'énergie sous forme d'énergie magnétique et la diode est bloquée. Lorsque l'interrupteur est ouvert, l'inductance libère de l'énergie sous forme d'énergie électrique, et la diode devient passante pour permettre le transfert d'énergie vers le condensateur et la charge.

Le convertisseur buck-boost combine les propriétés des convertisseurs précédents pour offrir une plus grande flexibilité dans la conversion de la tension d'entrée en une tension de sortie de valeur souhaitée.

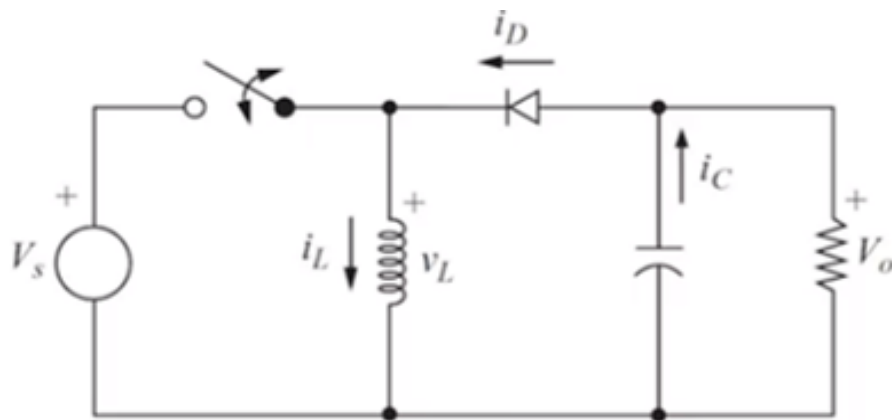


FIGURE 2.16 – Circuit équivalent du convertisseur Buck-Boost

Principe de fonctionnement

Le fonctionnement d'un convertisseur Buck-Boost peut être divisé en deux états distincts en fonction de l'état de l'interrupteur S :

- Dans l'état passant, l'interrupteur S est fermé, ce qui entraîne une augmentation de l'énergie stockée dans l'inductance.
- Dans l'état bloqué, l'interrupteur S est ouvert et l'inductance est connectée à la charge et au condensateur. Cela permet le transfert de l'énergie stockée dans l'inductance vers la charge et le condensateur. Les principales différences par rapport aux convertisseurs Buck et Boost sont que la tension de sortie est de polarité inverse à celle de l'entrée et que la tension de sortie peut varier de 0 à l'entrée (pour un convertisseur idéal).

Modélisation le circuit

$$\Delta I_{L_{On}} = \int_0^{DT} dI_L = \int_0^{DT} \frac{V_S}{L} dt = \frac{V_S DT}{L} \quad (2.38)$$

$$\frac{dI_L}{dt} = \frac{V_i}{L} \quad (2.39)$$

Représentation d'état :

Dans le cas où le système considéré est linéaire, la représentation d'état se met sous la forme :

$$\begin{cases} \dot{X} = A_3 x + B_3 u \\ Y = C_3 X \end{cases}$$

avec : $X = \begin{bmatrix} I_O \\ V_O \end{bmatrix}$

Pour étudier le convertisseur abaisseur-élevateur et extraire son modèle mathématique, on analyse le fonctionnement du circuit équivalent pour S ouvert et fermé.

- Pour $T = [0, DT_s]$, S est fermé

$$\begin{cases} i_{C1} = C_1 \frac{dV_S(t)}{dt} = i(t) - i_L(t) \\ i_{C2} = C_2 \frac{dV_O(t)}{dt} = -i_O(t) \\ V_L(t) = L \frac{di_L(t)}{dt} = V_S(t) \end{cases}$$

$$\begin{cases} L \frac{di_O}{dt} = DV_O + V_C(1 - D) \\ C \frac{dV_C}{dt} = -i_L(1 - D) - \frac{V_C}{R} \end{cases}$$

$$\begin{cases} L \frac{di_O}{dt} = DV_O \\ C \frac{dV_C}{dt} = -\frac{V_C}{R} \end{cases}$$

- Pour $T = [DT_s, T_s]$ est ouvert

$$\begin{cases} i_{C1}(t) = C_1 \frac{dV_S(t)}{dt} = i(t) \\ i_{C2}(t) = C_2 \frac{dV_O}{dt} = i_L(t) - i_o(t) \\ V_L(t) = L \frac{di_L(t)}{dt} = V_o(t) \\ \begin{cases} L \frac{di_O}{dt} = V_C \\ C \frac{dV_C}{dt} = -i_L - \frac{V_C}{R} \end{cases} \end{cases}$$

Donc le système sous forme matricielle devient :

$$\begin{bmatrix} \dot{X}_1 \\ \dot{X}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{1-D}{T} \\ \frac{1-D}{C} & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{D}{L} \\ 0 \end{bmatrix} V_0$$

A partir des équations, on peut écrire l'équation suivante :

$$V_S \times DT_S = V_o \times (1 - D) \times T_S \quad (2.40)$$

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

$$M(D) = \frac{V_o}{V_S} = \left(\frac{-D}{1-D} \right) \quad (2.41)$$

Cela donne en retour que :

$$D = \frac{V_o}{V_o - V_i} \quad (2.42)$$

Dimensionnement des Eléments du Convertisseur BUCK-BOOST :

Nous allons faire le dimensionnement des éléments du convertisseur Buck-Boost en mode de conduction continu ayant les caractéristiques définies par le cahier des charges suivant :

- Tension d'entrée : $V_s = 18V$
- Tension de sortie : $V_0 = |-12|V$
- Fréquence de découpage : $f = 40KHz$
- Courant de sortie : $I_0 = |-12|A$

D'après le cahier des charges, nous allons calculer les paramètres suivants :

- Rapport cyclique D :

$$D = \frac{V_o}{V_o + V_s} = \frac{|-12|}{|-12| + 18} = 0.4 \quad (2.43)$$

- La période de fonctionnement :

$$T = \frac{1}{f} = \frac{1}{40 \times 10^3} = 25\mu \quad (2.44)$$

— Les temps de conduction t_{on} :

$$t_{on} = DT = 0.5 \times 25 \times 10^{-6} = 12.5/8 \quad (2.45)$$

— La résistance de charge :

$$R = \frac{Y_o}{|I_o|} = \frac{|-12|}{|-12|} = 10\Omega \quad (2.46)$$

— La valeur min de l'inductance :

$$L_{\min} = \frac{R(1-D)^2}{2F} = \frac{10 \times (1-0.4)^2}{2 \times 40 \times 10^5} = 45\mu H \quad (2.47)$$

— La valeur du 25% pour min inductance :

$$L = 0.25L_{\min} = (0.25) (45 \times 10^{-6}) = 11.25\mu H \quad (2.48)$$

— La valeur du courant de l'inductance :

$$I_L = \frac{V_S D}{R(1-D)^2} = \frac{18 \times 0.4}{10(1-0.4)^2} = 2 \text{ A} \quad (2.49)$$

— Calcule taux de variation du courant d'inductance :

$$\Delta I_L = \frac{V_d DT}{L} = \frac{12 \times 0.4 \times 25 \times 10^{-6}}{45 \times 10^{-6}} = 2.67 \text{ A} \quad (2.50)$$

— Calcule min de courant d'inductance :

$$I_{L2+} = I_L - \frac{\Delta I_L}{2} = 2 - \frac{2.67}{2} = 0.67 \text{ A} \quad (2.51)$$

— Calcule min de capacité :

$$C = \frac{D}{R f} = \frac{0.4}{(10)(0.01)(40000)} = 100, \mu F \quad (2.52)$$

2.3.6 Simulation d'un convertisseur Buck-Boost

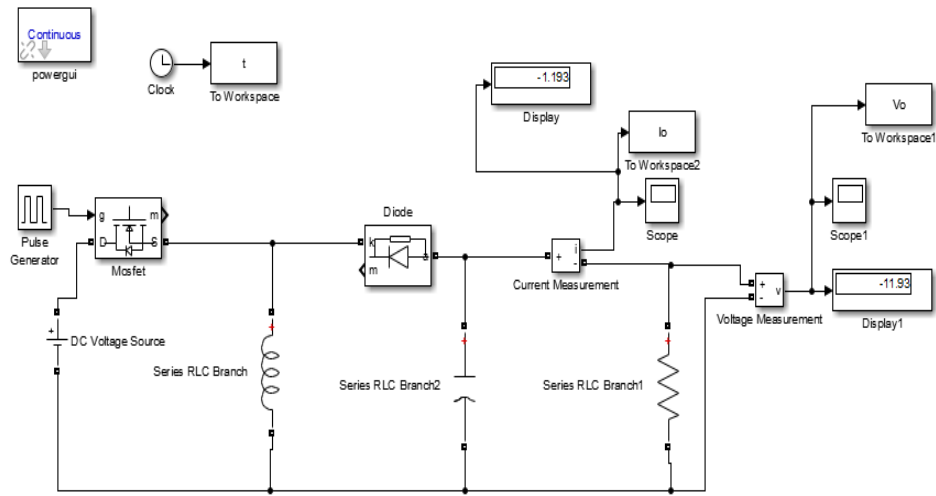


FIGURE 2.17 – Circuit de convertisseur BUCK-BOOST sur SimPowerSystem

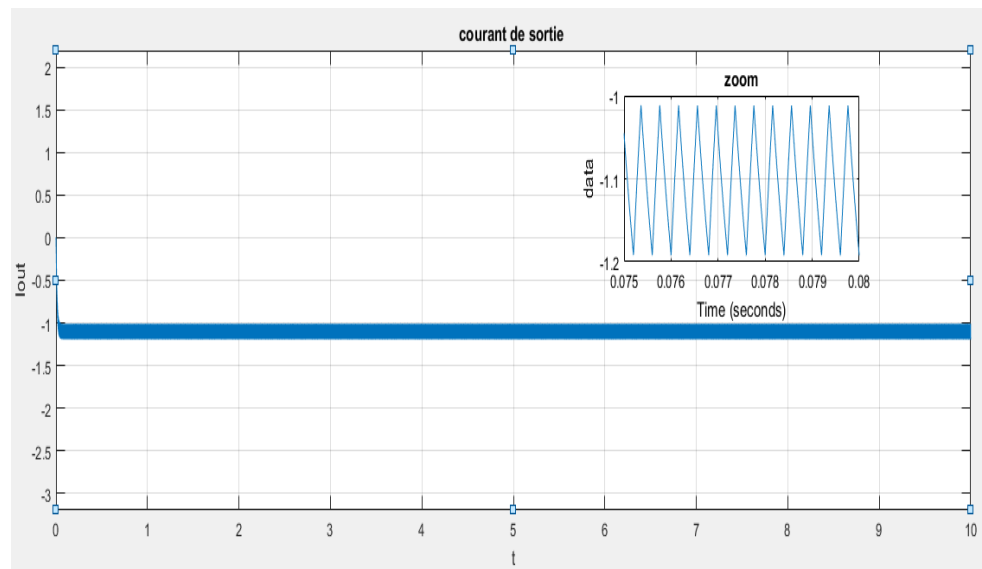
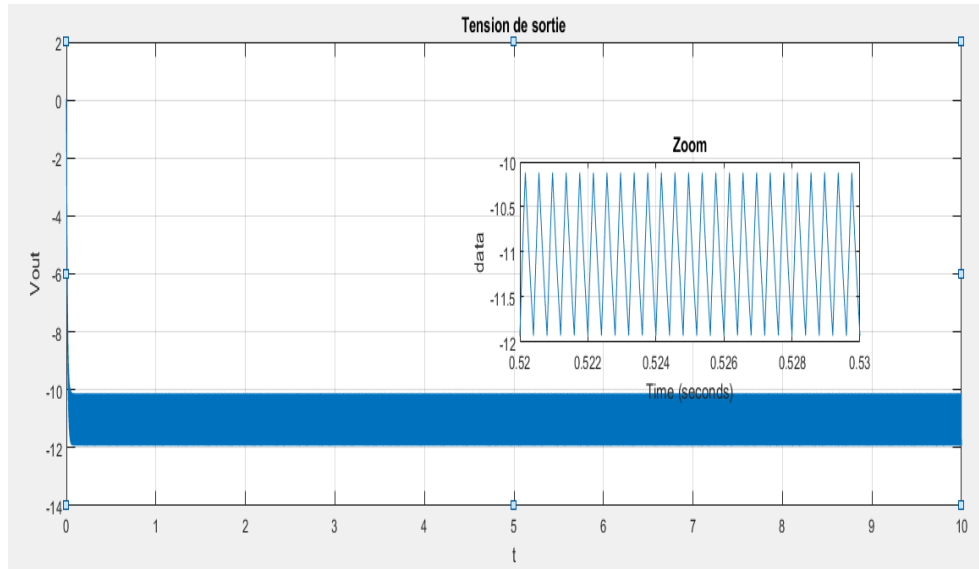


FIGURE 2.18 – Courant de Sortie Buck-Boost

FIGURE 2.19 – : *tension de Sortie Buck-Boost*

2.4 CONCLUSION

Ce chapitre a porté sur la modélisation des convertisseurs DC-DC tels que le Buck, le Boost et le Buck-Boost, ainsi que leur principe de fonctionnement. Nous avons également analysé comment utiliser ces convertisseurs en tant qu'interface entre la charge et le générateur photovoltaïque afin d'optimiser leur rendement. Nous avons étudié le régime établi pour établir les fonctions de transfert statiques des convertisseurs et comprendre leur relation d'entrée-sortie. Enfin, nous avons présenté les modèles des convertisseurs DC-DC dans l'environnement Matlab/Simulink.

LA COMMANDE MPPT

3

3.1 INTRODUCTION

Il existe des techniques de contrôle spécifiques qui permettent de faire fonctionner les dispositifs à leurs points de caractéristiques maximums, même si ces points ne sont pas connus à l'avance ou s'ils changent sans raison apparente. Pour les sources d'énergie, cela se traduit par la recherche de points de puissance maximum, également appelée « Recherche du Point de Puissance Maximum » (MPPT). Le MPPT est une commande qui utilise un algorithme adaptatif pour suivre les variations du niveau d'ensoleillement et de la température des cellules, afin de trouver en temps réel le point de puissance maximale du GPV [17]. Grâce à cette technique, il est possible d'optimiser la production d'énergie d'un GPV sans connaître à l'avance les conditions de fonctionnement optimales.

3.2 PRINCIPE DE LA COMMANDE MPPT

Un système de commande MPPT associé à un étage intermédiaire d'adaptation est conçu pour assurer une production maximale d'énergie solaire en ajustant constamment les paramètres du générateur photovoltaïque en fonction des conditions météorologiques, telles que la température et l'irradiation. Grâce à cette commande, le convertisseur statique (CS) peut placer le système au point de fonctionnement optimal, à savoir le point de puissance maximale (V_{PPM} et I_{PPM}), ce qui permet d'optimiser la chaîne de conversion photovoltaïque. Il est possible de représenter le système de commande MPPT associé à un étage intermédiaire d'adaptation par le schéma illustré dans la Figure (3.1)

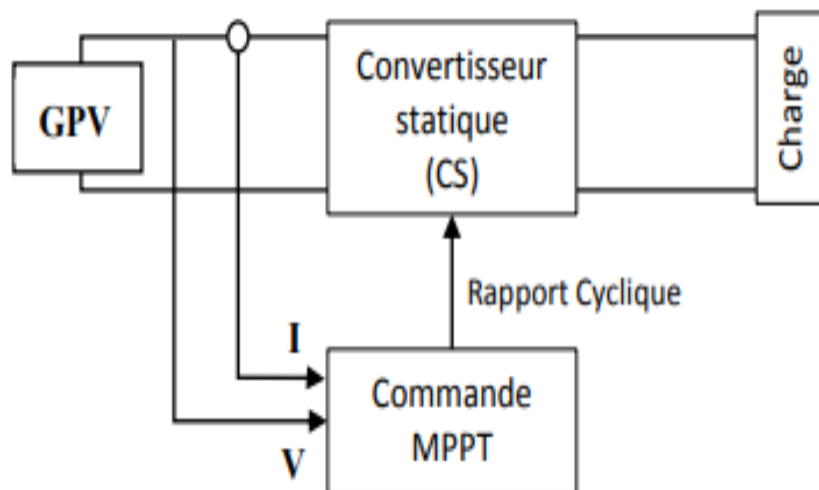


FIGURE 3.1 – Schéma de principe du convertisseur MPPT [3]

La commande MPPT consiste à ajuster le rapport cyclique du convertisseur statique (CS) à l'aide d'un signal électrique approprié pour maximiser la puissance produite par le GPV. La méthode utilisée par l'algorithme

MPPT pour trouver le point de puissance maximum peut varier en complexité. En général, elle implique de faire varier le rapport cyclique du CS en fonction des changements des paramètres d'entrée tels que l'intensité et la tension du GPV afin de se placer sur le point de puissance maximale (MPP) [21] comme indiqué sur la figure (3.2)

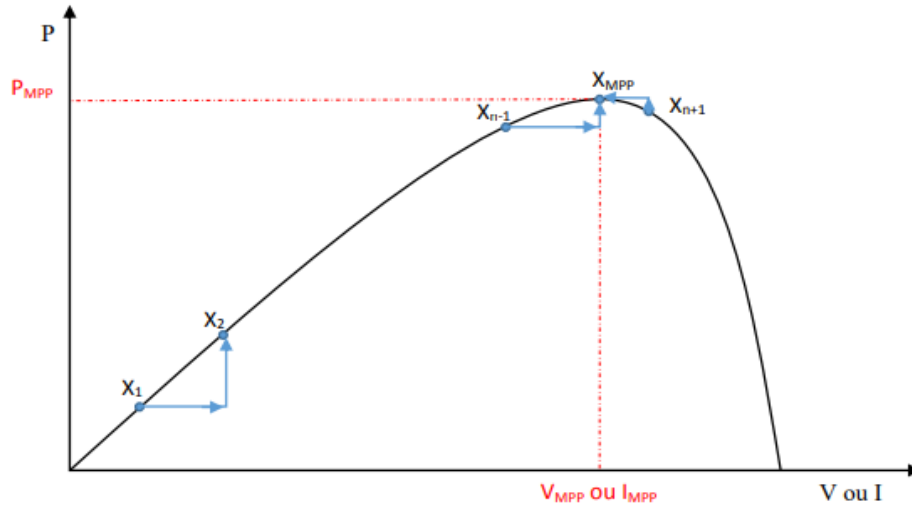


FIGURE 3.2 – Principe de la commande MPPT [22]

3.3 CLASSIFICATION DES COMMANDES MPPT

En général, les commandes MPPT peuvent être classées en fonction du type de recherche qu'elles effectuent et des paramètres d'entrée qu'elles utilisent. Cependant, il est également possible de les classer en fonction du type d'implémentation électronique utilisé, qui peut être analogique, numérique ou mixte. [23]

3.3.1 Classification Des Commandes MPPT Selon Le Type De Recherche

MPPT indirecte :

Les commandes MPPT indirectes exploitent la relation entre les variables mesurées telles que l'intensité de court-circuit (I_{sc}) ou la tension en circuit ouvert (V_{oc}) qui peuvent être facilement mesurées pour estimer la position approximative du point de puissance maximale (MPP). Elles peuvent également être basées sur une estimation du point de fonctionnement du GPV à partir d'un modèle paramétrique préétabli. D'autres commandes suivent la tension optimale en fonction de la température des cellules, détectée par un capteur. Les commandes indirectes sont simples à mettre en œuvre et conviennent aux systèmes peu coûteux et peu précis destinés à fonctionner dans des zones géographiques où il y a peu de changements climatiques. [24,25]

MPPT directe :

Les commandes MPPT directes sont plus précises et plus réactives que les commandes MPPT indirectes. Elles permettent de déterminer le point de fonctionnement optimal du GPV à partir de mesures de courant, tension ou puissance, ce qui leur permet de réagir rapidement aux changements imprévus de fonctionnement du GPV.

Les algorithmes de recherche utilisés dans les commandes MPPT directes sont basés sur l'incrément de la tension du point de fonctionnement dans des intervalles réguliers. Si la puissance de sortie est plus grande, alors la direction de recherche est maintenue pour l'étape suivante, sinon elle sera inversée. Cette méthode est susceptible d'introduire des erreurs d'interprétation, notamment en cas de mauvaise direction de recherche.

D'autres algorithmes de commande MPPT directe se basent sur l'introduction de variations sinusoïdales en petit signal sur la fréquence de découpage du convertisseur pour comparer la composante alternative et la composante continue de la tension du GPV et ainsi placer le point de fonctionnement du GPV le plus près possible du MPP. Ces algorithmes sont plus précis et plus rapides que ceux basés sur l'incrément de la tension du point de fonctionnement. [24]

3.3.2 Classification Des Commandes MPPT Selon Les Paramètres D'entrée

Commandes MPPT fonctionnant à partir des paramètres d'entrée du CS

Effectivement, il existe plusieurs types de commandes MPPT qui se basent sur différents paramètres pour rechercher le MPP. La méthode Perturb&Observe et l'algorithme d'incrément de conductance sont des exemples de commandes qui utilisent la puissance fournie par le GPV pour ajuster le point de fonctionnement. D'autres commandes, comme celles basées sur les relations de proportionnalité entre les paramètres optimaux (VOPT et IOPT) et les paramètres caractéristiques du module PV (V_{oc} et I_{CC}), peuvent également être utilisées. En outre, il existe des commandes basées sur des réseaux de neurones qui peuvent stocker tous les cas possibles pour une recherche précise du MPP. Toutes ces commandes ont pour avantage leur précision et leur rapidité de réaction. [25]

Commandes MPPT fonctionnant à partir des paramètres de sortie du convertisseur

Dans la littérature, on peut trouver des algorithmes MPPT basés sur les paramètres de sortie des convertisseurs de puissance. Par exemple, les commandes MPPT qui maximisent le courant de sortie sont principalement utilisées lorsque la charge est une batterie. Dans ces systèmes, une approximation de la puissance maximale est faite à travers le rendement du convertisseur. Cette approximation devient plus valable lorsque l'étage de conversion est de meilleure qualité. Cependant, en général, tous les systèmes avec un seul capteur sont intrinsèquement imprécis. La plupart de ces systèmes ont été initialement conçus pour une utilisation spatiale [25]

3.4 LES ALGORITHMES MPPT

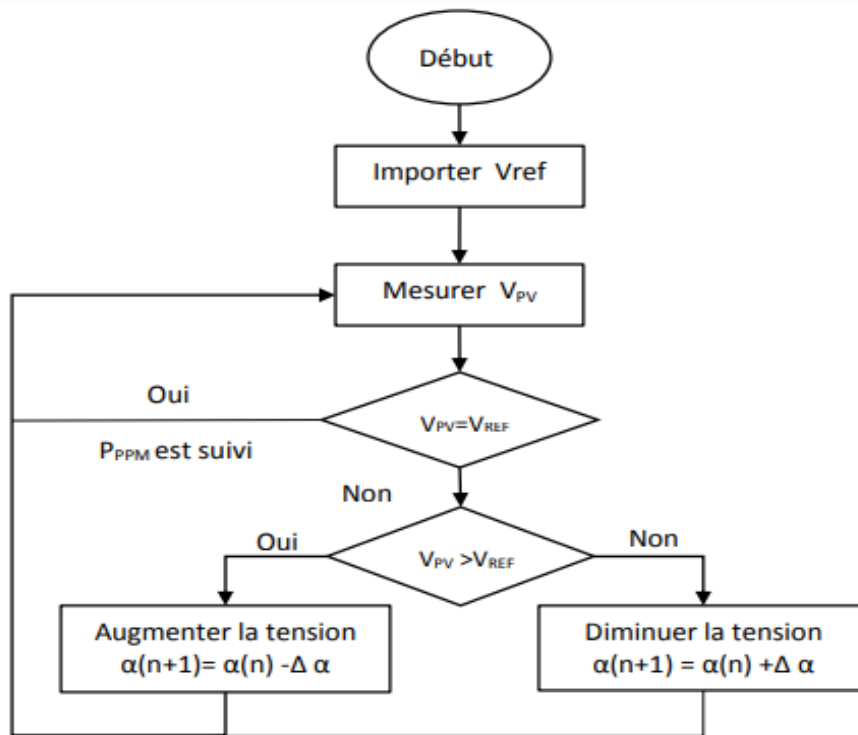
Il existe plusieurs principes de fonctionnement des commandes MPPT, chacun avec ses avantages et ses inconvénients. Certaines commandes sont simples et peu coûteuses à mettre en œuvre, mais elles peuvent manquer de précision dans des conditions de changement rapide des paramètres du GPV. D'autres commandes sont plus sophistiquées et peuvent offrir une meilleure précision et une plus grande rapidité de réponse, mais elles peuvent être plus complexes à mettre en œuvre et plus coûteuses. En somme, il est important de bien comprendre les différents modes de recherche du PPM pour choisir la commande MPPT la plus appropriée pour une application donnée.

3.4.1 Approche de la Tension Constante (CV, Constant Voltage)

La méthode de tension constante (ou méthode de circuit ouvert) est une méthode de commande MPPT basée sur la mesure en temps réel de la tension de circuit ouvert V_{OC} du panneau solaire. La relation linéaire approximative entre la tension de circuit ouvert V_{OC} et la tension de point maximal V_{MPP} du GPV est donnée par :

$$V_{MPP} = K_1 * V_{OC} \quad (3.1)$$

Où k_1 est une constante de proportionnalité. Une fois que la constante de proportionnalité k_1 est déterminée, le V_{MPP} peut être calculé à l'aide de l'expression (3.1) avec V_{OC} mesurée périodiquement en ouvrant momentanément le convertisseur de puissance (circuit ouvert). La tension V_{MPP} est alors prise comme tension de référence pour comparer avec la tension réelle V_{PV} du panneau solaire. Le signal d'erreur est ensuite traité pour rendre $V = V_{ref}$ [26,27]

FIGURE 3.3 – *Algorithme de la Tension Constante*

Effectivement, la méthode de tension constante présente des avantages, mais aussi des limites. Comme vous l'avez mentionné, la tension de puissance maximale du GPV dépend de l'ensoleillement et de la température, ce qui peut entraîner des déviations par rapport à la tension de référence calculée à l'aide de la méthode de circuit ouvert. De plus, la tension de puissance maximale n'est pas toujours comprise entre 71% et 78% de la tension de circuit ouvert, ce qui peut également entraîner des erreurs dans le calcul de la tension de référence. [28]

Un autre inconvénient de cette méthode est la perte de puissance qui se produit lorsque le convertisseur de puissance est momentanément ouvert pour mesurer la tension de circuit ouvert. En effet, pendant ce temps, la charge du GPV est déconnectée, ce qui peut entraîner une perte de puissance disponible. [26]

En résumé, bien que la méthode de tension constante soit rapide et présente une absence de variations en état stationnaire, elle doit être utilisée avec précaution et corriger la tension de référence pour différents ensoleillements et températures, tout en prenant en compte la perte de puissance lors de la déconnexion de la charge du GPV.

3.4.2 Approche Du Courant Constant (Constant Current)

La méthode du Courant constant est basée sur la mesure en temps réel du courant de court-circuit I_{sac} et la relation linéaire approximative (3.2) liant cette courant avec le courant de point maximal I_{MPP} du GPV.

Comme pour la méthode de Tension constante, une constante de proportionnalité k_2 doit être déterminée pour le GPV utilisé, Cette mé-

thode nécessite un commutateur ajouté au convertisseur de puissance pour court-circuiter le panneau et mesurer le courant I_{SC} à l'aide d'un capteur de courant. Ensuite, pour une valeur constante de courant, la puissance est calculée pour des tensions différentes. Si la différence entre la puissance calculée et la puissance de crête est supérieure à la valeur de tolérance, alors la valeur de la tension est soit incrémentée ou décrémentée en fonction de la puissance obtenue. Ce processus est répété jusqu'à ce que la différence se situe dans la plage de tolérance. La méthode du Courant constant est moins sensible à la variation de la tension de panneau due à l'ensoleillement et la température, mais elle est plus complexe à mettre en œuvre en raison de la nécessité de mesurer le courant I_{SC} en temps réel. [29]

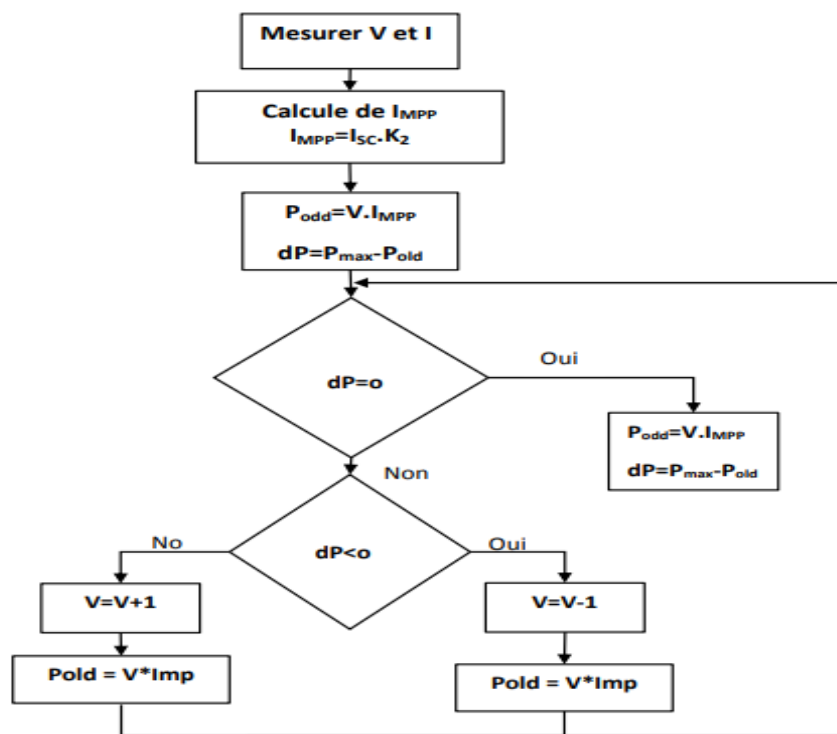


FIGURE 3.4 – Algorithme du constant courant

3.4.3 Perturbation Et Observation (P&O, Perturb And Observe)

La méthode P&O (Perturb and Observe) est une méthode de poursuite du point de puissance maximale qui consiste à perturber la tension de référence V_{ref} ou le courant de référence I_{ref} d'une quantité donnée, puis à observer la variation de la puissance de sortie du panneau photovoltaïque. Si la puissance augmente, la perturbation est effectuée dans la même direction, sinon elle est effectuée dans la direction opposée. Cette méthode est simple et facile à mettre en œuvre, mais elle peut être sujette à des oscillations et peut ne pas être aussi efficace que d'autres méthodes plus avancées. [30]

Effectivement, la méthode P&O peut être sensible aux fluctuations de la luminosité et de la température, ce qui peut entraîner des oscillations

autour du point de puissance maximale. Pour minimiser ces oscillations, il est possible d'ajouter une boucle de rétroaction pour ajuster la fréquence de perturbation en fonction de la vitesse de réponse du système. Cependant, comme vous l'avez mentionné, la tension du GPV est souvent préférée pour le contrôle du point de puissance maximale car elle varie moins avec les changements climatiques que le courant. De plus, la tension est plus facile à mesurer et à réguler que le courant. [31]

Le principe de la méthode P&O est de provoquer une perturbation de faible valeur sur la tension $V - PV$ afin de déterminer si le point de fonctionnement est à gauche ou à droite du PPM [32]. Si l'augmentation de la tension $V - PV$ entraîne une augmentation de la puissance $P - pv$, cela signifie que le point de fonctionnement se trouve à gauche du PPM. Dans ce cas, la commande doit être configurée pour continuer à augmenter la tension jusqu'à atteindre le PPM. Si la puissance diminue, cela signifie que le point de fonctionnement a dépassé le PPM et la commande doit être configurée pour diminuer la tension afin de se rapprocher du PPM. Un raisonnement similaire peut être appliqué en cas de diminution de la tension V_{PV} . Le contrôleur P&O va donc perturber la tension V_{PV} de manière répétitive pour trouver le point de puissance maximale et le maintenir malgré les variations des conditions de fonctionnement.

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

TABLE 3.1 – 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 (+)

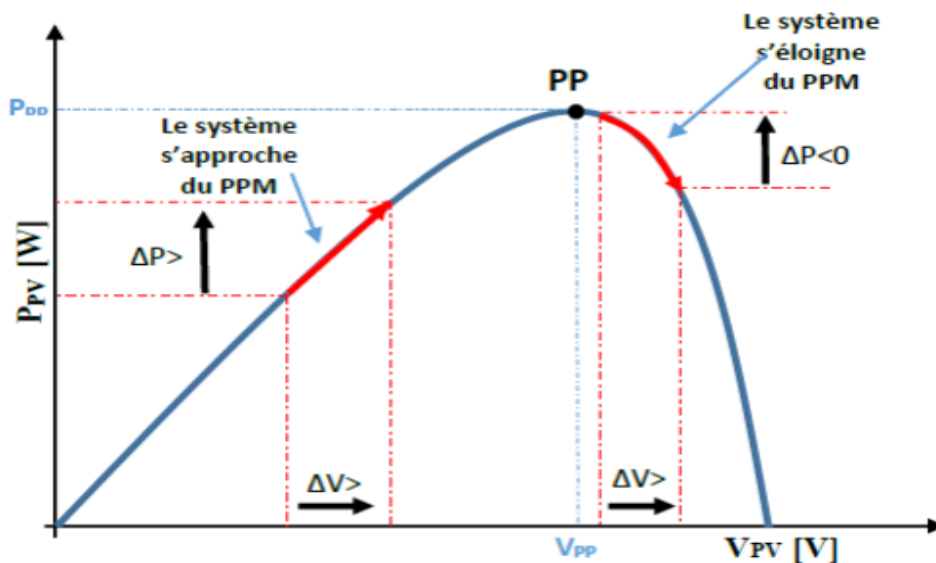


FIGURE 3.5 – Recherche du PPM par la méthode (P&O) [22]

Pour la mise en œuvre de la méthode P&O, il est nécessaire de mesurer à la fois le courant et la tension du générateur photovoltaïque afin de déterminer la puissance à chaque instant. Il est possible d'utiliser des capteurs de courant et de tension pour cela.

Par ailleurs, l'utilisation d'un microprocesseur est recommandée pour la réalisation de cette méthode de commande, car cela permet une plus grande flexibilité et une meilleure précision dans la régulation du système. Les circuits analogiques peuvent également être utilisés, mais ils sont généralement moins flexibles et moins précis que les systèmes numériques. [29]

La Figure 3.6 représente l'algorithme classique d'une commande MPPT de type P&O, où l'évolution de la puissance est analysée après chaque perturbation de tension.

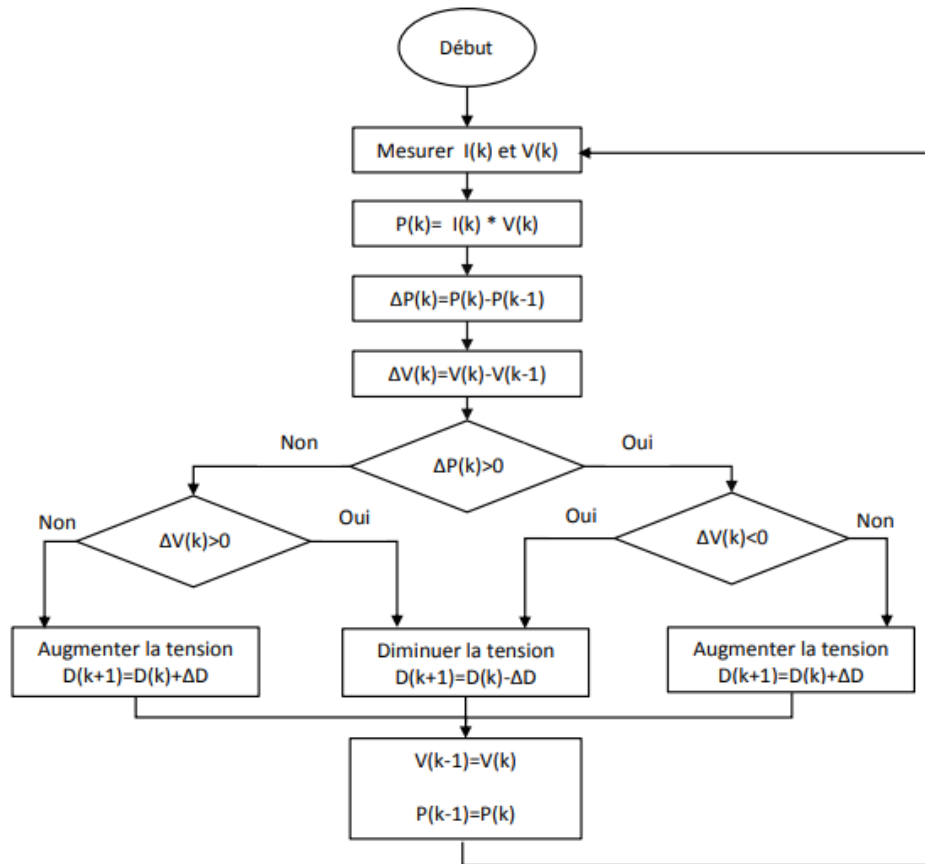


FIGURE 3.6 – l'algorithme de P&O classique

La méthode P&O est largement utilisée pour sa simplicité d'implémentation, mais elle présente quelques problèmes. En régime établi, cette méthode engendre des oscillations autour du point de puissance maximale (PPM), car la recherche du PPM doit être répétée périodiquement, obligeant le système à osciller en permanence autour du PPM une fois atteint [33]. Ces oscillations dépendent de la largeur du pas de la perturbation [34] : une largeur de pas importante permet à l'algorithme du MPPT de répondre rapidement aux changements soudains des conditions de fonc-

tionnement, mais les pertes seront accrues dans les conditions stables ou lentement changeantes. À l'inverse, une faible largeur de pas réduit les pertes dans les conditions stables ou lentement changeantes, mais le système ne peut plus suivre les changements rapides de la température ou de l'insolation. Il est donc nécessaire de trouver un compromis entre précision et rapidité, ce qui rend cette commande difficile à optimiser.

Il faut donc trouver un compromis entre précision et rapidité. Ce qui rend cette commande difficile à optimiser. Un autre inconvénient de la méthode P&O lors d'un changement rapide des conditions atmosphériques. Figure 3.7 Commençant par un point de fonctionnement A, si les conditions climatiques restent constantes, une perturbation ΔV dans la tension V amènera le point de fonctionnement au point B, et le sens de la perturbation sera inversé à cause de la diminution de la puissance. Par contre, si par exemple l'éclairement augmente et déplace la courbe de puissance de P_1 à P_2 , sur un cycle du MPPT, le point de fonctionnement sera déplacé de A vers C. Cela représente une augmentation de la puissance, l'algorithme précédent réagit comme si cette augmentation est produite par l'effet de perturbation précédente, alors il continue dans la même direction qui est une mauvaise direction, ce qu'il éloigne du vrai point de puissance maximale. Ce processus continu jusqu'à la stabilité de l'ensoleillement où il revient au vrai point de puissance maximale. Ceci cause un retard de réponse lors des changements soudains des conditions de fonctionnement et des pertes de puissance [29].

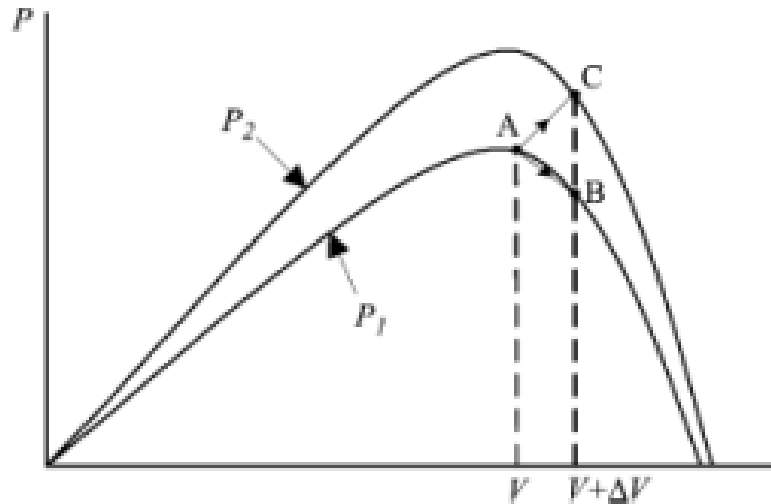


FIGURE 3.7 – Divergence de la méthode P&O

3.4.4 Conductance Incrémentale (IncCond, Incremental Conductance)

La méthode de la conductance incrémentielle est une méthode de poursuite du point de puissance maximale qui est basée sur la conductance incrémentielle et instantanée du module PV. Cette méthode est fondée sur le fait que la pente de la courbe caractéristique de puissance du panneau est nulle au MPP, positive à gauche et négative à droite. Ainsi, la mé-

thode de la conductance incrémentielle utilise la variation de la tension du panneau photovoltaïque pour déterminer la direction dans laquelle la puissance augmente. Elle mesure la variation de la tension à travers une petite perturbation et calcule la conductance incrémentielle du module PV. Si la tension augmente en réponse à la perturbation, alors la méthode de la conductance incrémentielle augmente la tension du panneau dans la même direction jusqu'à ce que la puissance maximale soit atteinte. Si la tension diminue en réponse à la perturbation, la tension est ajustée dans la direction opposée. En ajustant ainsi la tension en fonction de la conductance incrémentielle, la méthode de la conductance incrémentielle peut rapidement et précisément déterminer le MPP du module PV, ce qui permet d'optimiser la production d'énergie solaire.

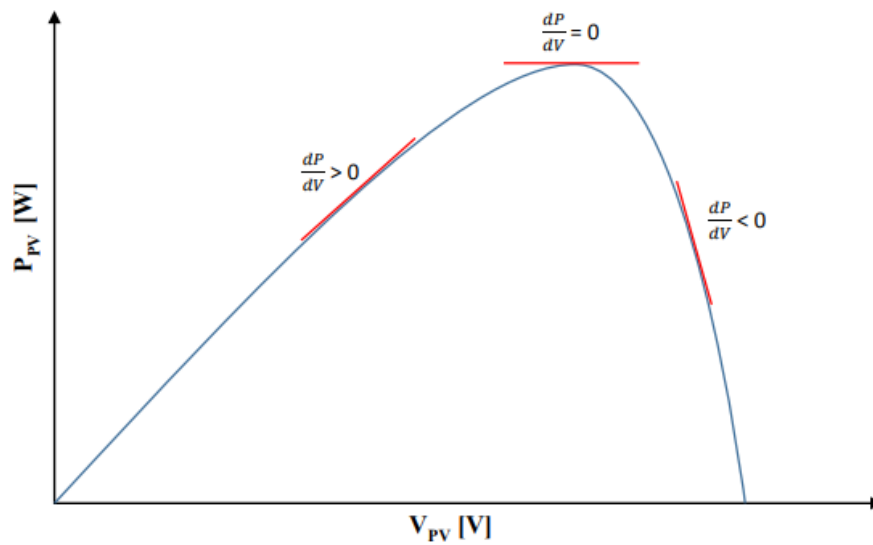


FIGURE 3.8 – caractéristique de tension-puissance du panneau

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

$$P = V \cdot I$$

D'où en écrivant la dérivant :

$$\frac{dP}{dV} = \frac{VdI}{dV} + \frac{dV}{dV} \cdot I$$

$$\frac{dP}{dV} = \frac{VdI}{dV} + I$$

$$\frac{dP}{dV} \cong V \cdot \frac{\Delta I}{\Delta V} + I$$

Donc :

$$\frac{dP}{dV} = 0 \quad \frac{\Delta I}{\Delta V} = -\frac{I}{V} \quad (a) \text{ Au point du MPP}$$

$$\frac{dP}{dV} > 0 \text{ ou } \frac{\Delta I}{\Delta V} > -\frac{I}{V} \quad (b) \text{ A gauche du MPP}$$

$$\frac{dP}{dV} < 0 \quad \frac{\Delta I}{\Delta V} < -\frac{I}{V} \quad (c) \text{ A droite du MPP}$$

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.

La méthode de la conductance incrémentielle repose sur la comparai-

son de la conductance instantanée du module PV (I_{PV}/V_{PV}) avec l'incrément de conductance (dI_{PV}/dV_{PV}) pour atteindre le PPM. La pente de la courbe caractéristique de puissance du panneau est nulle au MPP, positive à gauche et négative à droite, ce qui est utilisé pour ajuster la tension aux bornes du réseau. Si l'incrément de conductance (dG) est supérieur à l'opposé de la conductance ($-G$), le rapport cyclique est diminué. En revanche, si l'incrément de conductance est inférieur à l'opposé de la conductance, le rapport cyclique est augmenté. Ce processus est répété jusqu'à ce que le PPM soit atteint. L'algorithme de cette méthode est illustré dans la Figure 3.9

Cependant, tout comme la méthode P&O, cette technique présente des oscillations autour du PPM car il est difficile de remplir la condition $dP/dv = 0$, ce qui fait que le système reste toujours en train de la chercher. De plus, l'algorithme IncCond est plus complexe que celui du P&O, ce qui engendre un temps d'exécution plus long.

La méthode IncCond, malgré sa complexité, peut être améliorée pour réduire les oscillations autour du MPP. Une première étape consiste à rapprocher le point de fonctionnement du MPP, puis l'algorithme IncCond est utilisé pour suivre précisément le MPP dans une deuxième étape. En général, le point de fonctionnement initial est réglé pour correspondre à une charge résistive proportionnelle au rapport de la tension de circuit ouvert V_{oc} sur le courant de court-circuit I_{sc} , afin d'assurer que le vrai MPP est poursuivi s'il y a plusieurs maxima locaux. Il est également possible d'utiliser la conductance instantanée et l'incrément de la conductance pour générer un signal d'erreur, ce qui permet de réduire les oscillations autour du MPP. [29]

$$e = \frac{I}{V} + \frac{dI}{dV} \quad (3.2)$$

D'après l'équation (3.2), l'erreur est nulle au MPP. Un régulateur PI peut donc être utilisé pour annuler cette erreur. La mesure de la tension et du courant instantanés du panneau PV nécessite deux capteurs. La méthode IncCond se prête parfaitement à la commande par DSP ou microcontrôleur, qui peut garder en mémoire les valeurs précédentes de la tension et du courant

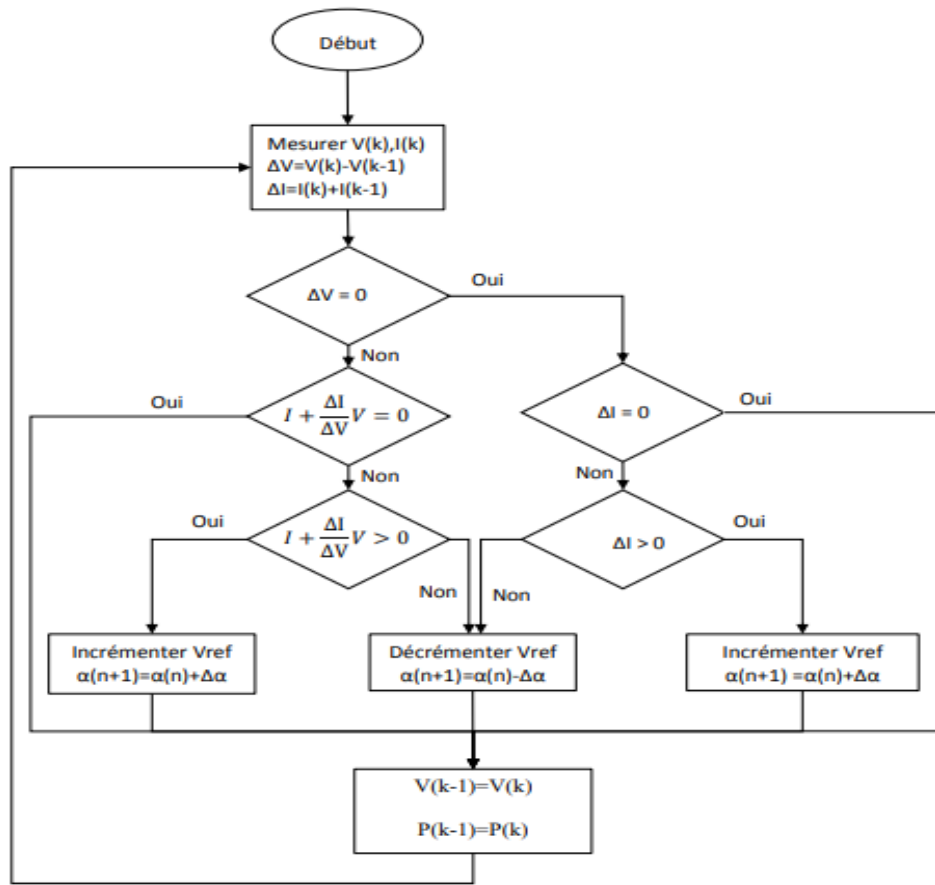


FIGURE 3.9 – l’algorithme IncCond classique

Une autre solution est possible encore comme la méthode de p&o. c’est aussi de garder le même algorithme de la méthode IncCond classique ou le pas de perturbation est variable le pas proposé est [35] :

$$\alpha(k) = \alpha(k-1) \pm N \times \left| \frac{P(k) - P(K-1)}{V(k) - V(K-1)} \right| \quad (3.3)$$

3.4.5 La Commande Mppt Floue

La commande basée sur la logique floue est une technique de plus en plus populaire pour le contrôle des systèmes grâce à l’évolution des micro-contrôleurs [36,37]. Contrairement aux autres techniques de commande, la logique floue peut fonctionner avec des valeurs d’entrées peu précises et traiter des non-linéarités. Elle se base sur deux variables d’entrées (l’erreur et le changement d’erreur) et une variable de sortie (la variation du rapport cyclique) pour piloter le convertisseur statique à la recherche du PPM. La commande logique floue comprend trois étapes :

- la fuzzification
- la lecture de la table de vérité
- la defuzzification

Pendant la fuzzification, les variables d’entrées numériques sont converties en variables linguistiques pouvant prendre cinq valeurs :

- NB : Negative Big,
- NS : Negative Small,
- ZE : Zero,
- PS : Positive Small,
- PB : Positive Big

Comme le montre la structure de base de la commande logique floue illustrée en Figure 3.10

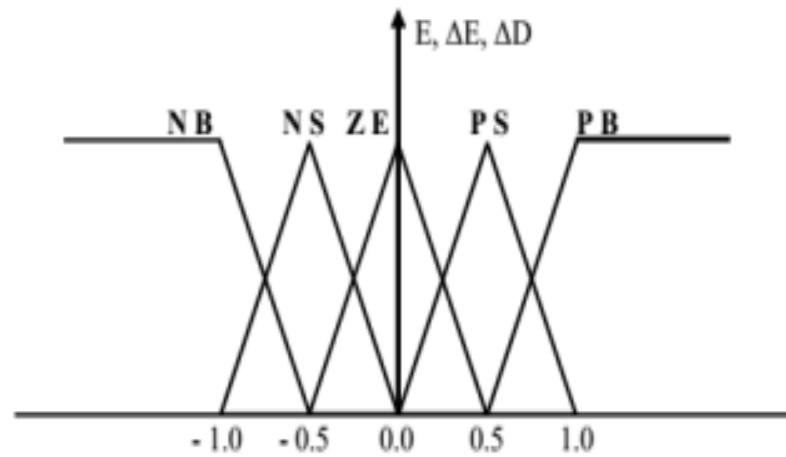


FIGURE 3.10 – structure de base de la commande floue

Les paramètres d'entrées E et ΔE sont liées aux équations suivantes :

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

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

En fonction de leurs évolutions et d'une table de vérité comme indiquée dans le tableau I, une valeur est attribuée au paramètre de sortie $\Delta\alpha$:

TABLE 3.2 – table de vérité pour une commande logique floue.

$\frac{\Delta E}{E}$	NB	NS	ZE	PS	PB
NB	ZE	ZE	NB	NB	NB
NS	ZE	ZE	NS	NS	NS
ZE	NS	ZE	ZE	ZE	PS
PS	PS	PS	PS	ZE	ZE
PB	PB	PB	PB	ZE	ZE

La variable linguistique assignée à $\Delta\alpha$, dépend des différentes combinaisons entre E et ΔE . Par exemple, si les variables d'entrée (E et ΔE), ont comme valeur PB et ZE correspondant à un point de fonctionnement très éloigné du PPM, d'après la table de vérité la valeur donnée à la variable

de sortie $\Delta\alpha$ est PB, ce qui implique une forte variation positive du rapport cyclique pour atteindre le PPM. En résumé, les variations du rapport cyclique dépendent de la différence de position entre le point de fonctionnement et un PPM. Ainsi, dès que ce dernier s'approche du PPM, les incréments appliqués à $\Delta\alpha$ s'affinent jusqu'à atteindre le PPM.

La defuzzification, consiste à convertir cette fois, une variable linguistique en variable numérique. Cette étape ne s'applique qu'à la variable de sortie $\Delta\alpha$, afin de pouvoir piloter le convertisseur de puissance pour atteindre le PPM.

En effet, la méthode de commande basée sur la logique floue présente des avantages et des inconvénients. Elle est performante en termes de rapidité de recouvrement du MPP et peut gérer efficacement les variations des conditions climatiques, mais elle nécessite l'utilisation d'un microcontrôleur ayant une grande capacité de calculs et peut entraîner une consommation énergétique non négligeable ainsi qu'un surcoût. De plus, sa précision en statique est fortement liée à la complexité de la table de vérité employée, ce qui peut limiter sa précision. En somme, le choix de la méthode de commande dépendra des objectifs de la conception et des contraintes technologiques et économiques du projet. [38,39]

3.5 AUTRES MÉTHODES

Effectivement, il existe plusieurs autres algorithmes MPPT plus complexes qui ont été proposés dans la littérature scientifique. Voici une brève description de quelques-uns de ces algorithmes [40,41,42,43] :

Les algorithmes à base de réseau de neurones : Ces algorithmes utilisent un réseau de neurones artificiels pour approximer la fonction de puissance du panneau solaire en fonction de la tension et du courant. Cette approximation est ensuite utilisée pour trouver le MPP. La méthode de look-up table : Cette méthode utilise une table de correspondance entre la tension et le courant du panneau solaire et la puissance de sortie. Cette table est pré-calculée en laboratoire pour différents niveaux d'irradiation solaire et de température. L'algorithme utilise ensuite cette table pour trouver le MPP.

Les algorithmes d'identification en temps réel du MPP : Ces algorithmes utilisent des modèles mathématiques pour estimer la puissance de sortie en fonction de la tension et du courant. Ces modèles sont ensuite utilisés pour trouver le MPP.

La méthode de β : Cette méthode utilise une fonction de coût basée sur la puissance de sortie pour ajuster le rapport cyclique du convertisseur DC-DC.

L'algorithme de la capacité parasite (Parasitic Capacitance) : Cette méthode utilise une estimation de la capacité parasite du panneau solaire pour trouver le MPP.

La méthode de balayage du courant (Current Sweep) : Cette méthode consiste à balayer le courant de sortie du panneau solaire sur une plage donnée et à mesurer la tension correspondante. L'algorithme utilise ensuite ces mesures pour trouver le MPP.

3.6 CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons abordé la partie la plus importante et la plus complexe de notre étude, qui consiste à présenter le principe de recherche du point de puissance maximale et à classifier les différentes méthodes de commande MPPT. Nous avons examiné en détail les diverses approches MPPT les plus couramment utilisées dans la littérature. La co-existence de plusieurs types de commandes MPPT montre que ce domaine de recherche est en constante évolution et qu'il est difficile de trouver une ou plusieurs solutions universelles. Ce chapitre servira de point de référence pour comparer l'approche MPPT que nous allons développer dans la suite.

COMMANDE MPPT BASÉE SUR LA LOGIQUE FLOUE 4



FIGURE 4.1 – Structure de base du contrôleur MPPT à base logique floue

4.1 INTRODUCTION

La logique floue, créée en 1965 par Lotfi Zadeh en s'appuyant sur sa théorie mathématique des ensembles flous, est une extension de la logique classique qui permet de modéliser les imperfections des données. Elle se rapproche, dans une certaine mesure, de la flexibilité du raisonnement humain. Récemment, la commande à base de logique floue a été introduite dans les systèmes de poursuite de point de puissance maximal (MPPT) photovoltaïques.

En 1973, le professeur Zadeh a publié un article dans lequel il mentionne pour la première fois le concept de variables linguistiques, dont la valeur est un mot plutôt qu'un nombre. En 1974, Mamdani a réalisé un contrôleur flou expérimental pour commander un moteur à vapeur. Dans les années 80, de nombreuses applications ont émergé, notamment au Japon, dans divers domaines de contrôle et de régulation. [44]

Dans ce chapitre, nous présenterons les principes, les étapes et les composants de la logique floue, ainsi que le fonctionnement d'un régulateur flou. Nous aborderons également l'application de la logique floue dans la commande MPPT photovoltaïque.

4.2 PRINCIPE DE LA LOGIQUE FLOUE

le principe du contrôleur utilisant la logique floue se base sur deux variables d'entrées (figure 4.1) qui sont l'erreur (E), sa variation (ΔE) et une variable en sortie (δD), correspondant à la variation du rapport cyclique qui pilote le signal de commande du convertisseur statique pour la recherche du PPM.[45]

La figure (4.2) ci-dessous illustre l'implémentation du contrôleur MPPT à base de logique floue.

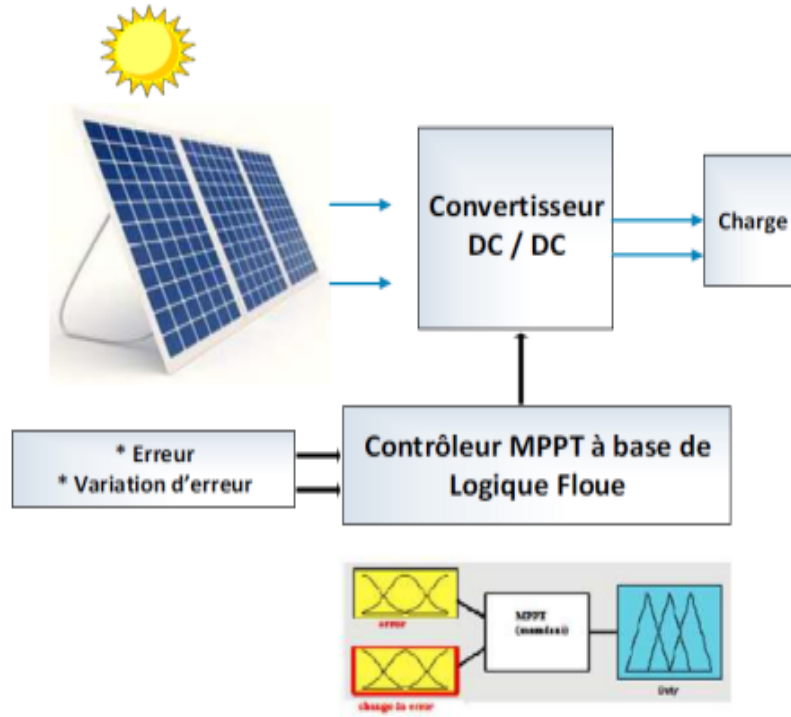


FIGURE 4.2 – Mise en œuvre du contrôleur MPPT basée sur la logique floue

4.2.1 La fuzzification

La fuzzification permet de transformer les variables réelles en variables floues. La tension (V) et le courant (I) réels du générateur PV peuvent être mesurés en continu et la puissance peut être calculée ($P = V * I$).

Les variables d'entrée du régulateur flou proposée sont : l'erreur (E) et la variation de l'erreur (CE). À un instant d'échantillonnage k , ces variables sont exprimées comme suit :

$$E(k) = \frac{P(k) - P(k-1)}{V(k) - V(k-1)} \quad (4.1)$$

$$CE(k) = E(k) - E(k-1) \quad (4.2)$$

Où $P(k)$ sont respectivement la puissance du générateur PV. La variation du rapport cyclique (ΔD) d'un convertisseur DC-DC est utilisée comme une sortie du régulateur proposé. Comme illustré en Figure (III.3), les variables d'entrée du régulateur flou (E , CE) sont déterminées à partir des signaux réels (E , CE) en multipliant par les gains (ou facteurs) d'échelle correspondants (SE , SCE), puis converties en variables linguistiques tels que SP (Small positive), BP (big positive), ZE (zéro), SN (Small négative), BN (big négative) en utilisant des sous-ensembles flous de base.

La Figure (4.3) et (4.4) montre les fonctions d'appartenance des cinq sous-ensembles flous pour les variables d'entrée et de sortie. Toutes ces fonctions sont de forme triangulaire afin de simplifier le traitement informatique.

L'entrée $E(k)$ montre si le point de fonctionnement à l'instant k se trouve sur la gauche ou sur la droite du MPP dans la caractéristique P-I de générateur PV, tandis que l'entrée $CE(k)$ exprime le sens de déplacement de ce point. Par conséquent, la commande est effectuée en modifiant le rapport cyclique (ΔD) en fonction de la pente $E(k)$ afin de ramener le point de fonctionnement au point maximum où la pente est nulle

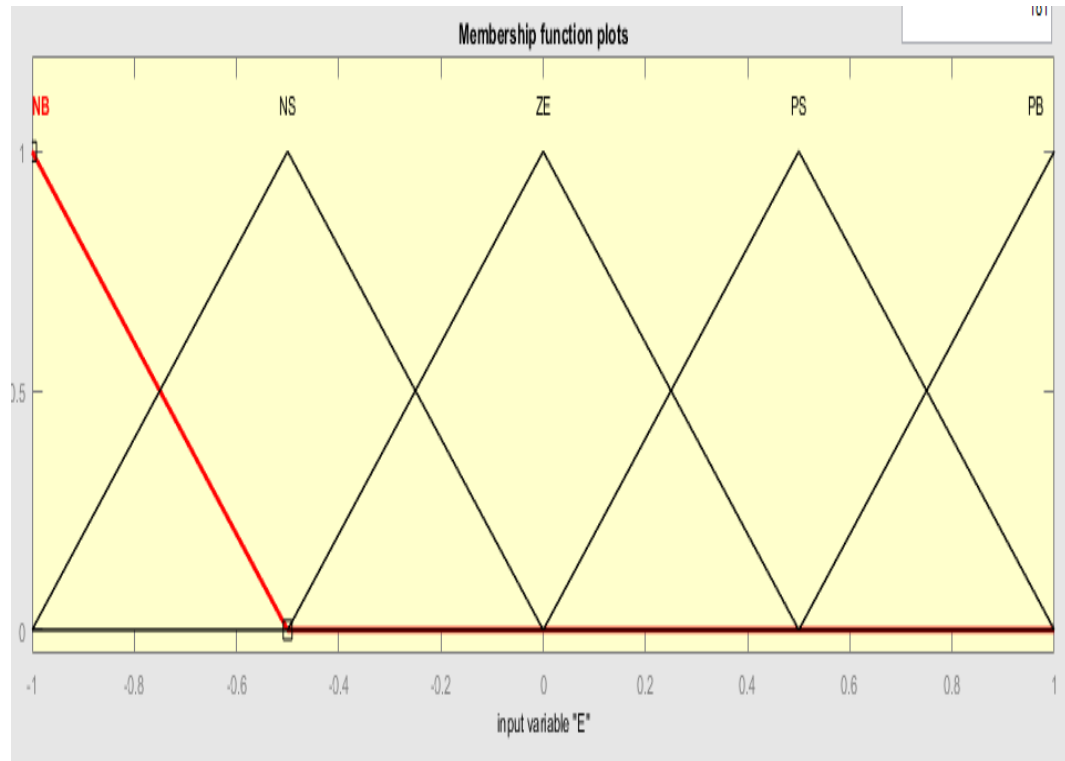


FIGURE 4.3 – La fonction d'appartenance de l'entrée E

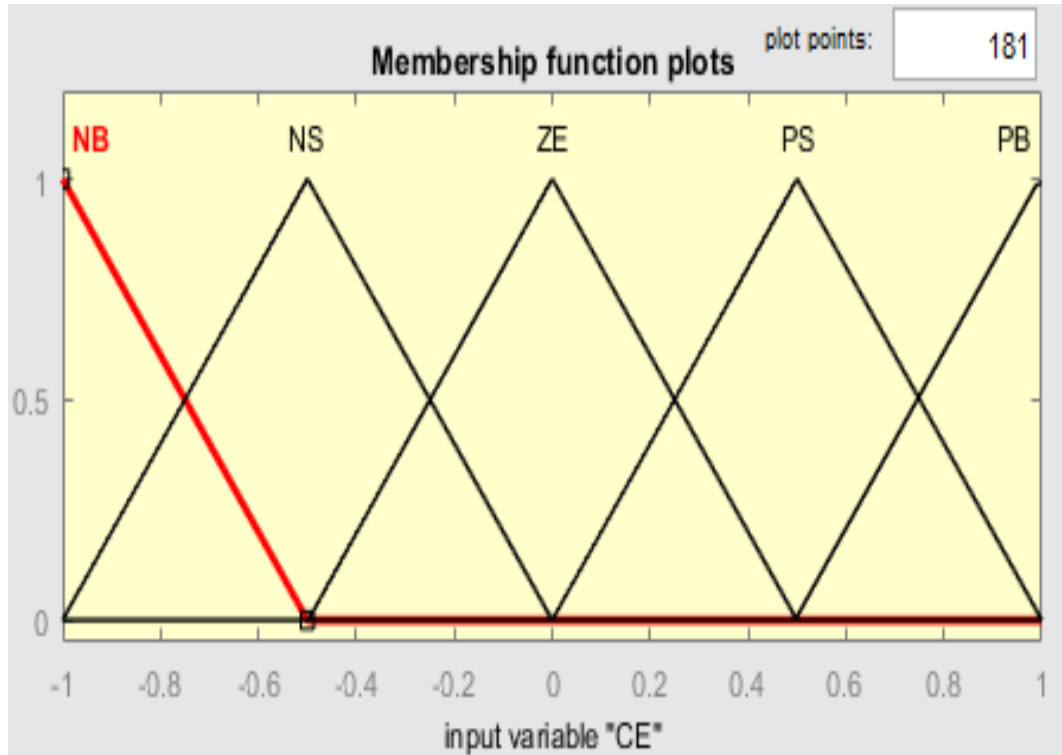


FIGURE 4.4 – La fonction d'appartenance de l'entrée CE

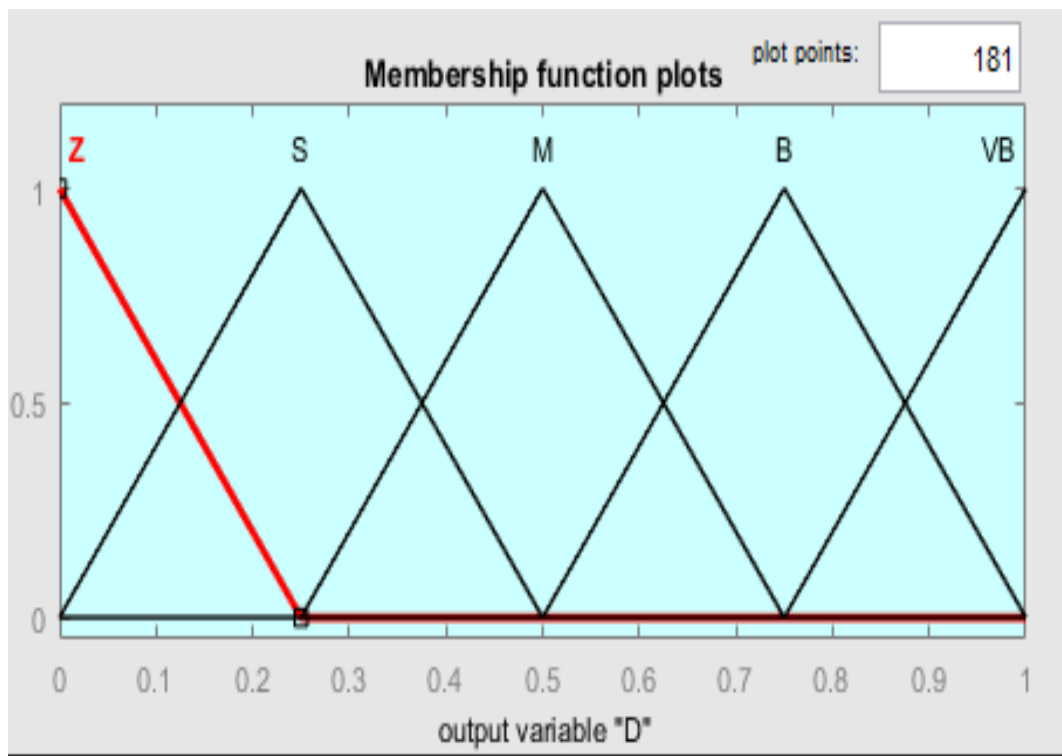


FIGURE 4.5 – La fonction d'appartenance de la sortie D

4.2.2 Inférence floue

L'étape d'inférence dans la logique floue consiste à prendre des décisions en établissant des relations logiques entre les entrées et la sortie, tout en définissant les règles d'appartenance. Par la suite, un tableau de règles d'inférence est dressé (Tableau 4.1). Enfin, lors de la défuzzification, les sous-ensembles flous de sortie sont convertis en une valeur numérique. [43]

TABLE 4.1 – Règles du contrôleur à logique floue.

CE	E				
	NB	NS	Z	PS	PB
NB	Z	Z	Z	B	M
NS	Z	Z	S	M	B
Z	Z	S	M	B	VB
PS	S	M	B	VB	VB
PB	M	B	VB	VB	VB

4.2.3 La défuzzification

La dernière étape de la logique floue est la défuzzification. Après l'opération d'inférence, la sortie du contrôleur est exprimée sous la forme de courbes de variables linguistiques. Les méthodes de défuzzification sont ensuite utilisées pour calculer et décoder les variables linguistiques en une valeur numérique. Dans ce travail, la méthode du centre de gravité est utilisée, plus précisément la méthode du centroïde [46]. Cette méthode détermine la sortie du contrôleur en calculant la valeur du centre de gravité du dernier sous-ensemble flou combiné.

4.3 RÉSULTATS DE SIMULATION DE LA MÉTHODE MPPT FLOU

La méthode MPPT floue est une approche intelligente utilisée pour réguler le point de puissance maximale d'un système photovoltaïque (PV). Nous allons appliquer le même modèle de simulation aux méthodes MPPT P&O et MPPT floue.

CHAPITRE 4 COMMANDE MPPT BASÉE SUR LA LOGIQUE FLOUE

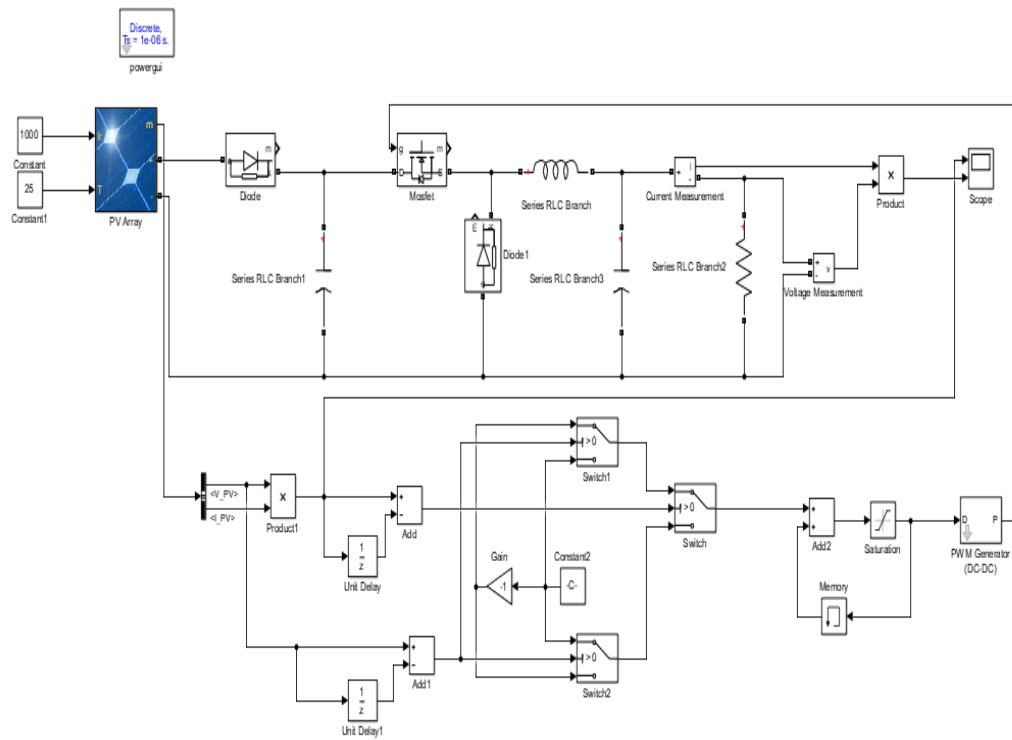


FIGURE 4.6 – Simulation du system photovoltaïque avec technique P&O-MPPT

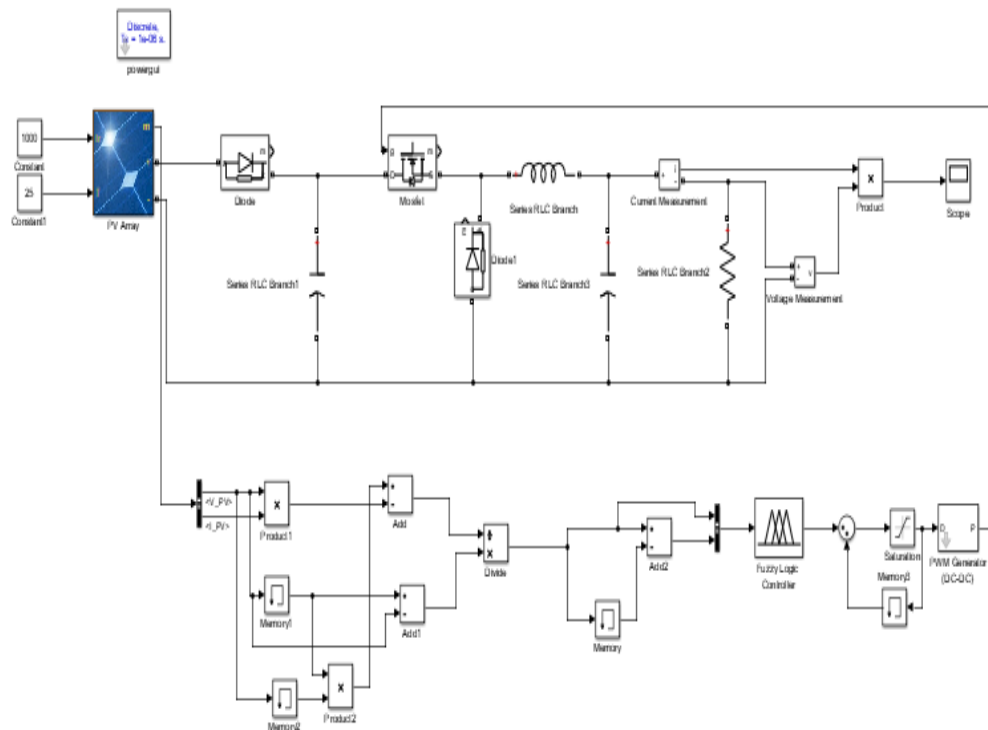


FIGURE 4.7 – Simulation du system photovoltaïque avec technique Logique floue-MPPT

Après avoir dimensionné tous les éléments du contrôleur flou nous

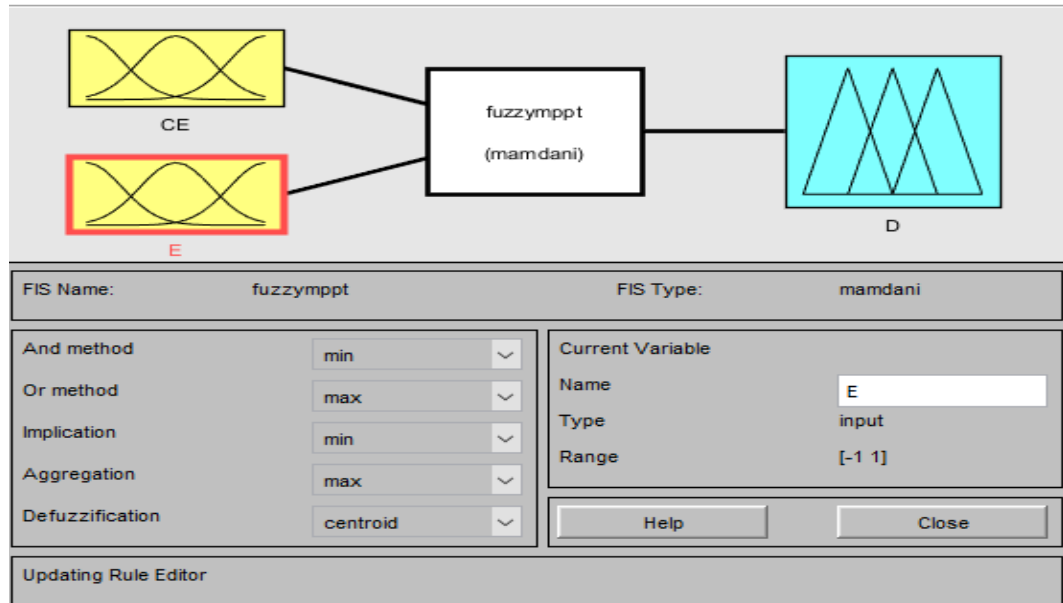


FIGURE 4.8 – Schéma générale du contrôleur MPPT floue

allons l'intégrer dans notre système grâce à la toolbox Fuzzy de Simulation (Figure 4.8)

4.3.1 Comparaison des deux commande MPPT P&O et MPPT basée de logique floue :

Pour une diminution d'ensoleillement qui va de $1000w/m^2$ jusqu'à $500w/m^2$ et pour les deux commandes

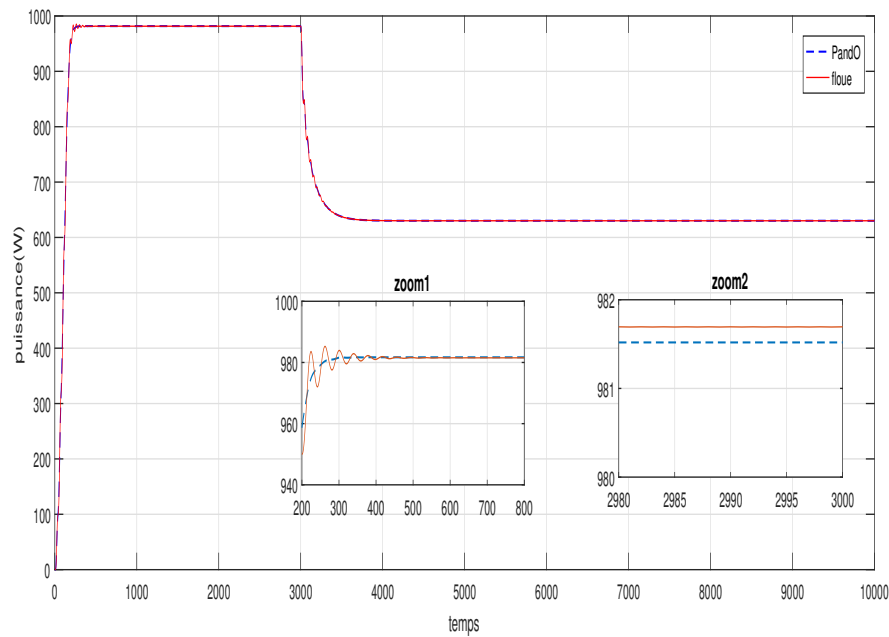


FIGURE 4.9 – Variation de la puissance en fonction du temps par logique floue et P & O dans PV system

La figure 4.9, qui représente la variation de la puissance en fonction du temps par logique floue et P&O dans le système PV, est essentielle pour évaluer la performance des deux méthodes de suivi du point de puissance maximale (MPPT).

En observant la figure, vous pouvez comparer les courbes de puissance obtenues avec la logique floue (représentée en rouge) et la méthode P&O (représentée en bleu) au fil du temps. La variation de la puissance au cours du temps est un indicateur clé pour évaluer l'efficacité du MPPT et la capacité du système PV à suivre les variations des conditions environnementales.

La figure 4.10 représente la variation de la puissance en fonction de la tension pour le système photovoltaïque, en comparant les performances de la logique floue et de la méthode P&O (Perturb and Observe) en termes de suivi du point de puissance maximale (MPPT). En analysant la figure, on peut constater que la logique floue (représentée en rouge) permet d'obtenir une courbe de puissance plus régulière. Cela indique que la logique floue est plus efficace pour maximiser la puissance produite par le système PV en ajustant la tension de sortie.

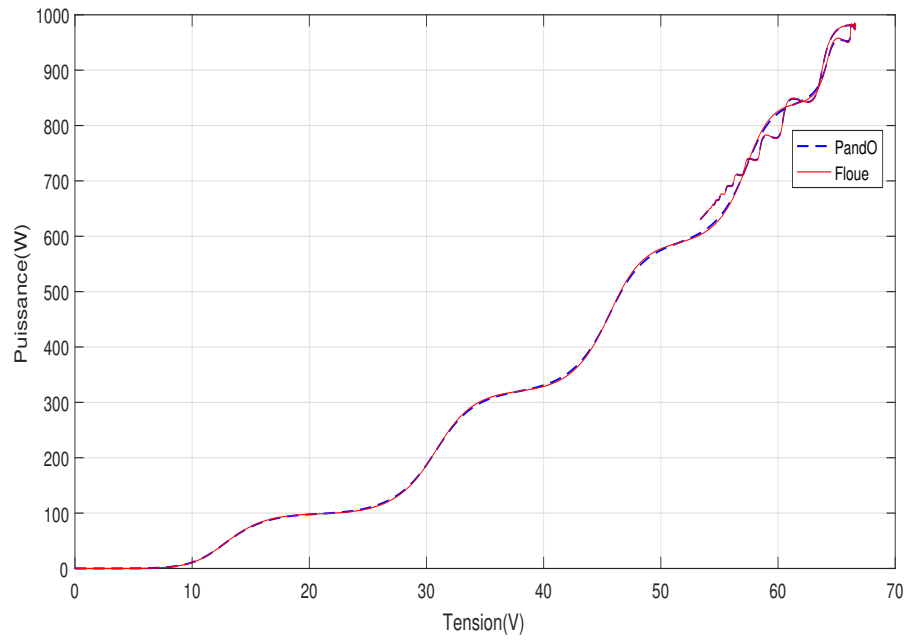


FIGURE 4.10 – Variation de la puissance en fonction de la tension par la logique flou et P&O pour le PV system

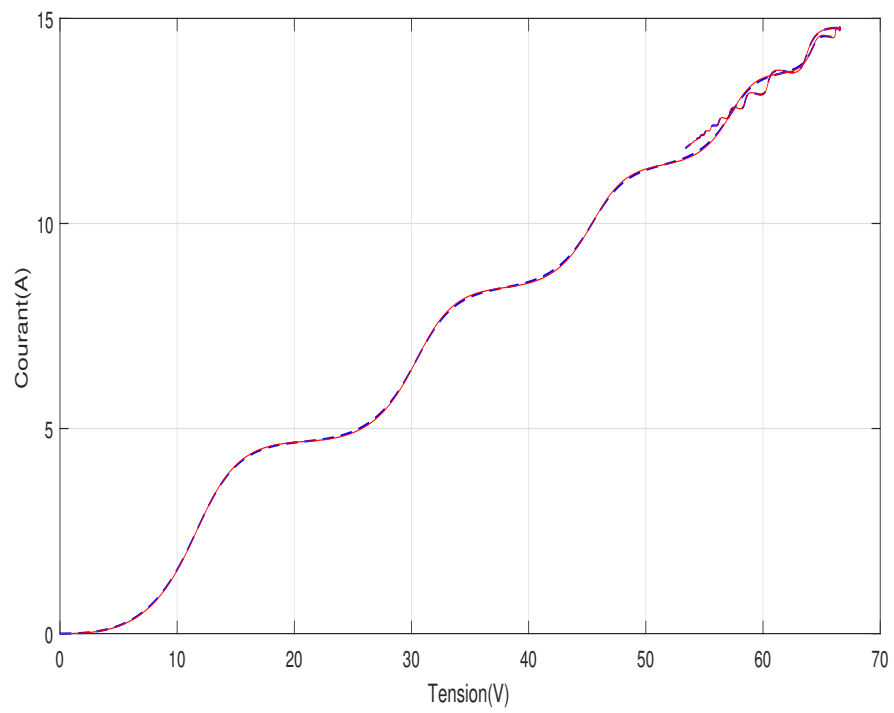


FIGURE 4.11 – Variation du courant en fonction de la tension par logique flou et P& O pour le PV system

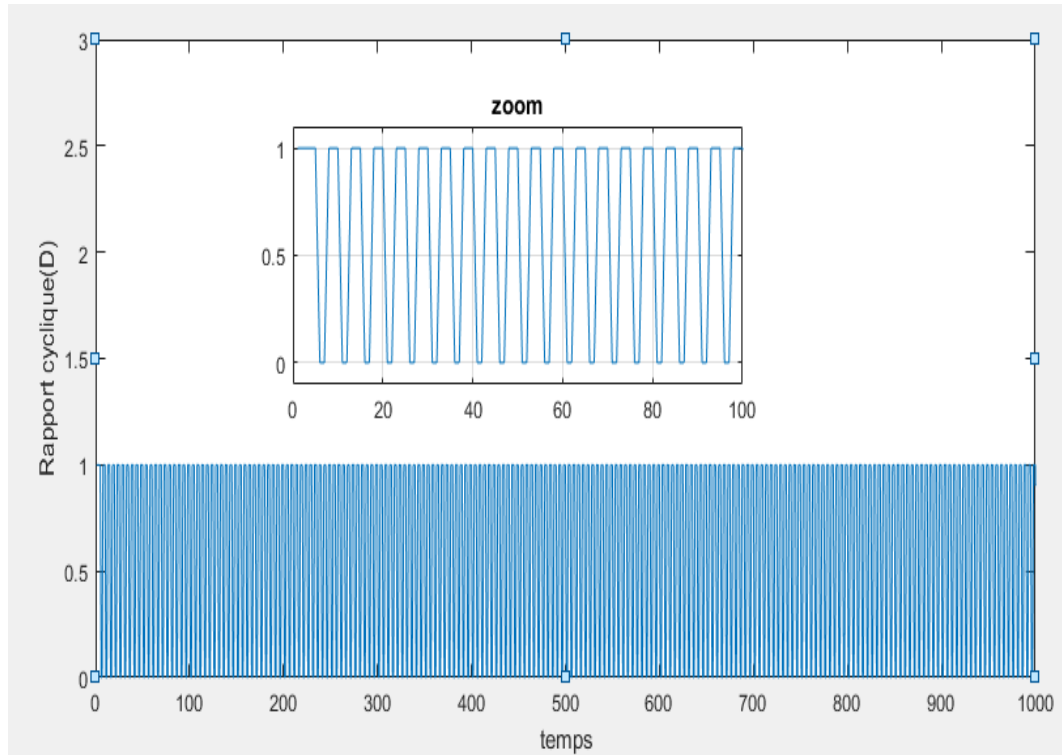


FIGURE 4.12 – Variation de rapport cyclique D en fonction du temps

La figure 4.11 représente la variation du courant en fonction de la tension pour le système PV, en comparant les performances de la logique floue et de la méthode P&O (Perturb and Observe) en termes de suivi du point de puissance maximale (MPPT). L'analyse de cette figure permettra de déterminer quelle méthode offre une meilleure précision et stabilité lors du suivi du point de puissance maximale.

La figure 4.12 représente la variation du rapport cyclique en fonction du temps pour le système PV. Cette variation du rapport cyclique permet d'optimiser continuellement la conversion d'énergie solaire en énergie électrique en ajustant la durée de fonctionnement des composants du système.

Les résultats obtenus avec la technique de commande floue proposée sont supérieurs à ceux obtenus avec les méthodes de contrôle conventionnelles basées sur P&O. Ainsi, la commande par logique floue peut être considérée comme une avancée vers un rapprochement entre le contrôle mathématique précis et la prise de décision humaine. De plus, ces résultats confirment le bon fonctionnement du contrôleur P&O, mais démontrent un fonctionnement encore meilleur de la commande floue. Cela est démontré par les résultats obtenus après la combinaison de ces deux méthodes, qui ont prouvé des performances améliorées, un temps de réponse rapide et une erreur à l'état permanent très faible.

Une étude comparative des deux commandes proposées a révélé que le contrôleur basé sur la commande par logique floue optimise de manière plus efficace la puissance de fonctionnement du système.

4.4 CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous présentons deux méthodes de commande pour le suivi du point de puissance maximale (MPPT) : la méthode P&O et la méthode intelligente de commande MPPT floue [48]. Nous avons mis en œuvre les différents blocs de simulation nécessaires en utilisant le logiciel Matlab Simulink.

Des résultats variés ont été obtenus pour différentes valeurs d'ensoleillement et de température, tant pour la commande MPPT floue que pour l'algorithme MPPT P&O. Ces résultats confirment le bon fonctionnement du MPPT P&O, mais mettent en évidence un fonctionnement supérieur de la commande floue.

La simulation de la commande MPPT floue a démontré de meilleures performances, avec un temps de réponse rapide et une erreur en régime permanent très faible. De plus, elle s'est révélée robuste face aux variations des conditions atmosphériques.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Ce mémoire a permis de présenter et d'étudier différentes techniques de commande pour le suivi du point de puissance maximale (MPPT) dans les systèmes photovoltaïques. Les commandes conventionnelles, telle que P&O, ainsi que la commande MPPT basée sur la logique floue, ont été étudiées et comparées.

Les résultats de cette étude ont permis de constater que la commande MPPT basée sur la logique floue offre plusieurs avantages par rapport aux approches conventionnelles. Elle permet d'obtenir une maximisation plus efficace de la production d'énergie solaire, avec une meilleure adaptation aux variations des conditions atmosphériques telles que la luminosité et la température. De plus, cette commande présente une plus grande robustesse, ce qui garantit une stabilité et une performance optimale du système photovoltaïque dans des conditions variables.

En comparaison, les commandes conventionnelles telles que P&O ont montré certaines limites, notamment en termes de temps de réponse plus lent et d'erreur en régime permanent plus élevée. Ces résultats mettent en évidence la nécessité d'adopter des approches plus avancées, comme la commande basée sur la logique floue, pour optimiser la conversion d'énergie et augmenter l'efficacité des systèmes photovoltaïques.

Pour les travaux futurs, il serait intéressant d'explorer davantage les possibilités d'intégration de différentes techniques de commande MPPT, y compris des approches hybrides ou l'utilisation de l'intelligence artificielle, pour améliorer encore plus les performances du système PV. De plus, l'optimisation de la conception des panneaux solaires et des convertisseurs DC/DC devrait être étudiée en profondeur afin de maximiser l'efficacité globale du système et d'atteindre des rendements énergétiques plus élevés.

En somme, cette étude souligne l'importance de poursuivre les recherches et les développements dans le domaine de la commande MPPT pour les systèmes photovoltaïques. L'utilisation de techniques avancées permettra d'exploiter pleinement le potentiel de l'énergie solaire, de réduire notre dépendance aux sources d'énergie non renouvelables et de contribuer à la protection de l'environnement.

Bibliographie

- [1] Dendib Boualem. Technique conventionnelles et avancée de poursuite mppt pour des application photovoltaïque : étude comparative. Université Ferhat Abbas-Sétif Mémoire de Magister, Département d'électronique TS4/6338, 2007.
- [2] S Naoual. Modélisation et extraction automatique des paramètres d'un générateur. université Ferhat Abbas de Sétif mémoire de magister, département d'électrotechnique, 2010.
- [3] Benadel Faiza. Etude Et Simulation D'une Commande MPPT Pour Système PV. PhD thesis, UNIVERSITE DE MOHAMED BOUDIAF M'SILA FACULTE DE TECHNOLOGIE, 2016.
- [4] M. Dietschy. Les cellules photovoltaïques. PhD thesis, cours classes préparatoires CPE, Institution des Chartreux, 2004-2005.
- [5] R.P. Mukund. Wind and solar Power Systems. PhD thesis, Ph.D, P.e U.S merchant Marine, 2004-2005.
- [6] N Chandrasekaran and K Thyagarajah. Modeling and matlab simulation of pumping system using pm dc motor powered by solar system. European Journal of Scientific Research, 59(1) :6–13, 2011.
- [7] Z Benjellouli. Contribution à la modélisation d'une cellule solaire» mémoire de magistère université de bechar, 2009.
- [8] Abdeslam Haouam and Narimene Debili. Etude et optimisation en environnement matlab/simulink d'un système de pompage photovoltaïque. 2017.
- [9] M.boukli Hacene Omar. Conception et réalisation d'un système photovoltaïque muni d'un convertisseur MPPT pour une meilleure gestion énergétique. PhD thesis, mémoire de magister, Université de Tlemcen, 2011.
- [10] O Guenounou, Farid Bedrane, et al. Etude comparative entre quelques méthodes de poursuite du point de puissance maximale dans les systèmes photovoltaïques. PhD thesis, Université abderrahmane mira béjaia, 2013.
- [11] Benadel Faiza. Etude Et Simulation D'une Commande MPPT Pour Système PV. PhD thesis, UNIVERSITE DE MOHAMED BOUDIAF M'SILA FACULTE DE TECHNOLOGIE, 2016.
- [12] Mehdi Sahouane. Photovoltaics in algeria, today's experiences and perspectives of tomorrow ; le photovoltaïque en algerie, experiences d'aujourd'hui et perspectives de demain. 2010.
- [13] Abdelfattah KARA. Dimensionnement et analyse du coût d'un système hybride de production d'énergie renouvelable pour des sites isolés en Algérie. PhD thesis, 2016.

- [14] Mohamed Rédha Yaiche and Abdellah Bouhanik. Atlas solaire algérien. Portail des Energies Renouvelables, Centre de Développement des Energies Renouvelables, 16, 2002.
- [15] Le Ministère de L'énergie et des mines. conception et réalisation satinfo société du groupe sonelgaz « programme des energies renouvelables et de l'efficacité énergétique ». PhD thesis, mars 2011
- [16] Frederick M Ishengoma and Lars E Norum. Design and implementation of a digitally controlled stand-alone photovoltaic power supply. 2002.
- [17] LASMI Yassine. Optimisation de la poursuite du point de puissance maximale (MPPT) d'un système photovoltaïque par les techniques intelligentes. PhD thesis, Université de Sétif 1-Ferhat Abbas, 2013.
- [18] Youcef Aliat Chihab Reguig, Youcef Omane. Commande mppt par mode glissant pour les systèmes photovoltaïques. 2021
- [19] Akassewa Tchapo Singo. Système d'alimentation photovoltaïque avec stockage hybride pour l'habitat énergétiquement autonome. PhD thesis, Université Henri Poincaré-Nancy 1, 2010.
- [20] Fateh Slama. Modélisation d'un système multi générateurs photovoltaïques interconnectés au réseau électrique. PhD thesis, 2018.
- [21] Khaled Laouamri, J-P Ferrieux, Stéphane Catellani, and Jean Barbaroux. Modeling and analysis of wound integrated lct structure for single stage resonant pfc rectifier. IEEE Transactions on Power Electronics, 18(1) :256– 269, 2003.
- [22] Ahmed HAKOUMI, Abdeldjalil BENAMAR, Touhami GHITAOUI, et al. Commande MPPT et contrôle d'un systemephotovoltaïque 3KW par la logique floue. PhD thesis, Université Ahmed Draïa-Adrar, 2019.
- [23] Angel Cid Pastor. Conception et réalisation de modules photovoltaïques électroniques. PhD thesis, INSA de Toulouse, 2006.
- [24] Younes Rais. Modélisation du rendement du convertisseur DC/AC dans un système photovoltaïque. PhD thesis, 2012.
- [25] Minwon Park and In-Keun Yu. A study on the optimal voltage for mppt obtained by surface temperature of solar cell. In 30th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics Society, 2004. IECON 2004, volume 3, pages 2040–2045. IEEE, 2004.
- [26] Anantapuram. investigation on potential photovoltaic power modules for higher electrical output. PhD thesis, kiranmayi r-jawaharlal nehru technological university, 2012.
- [27] Ahmad Zbeeb. A new microcontroller-based MPPT algorithm for photovoltaic applications. PhD thesis, Concordia University, 2009.

- [28] Dong-Yun Lee, Hyeong-Ju Noh, Dong-Seok Hyun, and Ick Choy. An improved mppt converter using current compensation method for small scaled pv-applications. In Eighteenth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2003. APEC'03., volume 1, pages 540–545. IEEE, 2003.
- [29] Akihiro Oi. Design and simulation of photovoltaic water pumping system. PhD thesis, California Polytechnic State University, 2005.
- [30] Hajar Bagheri Tolabi. Advances in Electric Power Engineering. Lulu. com, 2015.
- [31] active power control for a single-phase grid connected pv system. Design and simulation of photovoltaic water pumping system. 2013.
- [32] Chiri Meriem Bisker Asma. commande d'un système photovoltaïque en mode isolé et en mode connecté au réseau. PhD thesis, , école nationale polytechnique, 10, av. Hassen badi, elharrach, 2006.
- [33] Thameur Obeidi. Application des algorithmes génétiques dans la commande des hacheurs MPPT. PhD thesis, Alger, Ecole Nationale Polytechnique, 2006
- [34] Titraoui Abdessalam Nadir Mohamed, Sahraoui Ahmed. etude d' une chaine de conversion photovoltaïque. PhD thesis, universite de m'sila, 2010
- [35] Alberto Dolara, R Faranda, and Sonia Leva. Energy comparison of seven mppt techniques for pv systems. Journal of Electromagnetic Analysis and Applications, 2009, 2009.
- [36] Mustapha Hatti. Contrôleur flou pour la poursuite du point de puissance maximum d'un système photovoltaïque. JCGE'08 LYON, 16, 2008.
- [37] Noppadol Khaehintung, Krisada Pramotung, Borpit Tuvirat, and Phaophak Sirisuk. Risc-microcontroller built-in fuzzy logic controller of maximum power point tracking for solar-powered light-flasher applications. In 30th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics Society, 2004. IECON 2004, volume 3, pages 2673–2678. Ieee, 2004.
- [38] Chung-Yuen Won, Duk-Heon Kim, Sei-Chan Kim, Won-Sam Kim, and Hack-Sung Kim. A new maximum power point tracker of photovoltaic arrays using fuzzy controller. In Proceedings of 1994 Power Electronics Specialist Conference-PESC'94, volume 1, pages 396–403. IEEE, 1994.
- [39] Mummadi Veerachary, Tomonobu Senjyu, and Katsumi Uezato. Feedforward maximum power point tracking of pv systems using fuzzy controller. IEEE Transactions on aerospace and electronic systems, 38(3) :969–981, 2002.
- [40] Ali Nasr Allah Ali, Mohamed H Saied, Mohamed Z Mostafa, and Talaat M Abdel-Moneim. A survey of maximum ppt techniques of pv systems. In 2012 IEEE Energytech, pages 1–17. IEEE, 2012.

- [41] Trishan Eswam and Patrick L Chapman. Comparison of photovoltaic array maximum power point tracking techniques. IEEE Transactions on energy conversion, 22(2) :439–449, 2007.
- [42] Todd Persen. Fpga-based design of a maximum-power-point tracking system for space a. 2004.
- [43] Nattorn Pongratananukul. Analysis and simulation tools for solar array power systems. University of Central Florida, 2005.
- [44] Loukriz Djamel. Poursuite du Point Maximale d’un Système Photovoltaïque par les Méthodes Intelligentes. PhD thesis, UNIVERSITE DE MOHAMED BOUDIAF M’SILA FACULTE DE TECHNOLOGIE, 2016.
- [45] Fethallah Tati, Oussama BEN LAMOUDI, et al. Etude et Réalisation d’unSystème Photovoltaïque Optimisé par Logique Floue. PhD thesis, 2018.

LISTE DES ABRÉVIATIONS

PV	Photovoltaïque.
MOSFETS	Transistors à effet de champ d'oxyde de métal.
GPV	Générateur Photovoltaïque.
FF	Facteur de forme.
MPPT	Maximum Power Point Tracking.
P&O	Perturbation et Observation.
Inc. Cond	Increment of Conductance.
DC	Courant Continue.
MPP	Maximum Power Point.
FLC	Fuzzy logic controller.
Ns	Nombres solaires en série.
Np	Nombres solaires en parallèle.

