

Département d'Automatique, Télécommunication et d'Electronique

Projet de Fin d'Etudes

Pour l'obtention du diplôme de Master

Filière : Automatique

Spécialité : Automatique et informatique industrielle

Thème

**Application de la méthode P&O et logique floue pour
l'optimisation de l'énergie PV**

Préparé par :

- M^{elle} DJIDJELI Mounia
- M^{elle} HATRI Celina

Dirigé par :

Mme OUDIAI Fatiha.

Examiné par :

Mr HADJI Slimane

Mr BELKAID Hakim

Année universitaire : 2023/2024

REMERCIEMENT

Tout d'abord, nous remercions DIEU le tout puissant de nous avoir donné le Courage et la patience durant toutes ces années d'études, et que grâce à lui ce Travail a pu être réalisé. On tient à remercier vivement les membres de nos familles qui nous ont toujours encouragée et soutenue.

Ensuite, nous voulons exprimer notre reconnaissance à notre promotrice Mme. OUDIAI Fatiha pour son encadrement, et sa disponibilité. Qu'elle trouve ici l'expression de notre profonde gratitude.

Nous tenons aussi à remercier les membres du jury d'avoir accepté de juger notre travail.

En fin un grand Merci à toutes personnes ayant contribués de près ou de loin à l'accomplissement de ce modeste travail.

DÉDICACES

Je dédie ce modeste travail à :

Mes chers parents,

Mon cher homme,

Mes chère frères et sœurs,

Toute ma famille,

Tous mes amies et à mes proches.

CELINA

DÉDICACES

Je dédie ce modeste travail à :

Mes chers parents,

Mes chère frères et sœurs,

Toute ma famille,

Tous mes amies et à mes proches.

MOUNIA

Table des matières

Introduction générale.....	1
----------------------------	---

Chapitre I : Généralité sur les systèmes photovoltaïques

I.1 Introduction.....	2
I.2 Généralités sur le système photovoltaïque.....	2
I.3 Avantages et inconvénients de l'énergie solaire	2
I.3.1 Avantages du système photovoltaïque	2
I.3.2 Inconvénients du système photovoltaïque	2
I.4 Photovoltaïque en l'Algérie.....	3
I.5 Les cellules photovoltaïques	4
I.5.1 Historique des cellules solaires	4
I.5.2 le fonctionnement d'une cellule photovoltaïque.....	5
I.5.3 Les différents types de cellules photovoltaïques.....	5
I.5.3.1 Les cellules en silicium monocristallin	6
I.5.3.2 Les cellules en silicium polycristallin	6
I.5.3.3 Les cellules au silicium amorphe en couche mince	7
I.5.3.4 Les autres types de cellules photovoltaïques.....	7
I.5.4 Comparatif des différentes technologies	8
I.6 Module photovoltaïque.....	9
I.7 Caractéristique d'un générateur photovoltaïque (GPV).....	10
I.8 Protection d'un GPV	11
I.8 Influence de l'éclairement et de la température.....	12
I.10 Type des systèmes photovoltaïque.....	14
I.10.1 Système photovoltaïque autonome	14
I.10.2 Système photovoltaïque connecté au réseau.....	15
I.10.3 Système photovoltaïque hybride.....	16
I.11 Conclusion	16

Chapitre II : Convertisseur DC-DC et la commande MPPT

II.1 Introduction	17
II.2 Convertisseur DC/DC	17
II.2.1 Convertisseur abaisseur (Buck)	17
II.2.2 Convertisseur élévateur (Boost)	19
II.2.3 Convertisseur abaisseur-élévateur (Buck-Boost)	20
II.3 La commande MPPT	20
II.3.2 Les techniques de recherche du point de puissance maximale.....	21

II.4 Conclusion.....	29
Chapitre III : Application de l’algorithme P&O et de la logique floue pour contrôler les systèmes PV	
III.1 Introduction.....	30
III.2 La logique floue.....	30
III.2.1 Définition de la logique floue	30
III.3.2 La fuzzification.....	31
III.3.3 La fonction d’appartenance.....	31
III.3.4 Les règles floues	32
III.3.5 La défuzzification	33
III.4.4.1 Structure de commande MPPT à base de logique floue.....	36
• La fuzzification	36
• Inférence floue et règles linguistiques.....	37
• La défuzzification	38
• Création du contrôleur floue et module global	38
III.5 Comparaison entre les deux résultats des puissances (MPPT P&O-MPPT Floue).....	40
III.6 Conclusion	41
Conclusion générale.....	44

LISTES DES FIGURES

Chapitre I : Généralité sur les systèmes photovoltaïques

Figure I.1 La première voiture alimentée par l'énergie photovoltaïque.

Figure I.2 schéma de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque.

Figure I.3 : Les cellules en silicium monocristallin.

Figure I.4 : Les cellules en silicium polycristallin.

Figure I.5 : Les cellules au silicium amorphe en couche mince.

Figure I.6 Association des cellules en série.

Figure I.7 Association des cellules en parallèle.

Figure I.8 Caractéristique « Tension-Courant » $I(V)$ du panneau photovoltaïque APOS Energy AP 215M.

Figure I.9 Caractéristique « Tension-Puissance » $P(V)$ du panneau photovoltaïque APOS Energy AP 215M.

Figure I.10 Influence de la variation de l'éclairement sur la caractéristique «Tension-Courant».

Figure I.11 Influence de la variation de l'éclairement sur la caractéristique « Tension - Puissance ».

Figure I.12 Influence de la variation de la température sur la caractéristique « Tension-Courant ».

Figure I.13 Influence de la variation de la température sur la caractéristique « Tension-Puissance ».

Figure I.14 Différentes configurations d'un système photovoltaïque.

Figure I.15 Système photovoltaïque autonome.

Figure I.16 Système photovoltaïque connecté au réseau.

Figure I.17 Système photovoltaïque hybride.

Chapitre II : Convertisseur DC-DC et la commande MPPT

Figure II.1 Schéma de base d'un convertisseur Buck.

Figure II.2 Convertisseur Buck à l'état passant.

Figure II.3 Schéma du Buck (S fermé).

Figure II.4 Schémas de base d'un convertisseur Boost.

Figure II.5 Schéma du Boost (S fermé).

Figure II.6 Schéma du Boost (K ouvert).

Figure II.7 Schéma du circuit électrique d'un hacheur abaisseur-élevateur (Buck-Boost).

Figure II.8 schéma synoptique d'un système photovoltaïque.

Figure II.9 Relation entre P et le rapport cyclique D du convertisseur statique.

Figure II.10 Algorithme de la commande Hill Climbing.

Figure II.11 Algorithme de la Tension Constante.

Figure II.12 Algorithme du constant courant.

Figure II.13 Caractéristique P_{pv} (V_{pv}) d'un panneau photovoltaïque.

Figure II.14 Organigramme de la méthode perturbation et observation.

Figure II.15 Positionnement du point de fonctionnement suivant le signe de dP/dV sur caractéristique de la puissance.

Figure II.16 Organigramme d'une commande MPPT basée sur la méthode incrément de conductance.

Chapitre III : Application de l'algorithme P&O et de la logique floue pour contrôler les systèmes PV

Figure III.1 Structure principale d'un contrôleur logique floue.

Figure III.2 Graphiques des différentes fonctions d'appartenance d'un contrôleur logique floue.

Figure III.3 Modélisation de Convertisseur DC-DC en Matlab/Simulink.

Figure III.4 Modélisation de Commande MPPT P&O en Matlab/Simulink.

Figure III.5 Caractéristique I(t) et V(t) et P(t) de GPV /par commande MPPT P&O.

Figure III.6 Modélisation générale de GPV avec la Commande MPPT P&O en Matlab/Simulink.

Figure III.7 les fonctions d'appartenance pour chaque changement de l'entrée et sortie

Figure III.8 Formes des règles et surface de sortie.

Figure III.9 Modalisation de Commande MPPT Logique Floue en Matlab/Simulink.

Figure III.10 Caractéristique I(t) et V(t) et P(t) de GPV /par commande MPPT Floue.

Figure III.11 Modélisation générale de GPV avec la Commande MPPT Floue en Matlab/Simulink.

Figure III.12 Comparaison des caractéristiques P(t) de GPV par deux contrôle MPPT/ logique floue FLC & perturbation et d'observation P&O.

Figure III.13 Comparaison des caractéristiques I(t) de GPV par deux contrôle MPPT/ logique floue FLC & perturbation et d'observation P&O.

LISTE DES TABLEAUX

Chapitre I : Généralités sur les systèmes photovoltaïques

Tableau I.1: Programme d'électrification rurale solaire dans les 4 wilayas du Sud.

Tableau I.2: Principales réalisations du CDER dans le domaine photovoltaïque.

Tableau I .3 : comparatif des différents matériaux PV.

Chapitre III : Application de l'algorithme P&O et de la logique floue pour contrôler les systèmes PV

Tableau III.1 les valeurs des paramètres de Convertisseur DC-DC.

Tableau III.2 les Caractéristiques de panneau utilisé.

Tableau III.3 Les Règles de base utilisée en commande MPPT floue.

LISTE DES SYMBOLES ET ABRÉVIATIONS

- AC** : Courant alternative ;
- CV** : constant voltage ;
- CC** : constant current ;
- C₁, C₂** : Capacité (input, output) ;
- D** : le rapport cyclique du convertisseur ;
- DC**: Courant Continu ;
- FLC** : Contrôleur du logique floue ;
- I** : Courant disponible à la sortie de la cellule ;
- I_{cc}** : Courant de court-circuit d'une cellule ou d'un module solaire (A) ;
- I_{MPP}** : le courant de point maximal ;
- INC** : Incrémental Conductance ;
- I_{pv}** : Courant générer par la cellule photovoltaïque ;
- I_{pm}** : Courant nominale maximum en charge (A) ;
- I_{sc}** : Courant de court-circuit en Ampère ;
- GPV**: Générateur Photovoltaïque ;
- K** : Interrupteur;
- K₁, K₂** : une constante de proportionnalité ;
- L** : Inductance ;
- L_{charge}** : Inductance de chage ;
- MPPT**: Maximum Power Point Tracking;
- N_{cell}**: Nombre de cellule dans le panneau;
- N_p** : Nombre de cellule en parallèle dans le panneau ;
- N_s** : Nombre de cellule en série dans le panneau ;
- P** : Rapport cyclique ;
- P_c** : La puissance de crête ;
- P_{eff}** : Puissance efficace ;
- P_{max}**: Puissance maximale mesurée aux bornes de la cellule PV ;
- PN** : positif négatif ;
- PPM** : Point de puissance maximale ;
- PV**: Photovoltaïque ;
- P&O** : Perturbation et observation ;

R_{charge} : Résistance de charge ;

R_L : Charge utile ;

T : Température de jonction (K) ;

T_s : Powergui ;

t_m : Le temps de montée ;

V_{co} : Tension du circuit ouvert (V) ;

V_i : la tension d'entrée ;

V_L : La tension aux bornes de l'inductance ;

V_{oc} : La tension à vide ;

V_{pm} : Tension nominale maximum en charge (V) ;

V_{pv} : Tension de sortie d'un panneau photovoltaïque ;

V_s : La tension de sortie ;

η : Le rendement du point de fonctionnement ;

α : Facteur de correction du générateur photovoltaïque ;

Introduction générale

Introduction générale

Introduction générale

Le monde aujourd'hui a besoin d'une énergie alternative qui ne soit pas épuisée et fondamentalement différente de l'énergie produite par les énergies fossiles (charbon, pétrole, gaz naturel, etc.), mais sa surconsommation est économiquement coûteuse et menace l'environnement avec des dommages qui se traduisent par le réchauffement climatique. Et la pollution de toutes sortes, air, mer et terre. Par contre de nombreux problèmes sont confrontés pour répondre aux besoins énergétiques, en particulier ceux qui vivent dans les zones rurales des pays en développement.

Les caractéristiques de l'énergie photovoltaïque l'indépendance et la fiabilité, il est adapté à différentes énergies, et il apporte également des solutions de vie telles que: l'éclairage public et domestique, le pompage d'eau pour la boisson et l'irrigation, et les ventilateurs domestiques pendant la présence de chaleur, et grâce à ces caractéristiques, il est possible d'installer ses panneaux dans des zones isolées et d'autres autres zones qui ont un climat ensoleillé.

La conversion photoélectrique de l'énergie solaire en énergie électrique est l'une des conversions les plus intéressantes et se caractérise par une durée de vie relativement longue car elle provient de ressources naturelles (le soleil), elle est donc considérée comme une conversion directe et indépendante, ce qui permet une maintenance facile, et trouve également la préférence dans les installations situées dans des sites isolés et ensoleillés car elle consomme de l'énergie petits et moyens.

Notre travail se divise en trois chapitres :

Le Premier chapitre qui comprend des généralités sur les systèmes photovoltaïques, ensuite le chapitre 2 dont on a cité les différents types convertisseurs DC-DC et la commande MPPT, et finalement le chapitre 3 qui consiste a amélioré l'algorithme P&O par l'intégration d'un contrôleur a logique floue.

Chapitre I :

Généralités sur les systèmes photovoltaïques

Chapitre I : Généralités sur les systèmes photovoltaïques

I.1 Introduction

L'énergie photovoltaïque PV est l'une des sources d'énergie les plus importantes des énergies renouvelables qui attirent de plus en plus l'attention ces dernières années. Les principaux avantages de l'énergie photovoltaïque sont : très propre relativement aux autres énergies, capacité de puissance élevée par unité de poids, grande modularité et faible entretien.

Dans notre chapitre nous allons détailler quelques généralités sur les systèmes photovoltaïques, en commençons par les avantages et les inconvénients de l'énergie solaire et on va définir la cellule photovoltaïque et ses différents types ainsi le principe de son fonctionnement ,après on va citer les caractéristiques d'un GPV et comment peut-on assurer la protection de l'installation électrique de ce dernier , l'influence de l'éclairement et la température , ainsi que les différents types d'installations photovoltaïques.

I.2 Généralités sur le système photovoltaïque

L'énergie solaire photovoltaïque provient de la conversion de la lumière en électricité au sein de matériaux semi-conducteurs comme le silicium. Ces matériaux ont la propriété de libérer leurs électrons sous l'influence d'une énergie extérieure induisant un courant électrique : C'est l'effet photovoltaïque. L'énergie produite est utilisée sous forme d'électricité directe ou stockée dans des batteries ou injectée dans le réseau domestique. Un générateur photovoltaïque est composé de plusieurs modules qui sont connectés soit en série, parallèle ou série /parallèle. Les performances d'une installation photovoltaïque dépendent de l'orientation des panneaux solaires et des zones d'ensoleillement dans lesquelles ils se trouvent [01].

I.3 Avantages et inconvénients de l'énergie solaire

En tant que source d'énergie électrique, un système photovoltaïque offre des avantages mais aussi des inconvénients.

I.3.1 Avantages du système photovoltaïque

Les installations photovoltaïques sont en général de haute fiabilité, peu sujettes à l'usure, elles demandent peu d'entretien ;

- Le montage des installations photovoltaïques est simple et les installations sont adaptables aux besoins de chaque projet ;
- Il s'agit d'une source d'énergie électrique totalement silencieuse ce qui n'est pas le cas, par exemple des installations éoliennes ;
- Il s'agit d'une source d'énergie inépuisable ;
- L'énergie photovoltaïque est une énergie propre et non-polluante qui ne dégage pas de gaz à effet de serre et ne génère pas de déchets ;
- La durée de vie d'une installation photovoltaïque n'est pas éternelle mais de l'ordre de 20 à 30 ans.

I.3.2 Inconvénients du système photovoltaïque

Chapitre I : Généralités sur les systèmes photovoltaïques

- Les rendements des panneaux photovoltaïques sont encore faibles ;
- Dans le cas d'une installation photovoltaïque autonome qui ne revend pas son surplus d'électricité au réseau, il faut inclure des batteries dont le coût reste très élevé ;
- Le niveau de production d'électricité n'est pas stable et pas prévisible mais dépend du niveau d'ensoleillement. De plus, il n'y a aucune production d'électricité le soir et la nuit ;
- Le rendement des cellules photovoltaïques diminue avec le temps qui passe. On parle en général pour les panneaux photovoltaïques, d'une perte de rendement de 1 % par an.

I.4 Photovoltaïque en l'Algérie

Plusieurs projets photovoltaïques d'une capacité totalisant 800 MWc sont envisagés d'ici 2020. D'autres projets à petite échelle ont été réalisés, particulièrement par SONELGAZ. Ainsi, entre 1992 et 2005, 18 villages du sud algérien, soit environ 1.000 ménages, ont bénéficié d'installations photovoltaïques pour la satisfaction des besoins essentiels (éclairage, réfrigération, télévision, ventilation) en électricité [2].

Wilayas	Puissance crêt (Wc)	Nombre de systèmes	Type de systèmes			Nombre de foyers
			1.5Kwc	03Kwc	06Kwc	
Tamanrasset	277.5	60	3	23	34	555
Illizi	75	20	6	6	8	150
Tindouf	78	20	0	14	6	156
Adrar	22.4	08	1	7	0	45

Tableau I.1: Programme d'électrification rurale solaire dans les 4 wilayas du Sud [3].

Aussi installé plusieurs systèmes de plusieurs kW dans différentes régions du pays, comme le montre le tableau suivant :

Chapitre I : Généralités sur les systèmes photovoltaïques

Région	Usage	Puissance installée et système
Batna (Est Algérie)	Electrification de logements pour enseignants	10KWc
Oum El bouaghi	Pompage	5 systèmes dans différents sites de la région
Tiret	Eclairage, pompage, santé	Plusieurs systèmes
Centrale	Téléphonie rurale	8 relais de 160 w
Déférentes régions	Balisage aérien et signalisation	15 radio-bases dans plusieurs aéroports
Sud	Alimentation de relais hertziens	10 Systèmes de 2 kWc

Tableau I.2: Principales réalisations du CDER dans le domaine photovoltaïque [3].

I.5 Les cellules photovoltaïques

Les cellules photovoltaïques sont des composants électroniques qui produisent de l'électricité à partir de l'éclairement solaire. Elles sont très fines (environ 200 μm), mais une toute petite quantité suffit pour les fabriquer. Il y a entre 60 et 72 cellules photovoltaïques sur chaque panneau solaire [3].

I.5.1 Historique des cellules solaires

Quelques dates importantes dans l'histoire du photovoltaïque :

- **1839** : Le physicien français Edmond Becquerel découvre le processus de l'utilisation de l'ensoleillement pour produire du courant électrique dans un matériau solide. C'est l'effet photovoltaïque.
- **1875** : Werner Von Siemens expose devant l'Académie des Sciences de Berlin un article sur l'effet photovoltaïque dans les semi-conducteurs. Mais jusqu'à la Seconde Guerre Mondiale, le phénomène reste encore une curiosité de laboratoire.
- **1954** : Trois chercheurs américains, Chapin, Pearson et Prince, mettent au point une cellule photovoltaïque à haut rendement au moment où l'industrie spatiale naissante cherche des solutions nouvelles pour alimenter ses satellites.
- **1958** : Une cellule avec un rendement de 9 % est mise au point. Les premiers satellites alimentés par des cellules solaires sont envoyés dans l'espace.
- **1973** : La première maison alimentée par des cellules photovoltaïques est construite l'Université de Delaware.
- **1983** : La première voiture alimentée par énergie photovoltaïque parcourt une distance de 4000 km en Australie. [3]

Chapitre I : Généralités sur les systèmes photovoltaïques



Figure I.1 La première voiture alimentée par l'énergie photovoltaïque.

I.5.2 le fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

Pour expliquer le fonctionnement d'une **cellule photovoltaïque**, il faut reprendre quelques notions de physique. Le silicium, matériau principal de la cellule, est composé d'atomes. Ces atomes sont eux-mêmes composés d'un noyau et d'électrons qui gravitent autour de celui-ci.

Lorsque les électrons du silicium se retrouvent en contact de **photons** (particules de la lumière du soleil), ils s'agitent. Afin qu'ils circulent de façon à créer un courant électrique, il est nécessaire d'avoir **un pôle positif** et **un pôle négatif**, comme sur les piles électriques. Pour cela, le silicium est associé au **bore** pour obtenir le pôle positif, et au **phosphore** pour le pôle négatif (c'est le côté qui est face au soleil).

Grâce à ce système de pôles positif et négatif, les électrons se déplacent de façon naturelle entre les deux afin de rééquilibrer les charges. Cela crée un courant électrique [3].

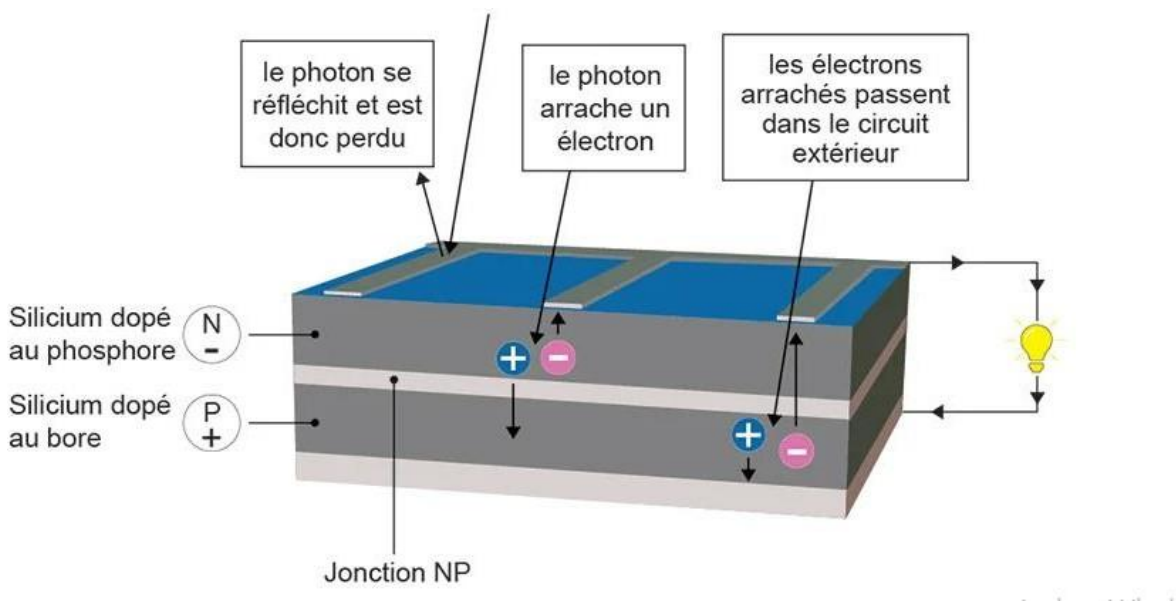


Figure I.2 schéma de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque [4].

I.5.3 Les différents types de cellules photovoltaïques

Il existe différentes sortes de cellules photovoltaïques. Même si elles fonctionnent globalement de la même manière, elles ont chacune leurs spécificités [5].

Chapitre I : Généralités sur les systèmes photovoltaïques

I.5.3.1 Les cellules en silicium monocristallin

On reconnaît les **cellules monocristallines** grâce à leur couleur très foncée. Il s'agit d'**un seul cristal de silicium**. Au sein d'un même module solaire, tous les cristaux de silicium sont orientés dans le même sens. Le rendement de ce matériau est supérieur à celui du silicium polycristallin, mais il est également vendu plus cher, car sa fabrication est plus délicate



Figure I.3 : Les cellules en silicium monocristallin.

I.5.3.2 Les cellules en silicium polycristallin

On reconnaît ces cellules à leur **couleur bleutée**. Elles sont composées de cristaux orientés dans **différentes directions** : c'est la raison pour laquelle leur couleur n'est pas homogène. À l'échelle mondiale, c'est le matériau photovoltaïque le plus utilisé, car il offre à ce jour le meilleur rapport qualité/prix. Les coûts de fabrication sont en effet inférieurs au silicium monocristallin. L'inconvénient majeur des cellules en silicium polycristallin est qu'elles ont un rendement inférieur à celle en silicium monocristallin. De ce fait, il est nécessaire d'en installer davantage pour produire une même quantité d'énergie.



Figure I.4 : Les cellules en silicium polycristallin.

Chapitre I : Généralités sur les systèmes photovoltaïques

I.5.3.3 Les cellules au silicium amorphe en couche mince

Il existe également des cellules au **silicium amorphe**, généralement de couleur marron ou gris foncé. Elles sont bien plus fines que les cellules en silicium cristallin. C'est une technologie utilisée depuis longtemps dans les petites calculatrices, mais leur rendement reste très faible. Elles ont aussi une durée de vie plus faible que les autres types de cellules : une dizaine d'années seulement, contre une trentaine pour le silicium monocristallin et polycristallin.

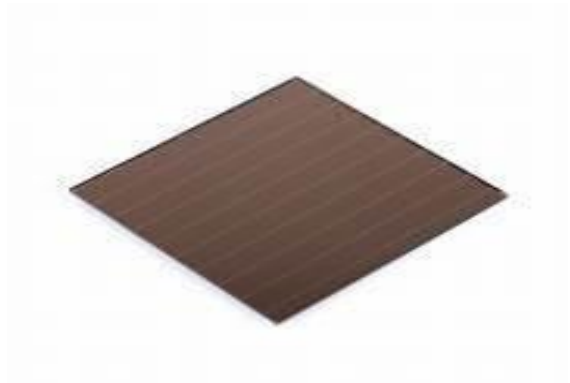


Figure I.5 : Les cellules au silicium amorphe en couche mince.

I.5.3.4 Les autres types de cellules photovoltaïques

Nous venons de vous présenter les trois types de cellules photovoltaïques les plus couramment utilisés. Il en existe d'autres, qui ne sont pas très exploitées, car encore majoritairement à l'état de recherche :

- Les **cellules organiques** ne sont pas des minéraux semi-conducteurs comme le silicium. Elles sont au contraire fondées sur des molécules ou des polymères de la chimie organique. Bien qu'elles commencent à connaître quelques applications, le rendement qu'elles produisent reste encore trop faible. Leur stabilité à long terme n'est pas non plus satisfaisante. Leur avantage est qu'elles pourraient en théorie être produites à bas coûts, comparé aux cellules au silicium.
- Les **pérovskites** sont un nouveau type de cellules, fondées sur un matériau hybride : une partie est organique, l'autre est inorganique. Leur rendement en laboratoire est assez prometteur, mais leur instabilité est aujourd'hui un frein à leur industrialisation. Leurs avantages seraient un coût de production bas, des cellules légères, souples et maniables, permettant d'être intégrées à différents types de revêtement [5].

Chapitre I : Généralités sur les systèmes photovoltaïques

I.5.4 Comparatif des différentes technologies

Matériau	Rendement	Longévité	Caractéristiques	Principales utilisations
Silicium mono Cristallin	12 à 18% (24,7% En laboratoire)	20 à 30 Ans	<ul style="list-style-type: none">• Très performant• Stabilité de production d'W• Méthode de production coûteuse et laborieuse	Aérospatiale, modules pour toits, façades
Silicium poly Cristallin	11 à 15% (19,8% en laboratoire)	20 à 30 Ans	<ul style="list-style-type: none">• Adapté à la production à grande échelle.• Stabilité de production d'W. Plus de 50% du marché mondial	Modules pour toits, façades, générateurs...
Amorphe	5 à 8% (13% En laboratoire)	Une dizaine d'années	<ul style="list-style-type: none">• Peut fonctionner sous la lumière fluorescente.• Fonctionnement si faible luminosité.• Fonctionnement par temps couvert.• Fonctionnement si ombrage partiel• La puissance de sortie varie dans le temps. En début de vie, la puissance délivrée est de 15 à 20% supérieure à la valeur nominale et se stabilise après quelques mois.	Appareils électroniques (montres, calculatrices...), intégration dans le bâtiment

Tableau I .3 : comparatif des différents matériaux PV [3].

Chapitre I : Généralités sur les systèmes photovoltaïques

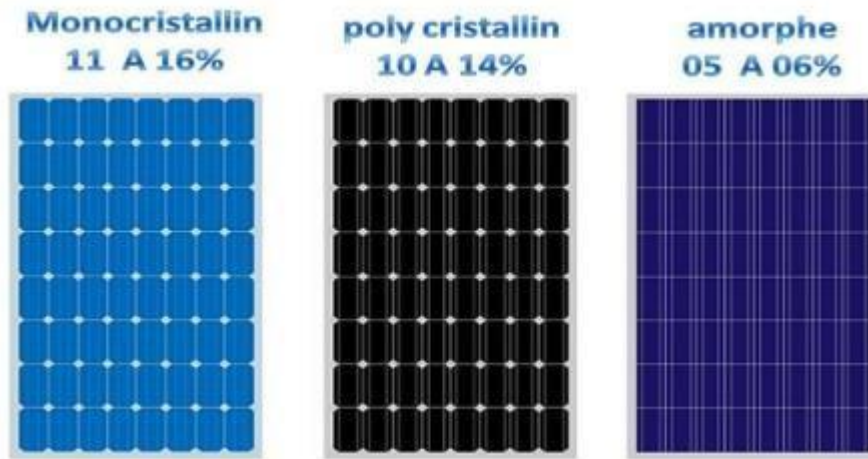


Figure I.6 type et rendement de PV [6]

I.6 Module photovoltaïque

La cellule solaire, unité de base d'un panneau solaire photovoltaïque, produit typiquement au maximum une puissance de 1,3 W pour une surface de 100 cm². Pour produire plus de puissance. Donc un générateur électrique de faible puissance est insuffisant pour la plupart des applications domestiques ou industrielles. Les générateurs photovoltaïques sont, de ce fait réalisés par association, en série et/ou en parallèle, d'un grand nombre de cellules ou des modules élémentaires. Une association de (N_s cellules) en série permet d'augmenter la tension du générateur photovoltaïque (GPV). Les cellules ou modules sont alors traversés par le même courant et la caractéristique résultante du groupement série est obtenue par addition des tensions élémentaires de chaque cellule (Figure I.7). L'équation (I.1) résume les caractéristiques électriques d'une association série de N_s cellules [7].

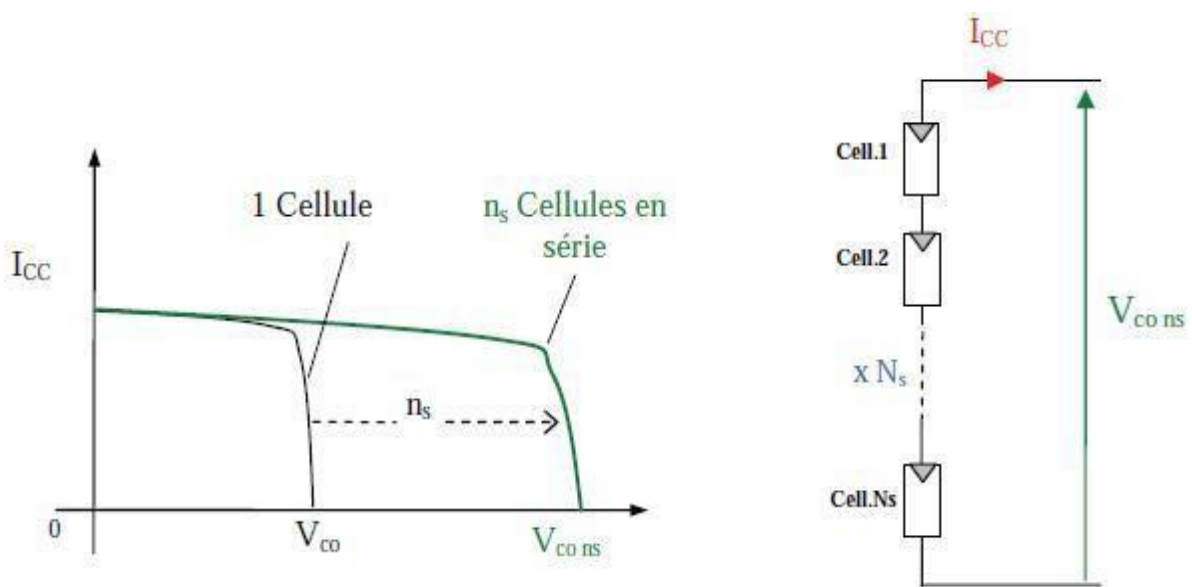


Figure 2.7 Association des cellules en série.

$$V_{co}(N_s) = N_s \times V_{co} \quad (I.1)$$

$V_{co}(N_s)$: Somme des tensions en circuit ouvert de N_s cellules en série ;

Chapitre I : Généralités sur les systèmes photovoltaïques

Ce système d'association est généralement le plus communément utilisé pour les modules photovoltaïques commercialisés.

Comme la surface des cellules devient de plus en plus importante, le courant produit par une seule cellule augmente régulièrement au fur et à mesure de l'évolution technologique alors que sa tension reste toujours très faible. L'association série permet ainsi d'augmenter la tension de l'ensemble et donc d'accroître la puissance de l'ensemble.

D'autre part, une association parallèle de N_p cellules est possible et permet d'accroître le courant de sortie du générateur ainsi créé (Figure I.8). L'équation (I.2) résume à son tour les caractéristiques électriques d'une association parallèle de N_p cellules. Dans un groupement des cellules identiques connectées en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et la caractéristique résultant du groupement est obtenue par addition des courants [7].

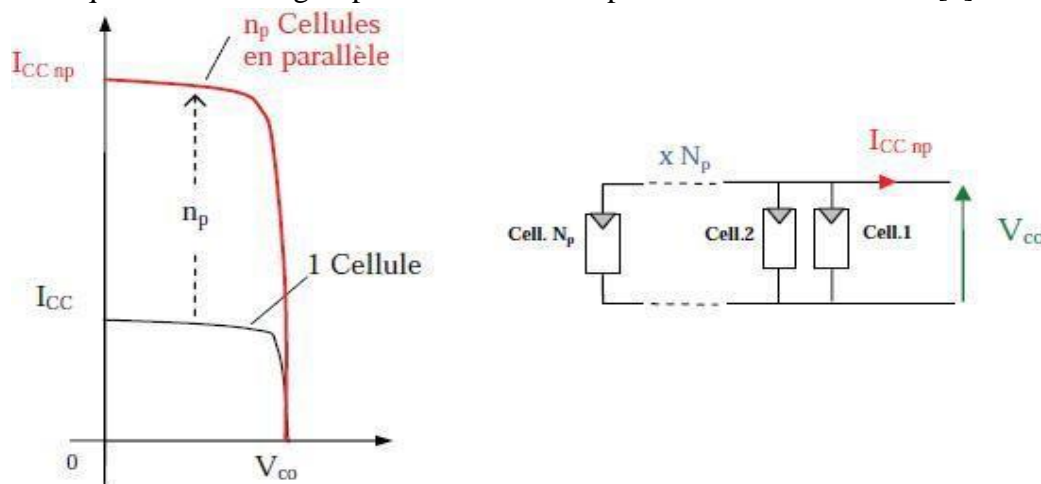


Figure I.8 Association des cellules en parallèle.

$$I_{cc}(N_p) = N_p \times I_{cc} \quad (I.2)$$

$I_{cc}(N_p)$: Somme des courants de court-circuit de N_p cellules en parallèle ;

L'association mixte (série et parallèle) des panneaux solaires permet d'augmenter la tension et le courant du générateur photovoltaïque (GPV) [7].

I.7 Caractéristique d'un générateur photovoltaïque (GPV) :

Dans notre simulation on décrit le panneau photovoltaïque APOS Energy AP 215M ; Voici ses principales caractéristiques techniques :

$V_{pm} = 29.36V$; $I_{pm} = 7.58A$; $V_{oc} = 35.94V$; $I_{sc} = 8.05A$; $N_{cell} = 60$; $P_{max} = 222.3W$

- La puissance de crête P_c : Puissance électrique que peut fournir le module dans les conditions standards ($25^\circ C$ et un éclairement de $1000 W/m^2$) ;
- La tension à vide V_{oc} : Tension aux bornes du module en l'absence de tout courant, pour un éclairement ;
- Le courant de court-circuit I_{cc} : Courant débité par un module en court-circuit pour un éclairement ;
- Le point de fonctionnement optimum (V_{pm}, I_{pm}) : lorsque la puissance de crête est :

Chapitre I : Généralités sur les systèmes photovoltaïques

$$P_{max} = V_{pm} \cdot I_{pm} \quad (I.3)$$

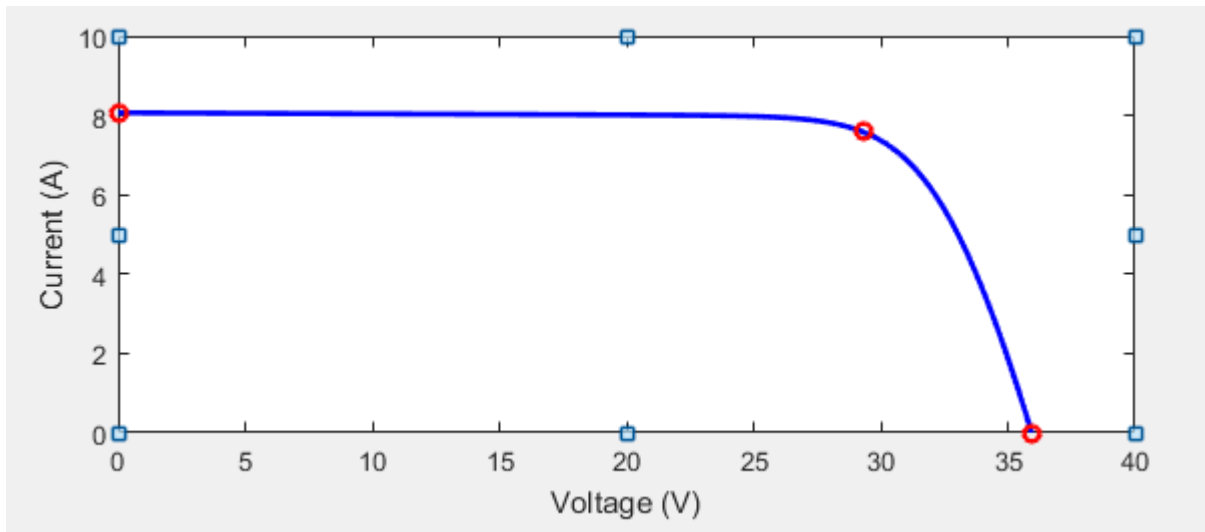


Figure I.9 Caractéristique « Tension-Courant » I(V) du panneau photovoltaïque APOS Energy AP 215M.

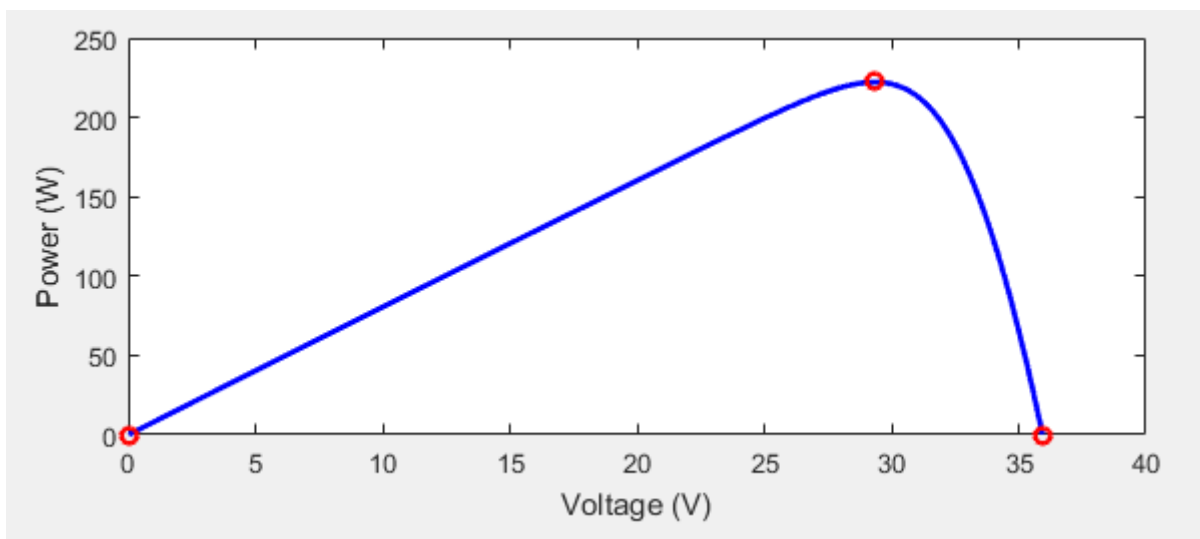


Figure I.10 Caractéristique « Tension-Puissance » P(V) du panneau photovoltaïque APOS Energy AP 215M.

I.8 Protection d'un GPV

La protection électrique de l'installation est nécessaire afin d'augmenter sa durée de vie, en évitant notamment des pannes destructrices liées à l'association des cellules et de leur fonctionnement. Pour cela, deux types de protection sont classiquement utilisés dans les installations actuelles :

- La protection en cas de connexions en parallèle ou série de modules PV pour éviter les courants négatifs dans les GPV (diode anti-retour) ;
- La protection lors de la mise en série de modules PV permettant de ne pas perdre la totalité de la chaîne (diode by-pass).

Chapitre I : Généralités sur les systèmes photovoltaïques

I.8 Influence de l'éclairement et de la température

- Premièrement, on va effectuer une simulation où nous avons maintenu la température constante à 25°C pour les différents éclairagements, Les figures (I.11, I.12) présentent une simulation du modèle du panneau photovoltaïque pour différents niveaux de rayonnement à une température constante.

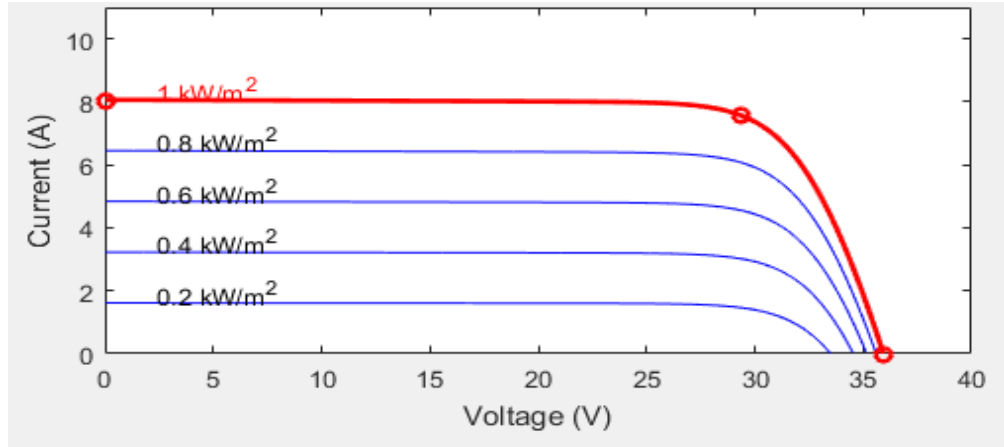


Figure I.11 Influence de la variation de l'éclairement sur la caractéristique «Tension-Courant».

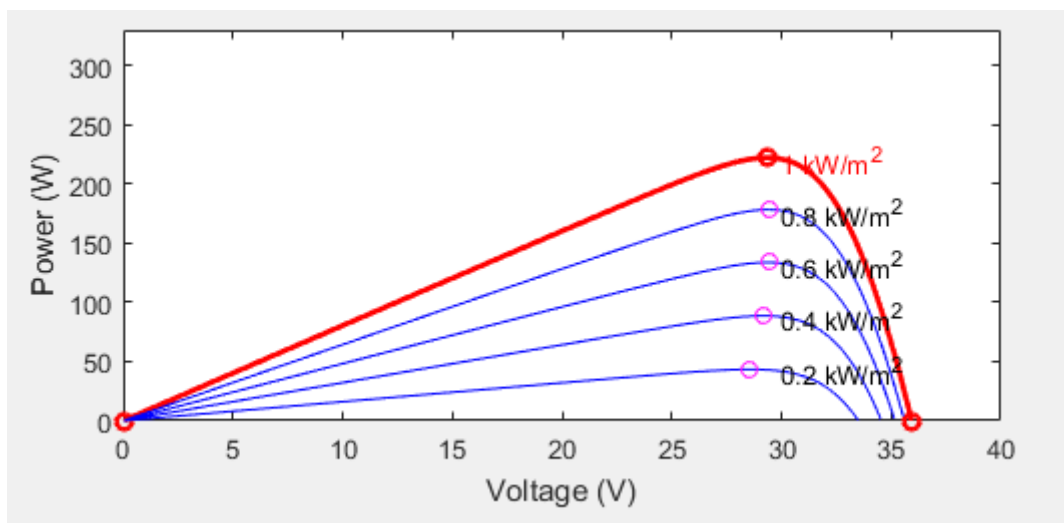


Figure I.12 Influence de la variation de l'éclairement sur la caractéristique « Tension - Puissance ».

On remarque l'accroissement du courant de court-circuit est beaucoup plus important que l'augmentation de la tension de circuit ouvert, car le courant de court-circuit est une fonction linéaire de l'éclairement et la tension du circuit ouvert est une fonction logarithmique, et on voit aussi que la tension diminue légèrement avec la diminution de l'éclairement.

La variation de l'éclairement affectera la puissance du panneau, nous obtenons (222W à 1000W/m² et 8A) et à 200W/m² qui descendent en dessous de 50W et 2A respectivement.

Donc, on conclure que l'éclairement influe directement sur la puissance de panneau photovoltaïque.

- Deuxièmement nous avons effectué une simulation où on a maintenu un rayonnement constant est de 1000W/m² pour différentes températures. Les figures

Chapitre I : Généralités sur les systèmes photovoltaïques

(I.12, I.13) présentent une simulation du modèle du panneau photovoltaïque pour différents niveaux de température à une l'éclairement constante.

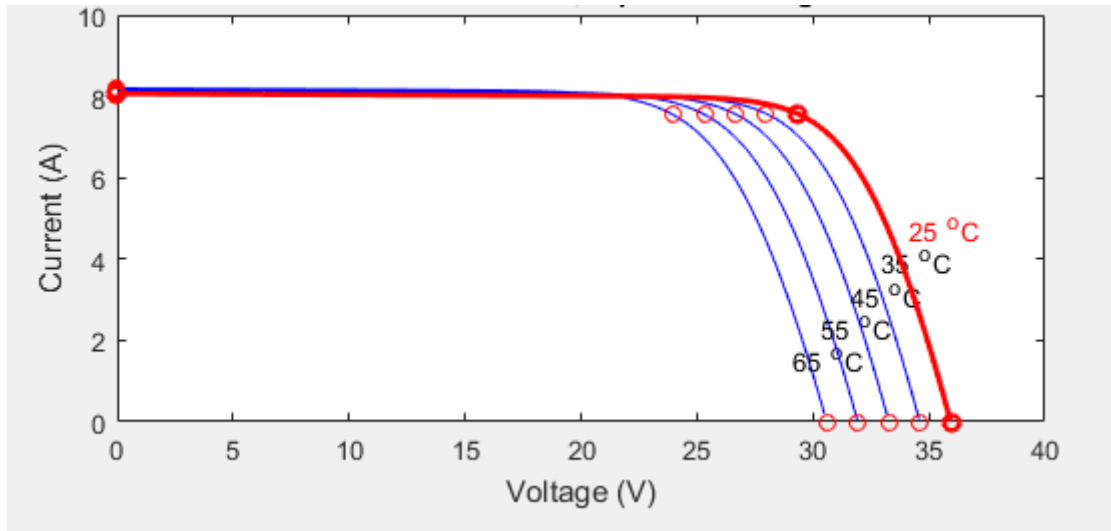


Figure I.12 Influence de la variation de la température sur la caractéristique « Tension-Courant ».

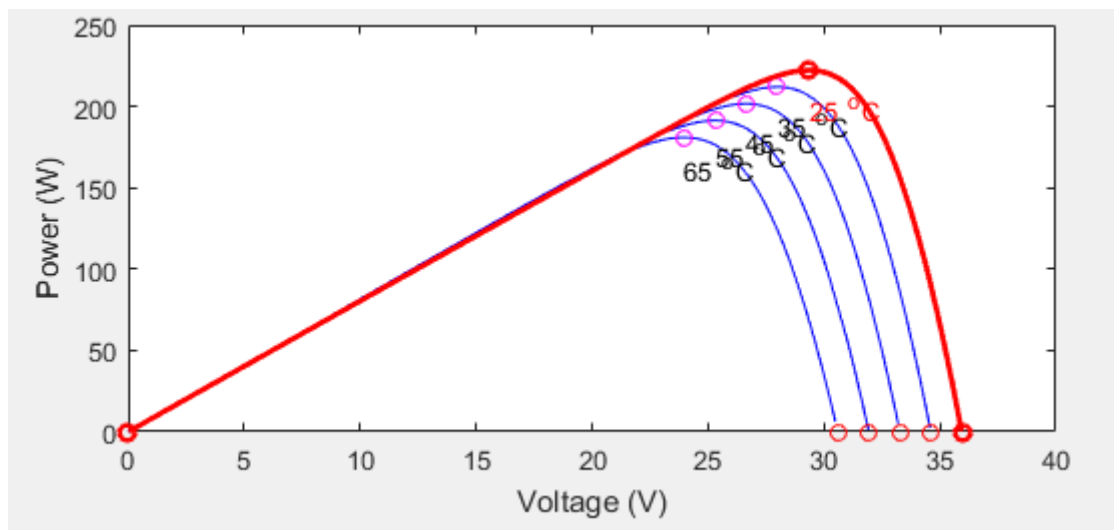


Figure I.13 Influence de la variation de la température sur la caractéristique « Tension-Puissance ».

On observe sur ces courbes que la variation de la température influence fortement sur la tension en circuit ouvert V_{oc} et la puissance. La figure I.13 montre que lorsque la température varie de 25°C à 65°C la tension en circuit ouvert V_{oc} diminue de 35.94V à 30.5V. Par contre la valeur du courant de court-circuit augmente légèrement avec l'augmentation de la température figure I.12.

Chapitre I : Généralités sur les systèmes photovoltaïques

I.10 Type des systèmes photovoltaïques

Il existe essentiellement trois types de systèmes photovoltaïques. Il s'agit du système PV connecté au réseau, du système autonome et du système hybride. La figure I.14 montre les différentes configurations d'un système photovoltaïque.

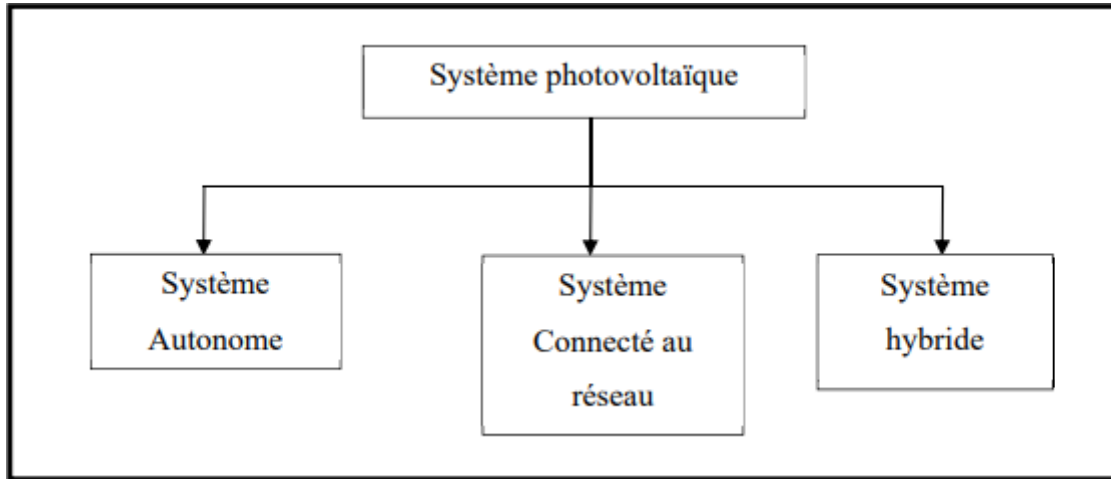


Figure I.14 Différentes configurations d'un système photovoltaïque.

I.10.1 Système photovoltaïque autonome

Les systèmes PV qui ne sont pas connectés au réseau électrique sont connus sous le nom de systèmes PV hors réseau et également appelés systèmes autonomes. Les systèmes directs utilisent l'énergie PV dès qu'elle est produite, tandis que les systèmes de stockage sur batterie peuvent stocker l'énergie pour l'utiliser plus tard, la nuit ou par temps nuageux. Ces systèmes sont utilisés en dehors des réseaux électriques, et peuvent servir à alimenter des stations de répéteurs radio, des cabines téléphoniques et l'éclairage public. La figure I.15 montre un système photovoltaïque autonome typique.

Chapitre I : Généralités sur les systèmes photovoltaïques

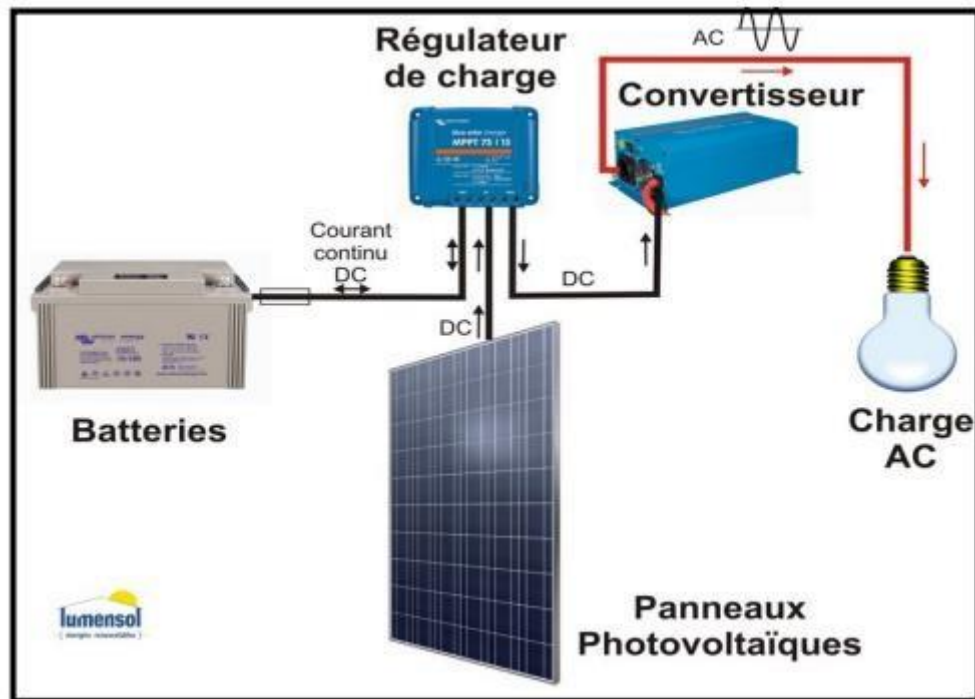


Figure I.15 Système photovoltaïque autonome.

Tirée de lumensol.fr [8].

I.10.2 Système photovoltaïque connecté au réseau

Ces systèmes sont connectés à un réseau électrique plus large. Le système PV est connecté au réseau électrique à l'aide d'un onduleur de haute qualité, qui convertit le courant continu du champ PV en courant alternatif conforme aux normes du réseau. Pendant la journée, l'électricité produite par le système est soit utilisée immédiatement, soit revendue à des sociétés de distribution d'électricité. Le soir, lorsque le système n'est pas en mesure de fournir de l'électricité immédiatement, l'électricité peut être rachetée du réseau, comme le montre la figure I.16.

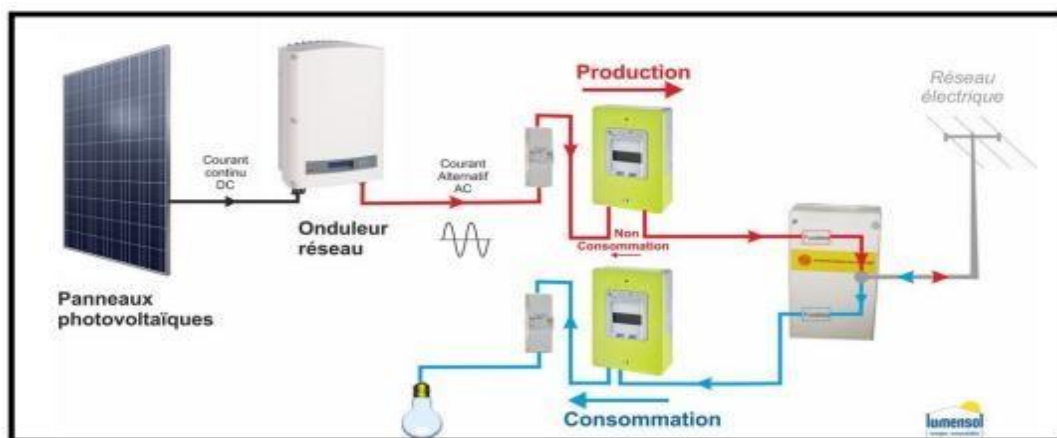


Figure I.16 Système photovoltaïque connecté au réseau.

Tirée de lumensol.fr [8].

Chapitre I : Généralités sur les systèmes photovoltaïques

I.10.3 Système photovoltaïque hybride

Un système hybride combine le PV avec d'autres formes de production d'énergie, généralement un générateur diesel. Le biogaz peut également être utilisé. L'autre forme de production d'énergie est généralement un type de générateur capable de moduler la puissance de sortie en fonction de la demande. Cependant, plus d'une forme d'énergie renouvelable peut être utilisée, par exemple l'éolien et le solaire. Un système hybride éolien-PV typique se compose d'une petite éolienne, d'un générateur photovoltaïque, d'un système de stockage approprié et de l'équipement électronique. La production d'énergie photovoltaïque permet de réduire la consommation du combustible non renouvelable. La figure I.17 montre un système hybride typique.

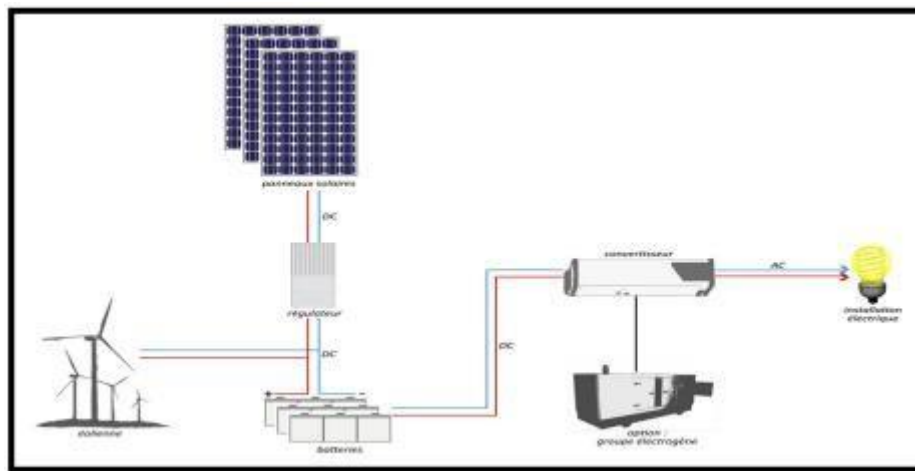


Figure I.17 Système photovoltaïque hybride.

Tirée de fmsolenergy.com [9].

I.11 Conclusion

Les performances d'un générateur photovoltaïque sont fortement influencées par les conditions climatiques, notamment l'éclairement solaire et la température. Dans ce chapitre, nous avons étudié les caractéristiques d'un générateur photovoltaïque ainsi les différents types d'installation dans un système photovoltaïque.

Chapitre II :

**Convertisseur DC-DC et la commande
MPPT**

Chapitre II : Convertisseur DC-DC et la commande MPPT

II.1 Introduction

Les générateurs photovoltaïques ont des caractéristiques non linéaires (P-V) et peuvent atteindre un point de fonctionnement optimal unique lors des conditions d'éclairage uniformes. Le point de fonctionnement d'un générateur photovoltaïque (GPV) dépend directement de la charge à laquelle il est connecté. En effet, pour que le GPV fonctionne à puissance maximale, un étage d'adaptation doit être inséré entre l'alimentation et la charge. Celui-ci peut être un convertisseur DC/DC abaisseur ou élévateur.

Dans ce chapitre, on peut voir distinctement diverses topologies de convertisseurs DC/DC pour la création d'une interface de puissance. Dès que l'on a établi la configuration du convertisseur utilisé, on aborde également différentes méthodes MPPT qui permettent au générateur photovoltaïque (GPV) de fonctionner à sa sortie maximale.

II.2 Convertisseur DC/DC

Les convertisseurs DC/DC sont utilisés pour élever ou abaisser une tension continue (DC). Les convertisseurs DC/DC se composent de condensateurs, d'inductances et de commutateurs. Dans le cas idéal, tous ces dispositifs ne consomment aucune puissance active, d'où les bons rendements des hacheurs. Le commutateur est un dispositif semi-conducteur en mode (bloqué-saturé), habituellement c'est un transistor MOSFET. Si le dispositif semi-conducteur est bloqué, son courant est égal à zéro et par conséquent sa dissipation de puissance est nulle. Si le dispositif est à l'état saturé, la chute de tension à ses bornes sera presque égale à zéro et par conséquent la puissance perdue sera très infime. La régulation de la tension de sortie est obtenue par variation du rapport cyclique de l'élément interrupteur (l'élément de commutation). Pour cette raison, toute la conversion de puissance échangée doit être réalisée autour des composants de stockage d'énergie (inductance et condensateurs) et les commutateurs.

II.2.1 Convertisseur abaisseur (Buck)

Le convertisseur DC/DC permet d'adapter le point de fonctionnement du panneau à la charge, si la tension de sortie du convertisseur est inférieure au point nominal de fonctionnement du générateur PV [10]. Dans le cas d'un convertisseur statique de type abaisseur de tension (Buck), on peut exprimer sa tension d'entrée comme suit :

$$V_i = \frac{V_s}{D} \quad (\text{II.1})$$

Où :

V_i : la tension d'entrée.

V_s : la tension de sortie.

D : le rapport cyclique du convertisseur.

II.2.1.1 Principe de fonctionnement

Le convertisseur abaisseur utilise un interrupteur K (commutateur) entre la source d'entrée et la sortie (Figure II.1). Le fonctionnement de ce convertisseur peut être scindé en deux configurations [11].

Chapitre II : Convertisseur DC-DC et la commande MPPT

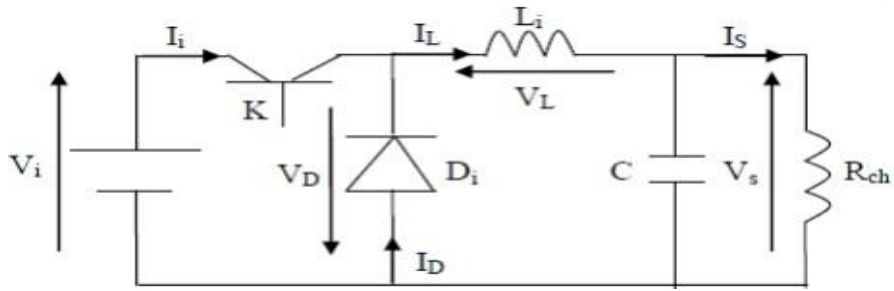


Figure II.1 Schéma de base d'un convertisseur Buck.

• l'état passant

Dans l'état passant, l'interrupteur K est fermé (Figure II.2), la tension aux bornes de l'inductance vaut

$$V_L = V_i - V_s \quad (\text{II.2})$$

Le courant I_L n'augmente pas instantanément, mais plutôt linéairement avec un taux d'accroissement imposé par l'inductance L_i .

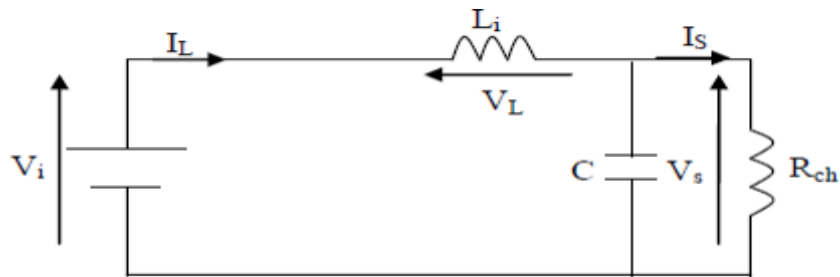


Figure II.2 Convertisseur Buck à l'état passant.

• l'état bloqué

Dans l'état bloqué, l'interrupteur K est ouvert (Figure II.3), la diode devient passante afin d'assurer la continuité du courant dans l'inductance.

La tension de sortie est :

$$V_s = -V_L \quad (\text{II.3})$$

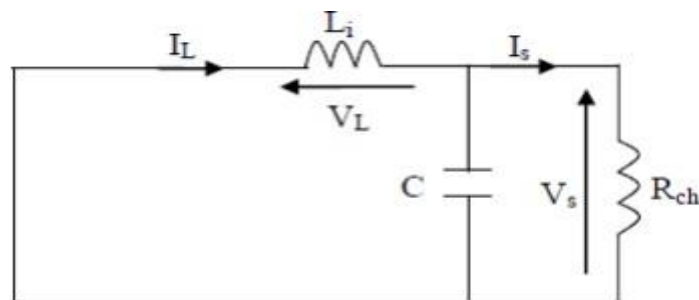


Figure II.3 Schéma du Buck (S fermé).

Chapitre II : Convertisseur DC-DC et la commande MPPT

II.2.2 Convertisseur élévateur (Boost)

La figure (II.4) présente le schéma fonctionnel du convertisseur Boost (élévateur). Il est couramment employé dans les systèmes alimentés par batterie nécessitant des tensions d'alimentation élevées [12]. Le rapport entre les tensions d'entrée et de sortie peut être exprimé par :

$$V_s = \frac{V_i}{1-D} \quad (\text{II.4})$$

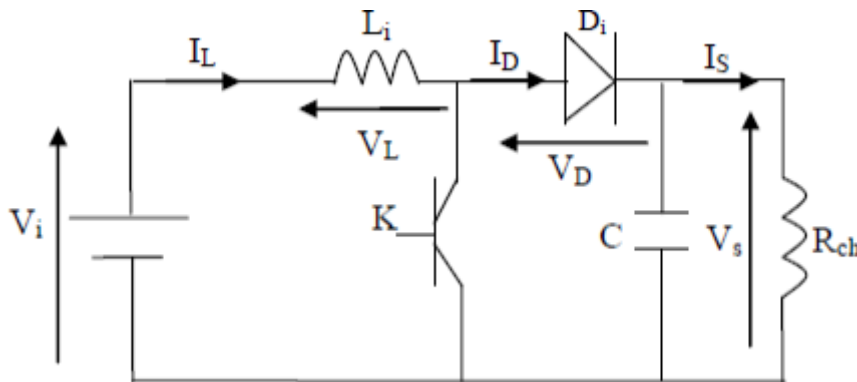


Figure II.4 Schémas de base d'un convertisseur Boost.

II.2.2.1 Principe de fonctionnement

Le circuit étant alimenté par une source de tension V_i , le fonctionnement d'un convertisseur Boost peut être divisé en deux phases distinctes selon l'état de l'interrupteur K [13].

• l'état passant

Lorsque l'interrupteur est fermé ($0 < t < DT$) (Figure II.5), le courant dans l'inductance augmente et l'énergie est emmagasinée sous forme d'énergie magnétique. La diode D_i est alors bloquée et la charge est déconnectée de l'alimentation.

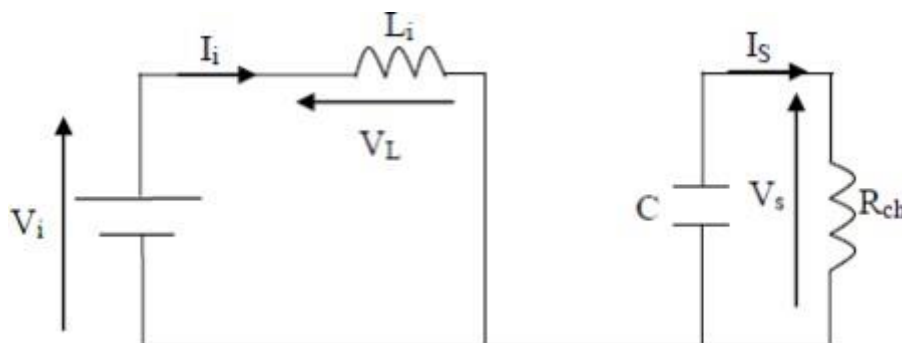


Figure II.5 Schéma du Boost (S fermé).

• l'état bloqué

A l'instant $t = DT$, l'interrupteur K s'ouvre (figure II.6), la diode est passante, le courant traverse l'inductance, le condensateur et la charge. Il en résulte un transfert vers la capacité de l'énergie accumulé.

Chapitre II : Convertisseur DC-DC et la commande MPPT

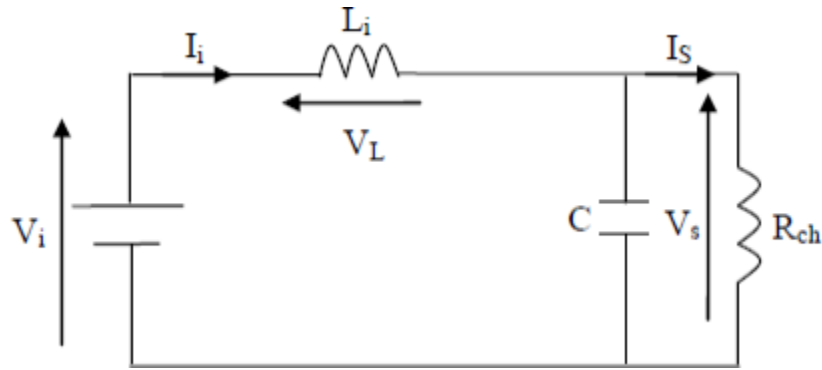


Figure II.6 Schéma du Boost (K ouvert).

II.2.3 Convertisseur abaisseur-élevateur (Buck-Boost)

Hacheur abaisseur-élevateur (Buck-Boost) combine les propriétés dans deux convertisseurs précédents, il est utilisé comme un transformateur idéal de n'importe quelle tension d'entrée pour avoir n'importe quelle tension à la sortie désirée, soit supérieure ou inférieure de celle de l'entrée selon le mode de commutation topologie de base de ce convertisseur [14], [15].

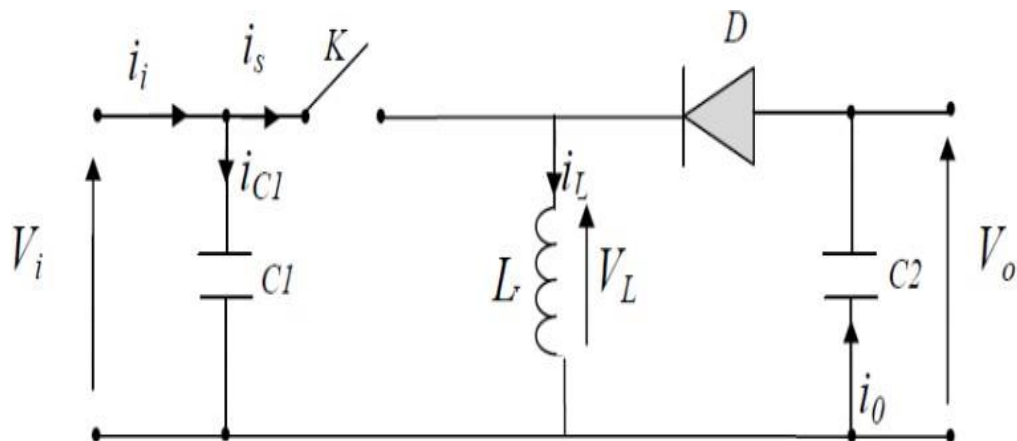


Figure II.7 Schéma du circuit électrique d'un hacheur abaisseur-élevateur (Buck-Boost).

$$V_s = \frac{a}{1-a} \cdot V_e \quad (\text{II.5})$$

II.3 La commande MPPT

La commande MPPT << Maximum Power Point Tracking >> est une méthode qui permet au générateur de fonctionner à sa puissance maximale quel que soit les conditions météorologiques d'ensoleillement et de température. Le principe de cette commande est basé sur la variation automatique du rapport cyclique α d'un convertisseur DC-DC à la valeur adéquate de manière à maximiser continuellement la puissance à la sortie du générateur photovoltaïque. (Figure II.8) [16].

Chapitre II : Convertisseur DC-DC et la commande MPPT

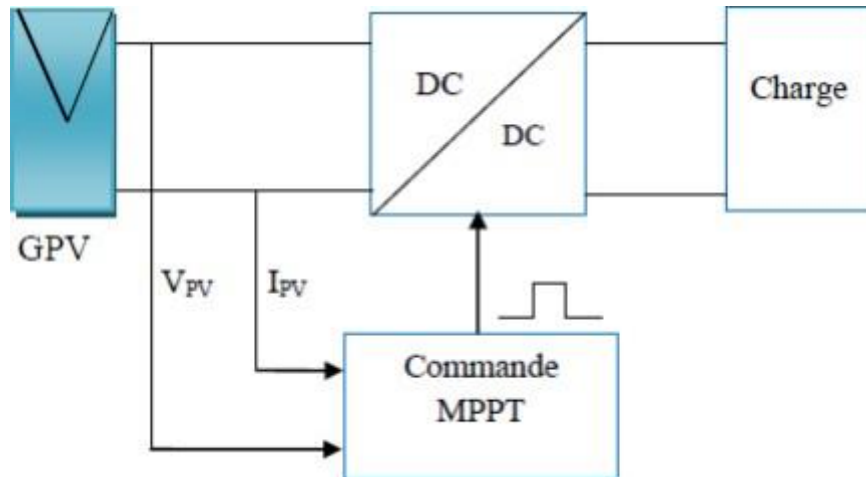


Figure II.8 schéma synoptique d'un système photovoltaïque.

II.3.2 Les techniques de recherche du point de puissance maximale

La littérature propose un certain nombre d'algorithmes de recherche de MPP dont plusieurs ont été élaborés il y a déjà quelques décennies [13]. Parmi ces méthodes, Les méthodes les plus couramment rencontrées sont appelées : Perturb & Observ (P&O), l'incrément de conductance (INC), Hill Climbing, Fraction de la Tension V_{co} (FCO), Fraction du Courant I_{cc} (FCC) et les commandes MPPT basées sur des défèrent méthode d'intelligence artificielle.

II.3.2.1 Commande "Hill Climbing"

La technique de contrôle nommée Hill Climbing [17] consiste à faire « monter » le point de fonctionnement le long de la caractéristique du générateur présentant un maximum. Pour cela, deux pentes sont possibles. La recherche s'arrête théoriquement quand le point de puissance maximale est atteint. Cette méthode est basée sur la relation entre la puissance du panneau et la valeur du rapport cyclique appliqué au convertisseur statique. Mathématiquement, le PPM est atteint lorsque dP/dD est forcé à zéro par la commande, comme le montre la figure (II.9).

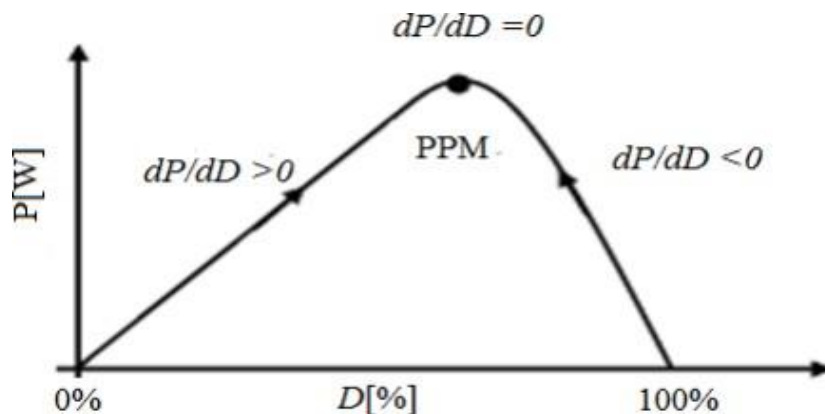


Figure II.9 Relation entre P et le rapport cyclique D du convertisseur statique.

Chapitre II : Convertisseur DC-DC et la commande MPPT

L'organigramme de cette méthode est illustré sur la figure (II.10). La variable Slope correspond à une variable qui prend la valeur « 1 » ou « -1 » suivant la direction que l'on doit donner à la recherche pour augmenter la puissance en sortie du panneau.

D et P représentent respectivement le rapport cyclique et la puissance du générateur, a symbolise la variable d'incrément du rapport cyclique. Périodiquement, la puissance P_n est comparée à la valeur déterminée précédemment P_{n-1} , en fonction du résultat de la comparaison, le signe de la valeur Slope change ou reste identique. Ce qui a pour effet d'incrémenter ou de décrémenter la valeur du rapport cyclique.

Une fois le PPM atteint, le système oscille autour de ce dernier indéfiniment rejoignant alors les compromis à faire entre rapidité et précision comme la méthode précédente et les pertes liées à ces oscillations.

L'avantage de cette dernière technique est qu'elle est simple à mettre en œuvre. Par contre, elle possède quelques inconvénients concernant des oscillations autour du PPM en régime établi et une perte occasionnelle de la recherche du PPM lors de changement rapide des conditions climatiques.

Ces imperfections sont mises en évidence par Weidong Xiao [17], à l'aide d'un tableau évaluant les performances de cette commande en termes, de temps de réponse et de puissance extraite en sortie du PV, pour différentes valeurs de la variable a.

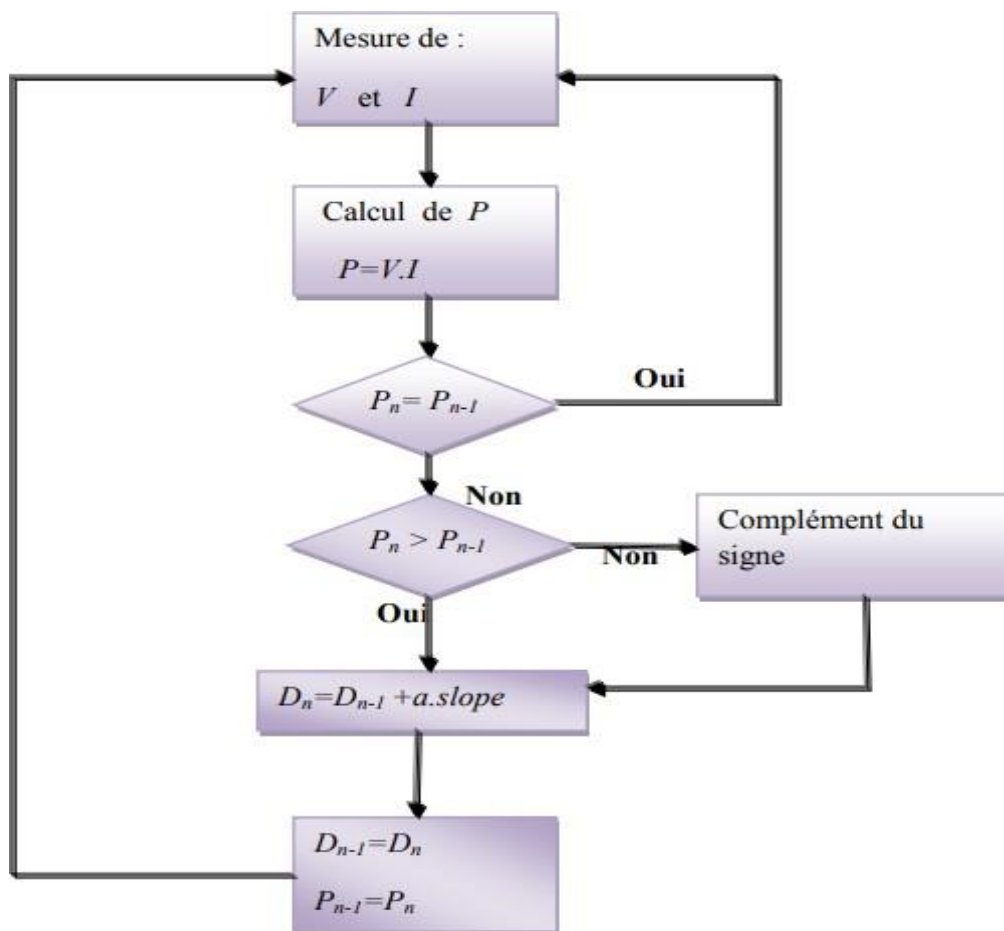


Figure II.10 Algorithme de la commande Hill Climbing.

Chapitre II : Convertisseur DC-DC et la commande MPPT

II .3.2.2 Approche de la Tension Constante (CV, Constant Voltage)

La méthode de tension constante également appelée la méthode de circuit ouvert (open circuit voltage) est basée sur la mesure en temps réel de la tension de circuit ouvert V_{OC} et la relation linéaire approximative (II.7) liant cette tension avec la tension de point maximal V_{MPP} du GPV [19-20].

$$V_{MPP} = K_1 * V_{OC} \quad (II.6)$$

Où k_1 est une constante de proportionnalité, il est généralement compris entre 0.71 et 0.86. Une fois que k_1 est déterminé, le V_{MPP} peut être calculé à l'aide de l'expression précédant (II.6) 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.

Le principe de cette méthode est basé sur la comparaison entre la tension du panneau photovoltaïque réelle V_{PV} et la tension de référence $V_{ref}(V_{MPP})$. Le signal d'erreur est traité pour rendre $V = V_{ref}$. (Figure II.11)

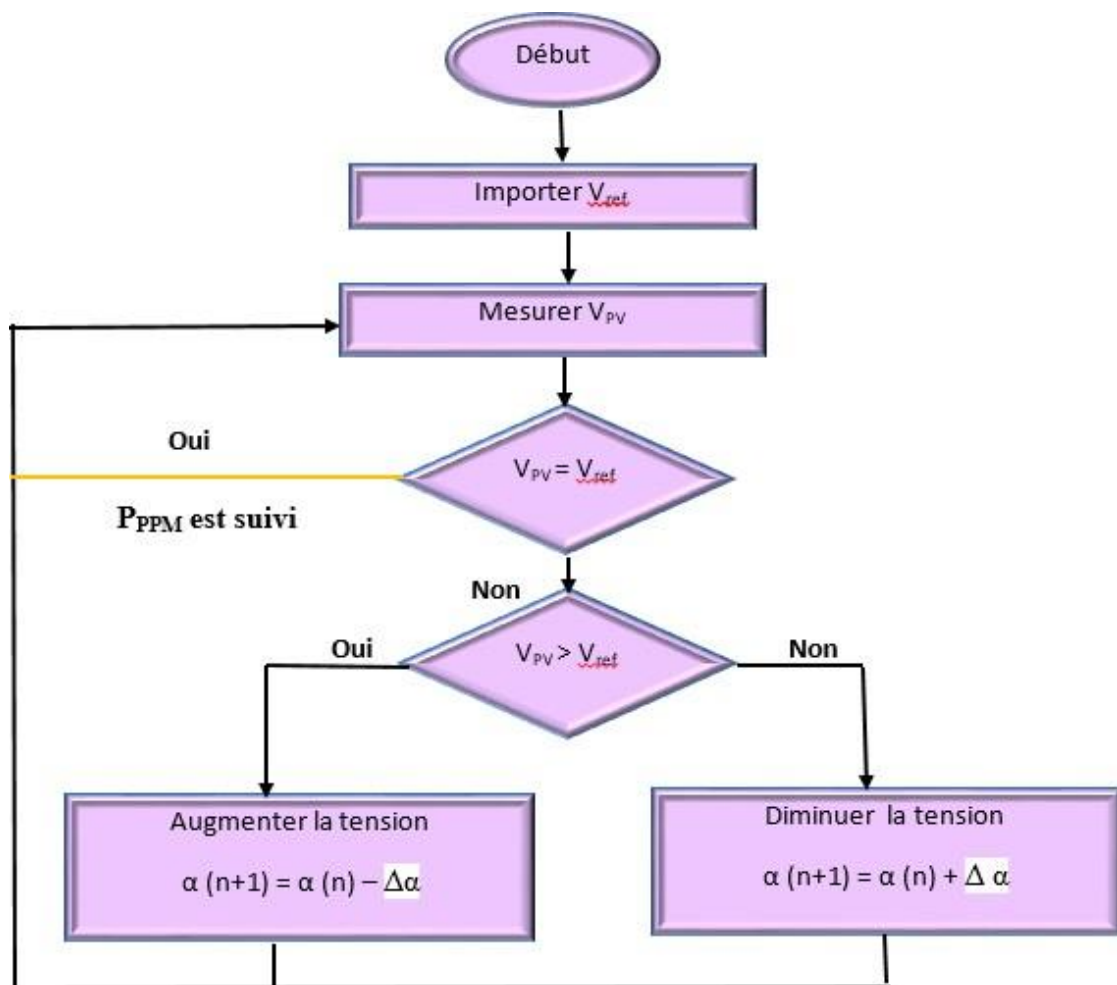


Figure II.11 Algorithme de la Tension Constante.

Chapitre II : Convertisseur DC-DC et la commande MPPT

II.3.2.3 Approche du Courant Constant (CC, Constant Current)

La méthode du Courant constant également appelée la méthode de court-circuit est basée sur la mesure en temps réel du courant de court-circuit I_{sc} (short-circuit current) relation (II.7) [19] :

$$I_{MPP} = k_2 * I_{sc} \quad (II.7)$$

Avec k_2 constante de proportionnalité généralement comprise entre 0.78 et 0.92 [21].

Pour cette valeur constante du 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 incrémenté ou décrémenté en fonction de la puissance obtenue. Pour que la tension et le courant MPP (I_{MPP}) correspondant, ce procédé est répété jusqu'à ce que la différence se situe dans la plage de tolérance [18]. Figure (II.12)

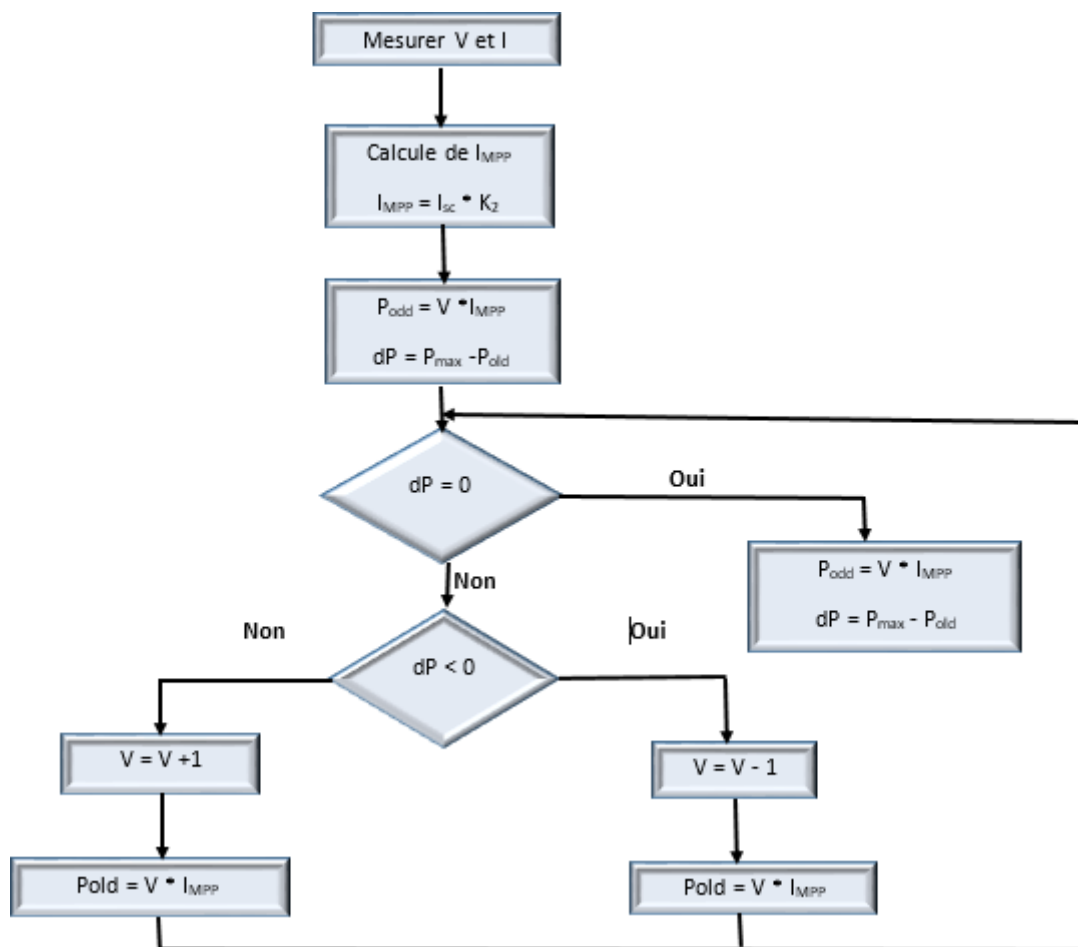


Figure II.12 Algorithme du constant courant.

II.3.2.4 La méthode Perturbation et Observation (P&O)

La méthode Perturbation & Observation (P&O) est l'une des méthodes les plus utilisées. C'est une méthode itérative permettant d'obtenir le MPP : le principe des commandes MPPT de type P&O consiste à perturber la tension V_{pv} d'une faible amplitude autour de sa valeur initiale

Chapitre II : Convertisseur DC-DC et la commande MPPT

et d'analyser le comportement de la variation de puissance P_{pv} qui en résulte. Ainsi, comme l'illustre la (figure II.13), on peut déduire que si une incrémentation positive de la tension V_{pv} engendre un accroissement de la puissance P_{pv} cela signifie que le point de fonctionnement se trouve à gauche du MPP. Si au contraire, la puissance décroît, cela implique que le système a déjà dépassé le MPP. Un raisonnement similaire peut être effectué lorsque la tension décroît. A partir de ces diverses analyses sur les conséquences d'une variation de tension sur la caractéristique P_{pv} (V_{pv}), il est alors facile de situer le point de fonctionnement par rapport au PPM, et de faire converger ce dernier vers le maximum de puissance à travers un ordre de commande approprié.

En résumé, si suite à une perturbation de tension, la puissance PV augmente, la direction de perturbation est maintenue. Dans le cas contraire, elle est inversée pour reprendre la convergence vers le nouveau PPM.

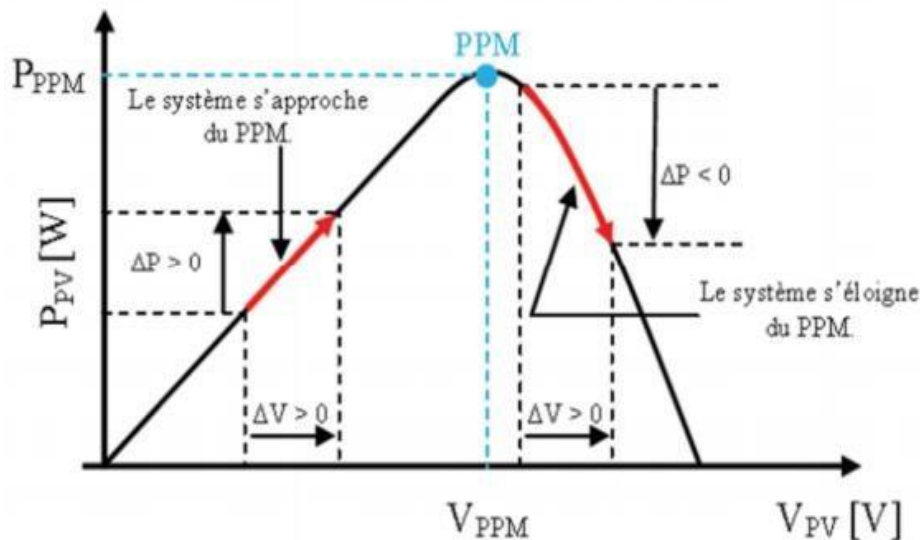


Figure II.13 Caractéristique P_{pv} (V_{pv}) d'un panneau photovoltaïque [17].

La figure (II.14) présente l'organigramme de la méthode Perturbe & Observe (P&O) où l'évolution de la puissance est analysée après chaque perturbation de tension. Pour ce type de commande, deux capteurs (mesurant le courant et la tension des panneaux PV) sont nécessaires pour déterminer la puissance du PV à chaque instant.

Chapitre II : Convertisseur DC-DC et la commande MPPT

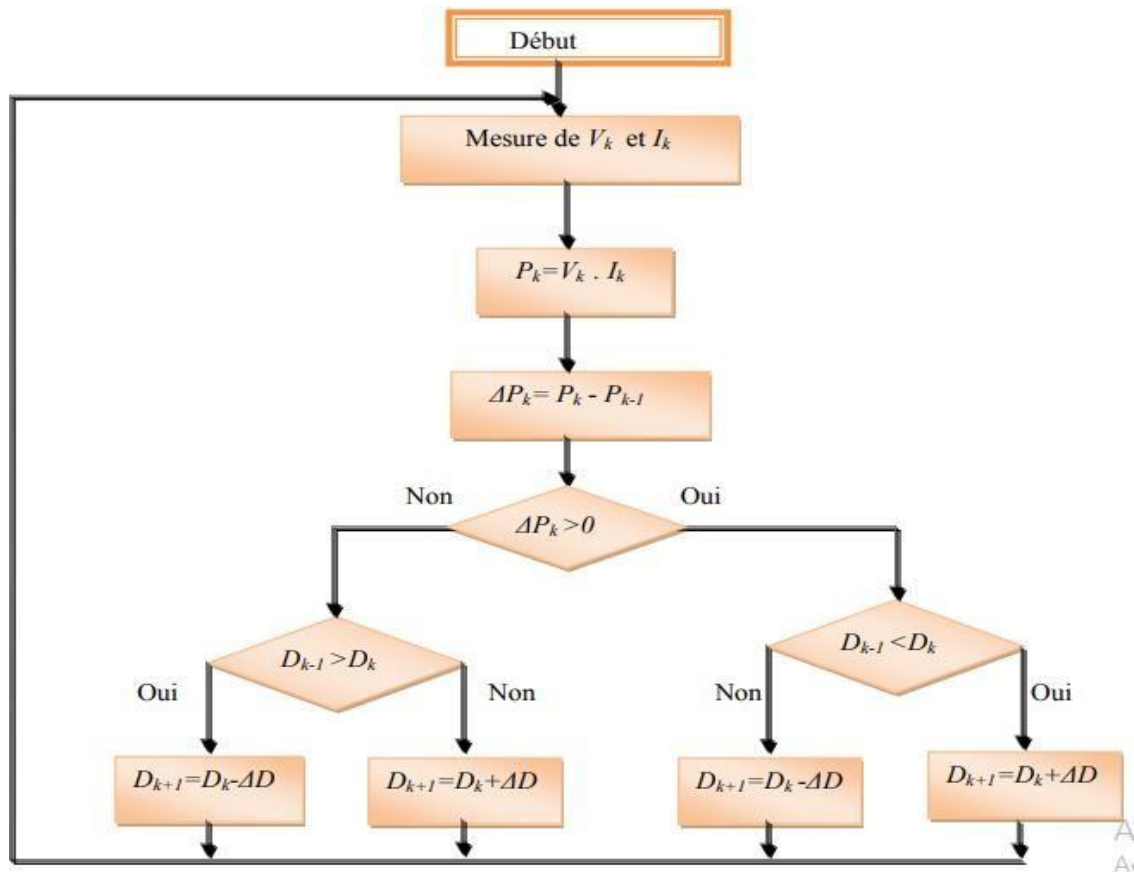


Figure II.14 Organigramme de la méthode perturbation et observation.

II.3.2.5 Méthode d'incrément de la conductance

Dans cet algorithme on calcule la dérivée de la puissance de sortie du panneau. Cette dérivée $\frac{dP}{dV}$ Est nulle au point de puissance maximale, positive à gauche et négative à droite du point MPP. Ainsi, la conductance du module photovoltaïque est définie par le rapport entre le courant et la tension du GPV comme indiqué ci-dessous :

$$G = \frac{I}{V} \quad (\text{II. 8})$$

Et une variation élémentaire (incrément) de conductance peut être définie par :

$$dG = \frac{dI}{dV} \quad (\text{II. 9})$$

La puissance du panneau solaire est donnée par :

$$P = V \times I \quad (\text{II.10})$$

La dérivée partielle $\frac{dP}{dV}$ est donnée par :

Chapitre II : Convertisseur DC-DC et la commande MPPT

$$\begin{aligned} \frac{dP}{dV} &= \frac{d(V \times I)}{dV} \\ \frac{dP}{dV} &= I \times \frac{dV}{dV} + V \times \frac{dI}{dV} \\ \frac{dP}{dV} &= I + V \frac{dI}{dV} \end{aligned} \quad (\text{II. 11})$$

On divise sur V :

$$\begin{cases} \frac{1}{V} \times \frac{dP}{dV} = \frac{I}{V} + \frac{V}{V} \times \frac{dI}{dV} \\ \frac{1}{V} \times \frac{dP}{dV} = \frac{I}{V} + \frac{dI}{dV} \end{cases} \quad (\text{II. 12})$$

D'autre part, l'évolution de la puissance du module (P) par rapport à la tension (V) donne la position du point de fonctionnement par rapport au PPM. Lorsque la dérivée de puissance est nulle, c.à.d. la conductance de la source G égale l'incrémentale de conductance ΔG de la source avec un signe moins ($\Delta G = -G$), cela signifie que l'on est sur le PPM, si elle est positive le point d'opération se trouve à gauche du maximum, lorsqu'elle est négative, on se situe à droite. La figure (II.15) permet d'écrire les conditions suivantes :

- Si $\frac{dP}{dV} > 0$: le point de fonctionnement est à gauche du PPM.
- Si $\frac{dP}{dV} = 0$: le point de fonctionnement est sur le PPM.
- Si $\frac{dP}{dV} < 0$: le point de fonctionnement est à droite du PPM.

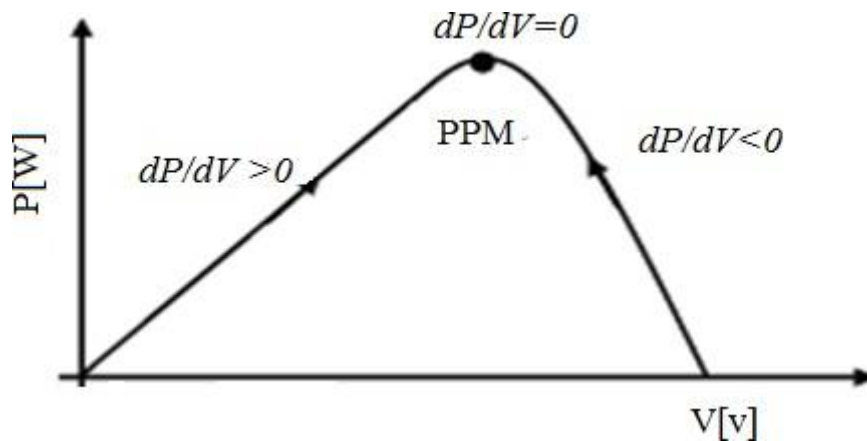


Figure II.15 Positionnement du point de fonctionnement suivant le signe de dP/dV sur caractéristique de la puissance.

Pour éviter que la différentielle dV de la tension du panneau ne devienne nulle, lorsque le MPP est atteint dans les précédents cycles ou par une stabilisation du point de fonctionnement, ce qui conduirait à une division par zéro, l'algorithme fait un test de dV . S'il est nul il teste si le $dI = 0$, si c'est le cas alors le PPM est atteint et l'algorithme ne fait aucun changement, dans

Chapitre II : Convertisseur DC-DC et la commande MPPT

le cas contraire l'algorithme teste le signe de dI pour déterminer la position du PPM et ajuste la tension de référence correspondante. La figure (II.16) donne l'organigramme de cet algorithme.

L'avantage de cet algorithme est qu'il n'oscille pas autour du PPM, à cause du test de $dI = 0$. L'algorithme se stabilise une fois le PPM est atteint et le signe de dI donne la vraie direction à emprunter pour le tracking du PPM une fois le système stable, ce qui conduit à une réponse rapide du système pour des changements brusques des conditions atmosphériques.

Mais à cause de l'approximation des dérivées dV et dI et l'utilisation d'un pas d'action constant, la condition $\frac{I}{V} = -\frac{dI}{dV}$ est rarement vraie ce qui conduit à des oscillations autour du PPM. Pour remédier à ce problème une erreur marginale ε est ajoutée aux conditions de MPP, c'est-à-dire que le MPP est atteint si $|\frac{I}{V} + \frac{dI}{dV}| \leq \varepsilon$ la valeur de ε est limitée entre le problème de non fonctionnement dans le MPP exacte et le problème de l'amplitude des oscillations. [22]

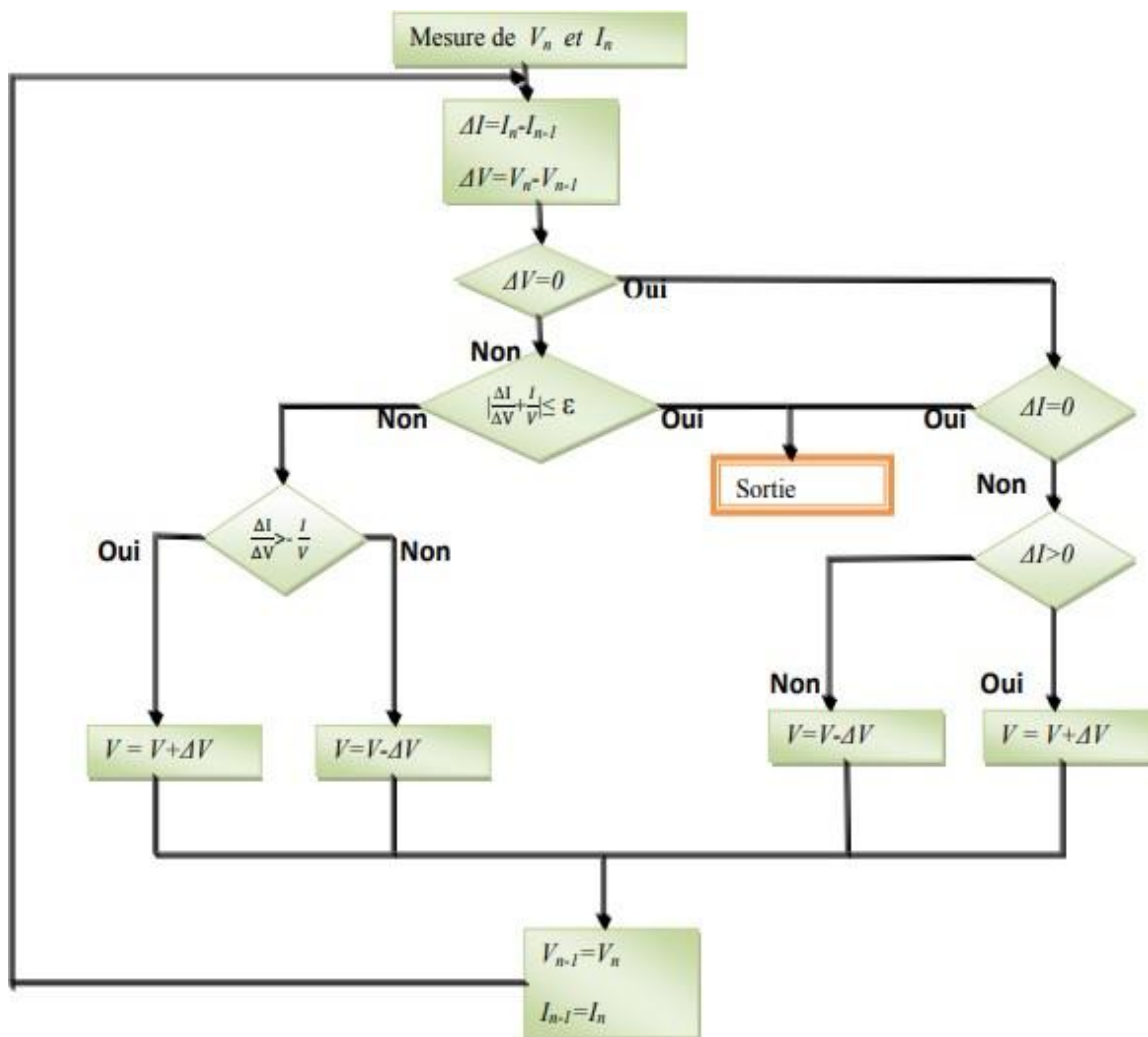


Figure II.16 Organigramme d'une commande MPPT basée sur la méthode incrément de conductance.

Chapitre II : Convertisseur DC-DC et la commande MPPT

II.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons entamé la partie la plus importante et la plus délicate de cette étude. Il s'agit de présenter le principe de la recherche du point de puissance maximale tout en donnant les différentes classifications des commandes MPPT. Nous avons détaillé les différentes méthodes MPPT rencontrées le plus souvent dans la littérature. L'existence de plusieurs types de commandes MPPT montre que ce domaine de recherche est en perpétuel évolution et qu'il est difficile de trouver une ou plusieurs solutions universelles.

Chapitre III

Application de l'algorithme P&O et de la logique floue
pour contrôler les systèmes PV

Chapitre III : Application de l'algorithme P&O et de la logique floue pour contrôler les systèmes PV

III.1 Introduction

L'extraction de la puissance maximale disponible peut être réalisée en suivant le point de puissance maximale sur la courbe puissance-tension (P-V) dans des conditions de fonctionnement variables telles que les changements d'irradiation, les changements de température et les changements de charge. Ce mécanisme de suivi détermine la meilleure valeur de tension du système et il est réalisé à l'aide du MPPT (Maximum Power Point Tracker). Le MPPT est l'intermédiaire entre les panneaux PV et le reste du système électrique. Il se compose d'un convertisseur de puissance DC-DC et d'un contrôle qui observe le courant et la tension PV et sur la base de l'algorithme perturbation & observation (P&O), ajuste le rapport cyclique du convertisseur de puissance Boost DC-DC. En effet, l'algorithme agit sur ce rapport afin d'avoir la bonne valeur pour des entrées (irradiation, température et charge) bien définies. Cet algorithme a connu beaucoup de succès au niveau de la mise en œuvre et la configuration. Toutefois il présente des limites au niveau du temps de suivi pour atteindre le point de puissance maximale (MPP) et parfois des sorties du système indésirables face à des changements brusques des conditions météorologiques.

Dans ce chapitre, nous proposons une nouvelle méthode d'optimisation qui combine deux méthodes P&O-FLC (perturb and Observ –with Fuzzy Logic Control) afin de réduire l'amplitude des oscillations autour MPP.

III.2 La logique floue

III.2.1 Définition de la logique floue

La logique floue a été créée par Lofti A. Zadeh en 1965 à partir de sa théorie des sous-ensembles flous. Les entités floues sont une façon mathématique de représenter l'imprécision du langage humain, elles peuvent être considérées comme une application de la théorie classique des ensembles. La logique floue est appelée aussi "logique linguistique" en raison du fait que ses valeurs de vérité sont des mots du vocabulaire courant : "plutôt vrai, plutôt faux, loin, assez loin, assez près, fort, faible...". La logique floue est utilisée pour étudier la représentation des connaissances incertaines, pour approximer le raisonnement et pour modéliser les notions vagues du langage naturel.

La logique floue fonctionne en désignant et en appliquant des règles qui combinent les entrées d'un expert avec les sorties souhaitées. Il existe généralement quatre étages déterminants de la logique floue : l'interface de fuzzification, la base de connaissance, le bloc d'inférence et l'interface de défuzzification. Ces quatre blocs sont expliqués ci-dessous. La figure III.1 montre la structure principale d'un système de logique floue.

Chapitre III : Application de l'algorithme P&O et de la logique floue pour contrôler les systèmes PV

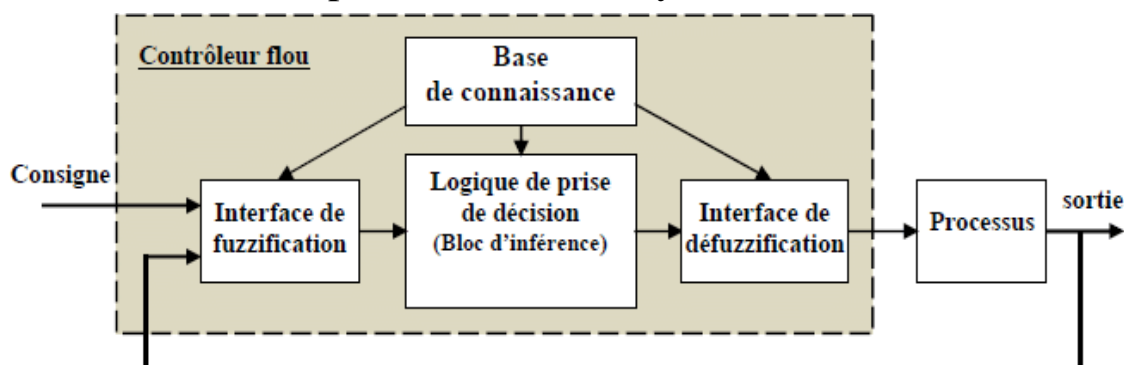


Figure III.1 Structure principale d'un contrôleur logique floue [23].

- L'interface de fuzzification transforme les entrées en des variables linguistiques que le bloc d'inférence peut ensuite utiliser pour désigner et suivre des règles.
- La base de connaissances comporte des règles Si-ALORS. Ces règles comprennent généralement des quantifications en logique floue effectuées par un expert afin d'atteindre un contrôle optimal.
- Le bloc d'inférence imite de manière optimale la prise de décision des experts en comprenant les informations et en les appliquant, toujours dans le but de contrôler de manière optimale les facteurs d'entrée.
- L'interface de défuzzification transforme les résultats du bloc d'inférence en entrées numériques utilisables qui seront des entrées du système (processus).

III.3.2 La fuzzification

La fuzzification est la première étape dans le FLC (Fuzzy Logic Controller) qui transforme une entrée classique en valeur linguistique. Des valeurs d'entrée sont traduites en concepts linguistiques représentés comme des ensembles flous. Pour faire sa il faut définir ce qu'on appelle des fonctions d'appartenance [24].

III.3.3 La fonction d'appartenance

La fonction d'appartenance est une représentation graphique de l'amplitude de participation de chaque entrée. Il existe de nombreux types de fonctions d'appartenance. Parmi eux, les deux les plus couramment utilisés dans la pratique sont des fonctions triangulaires, trapézoïdales, comme on peut définir d'autres formes de fonctions d'appartenance illustrées sur la figure III.2.

La fonction d'appartenance prend ses valeurs entre 0 et 1. Le nombre de fonctions d'appartenance à définir pour chaque variable linguistique est défini à l'aide d'expertise humaine. Plus l'univers de discours contient de sous-ensembles flous, plus le régulateur flou est précis [24].

Chapitre III : Application de l'algorithme P&O et de la logique floue pour contrôler les systèmes PV

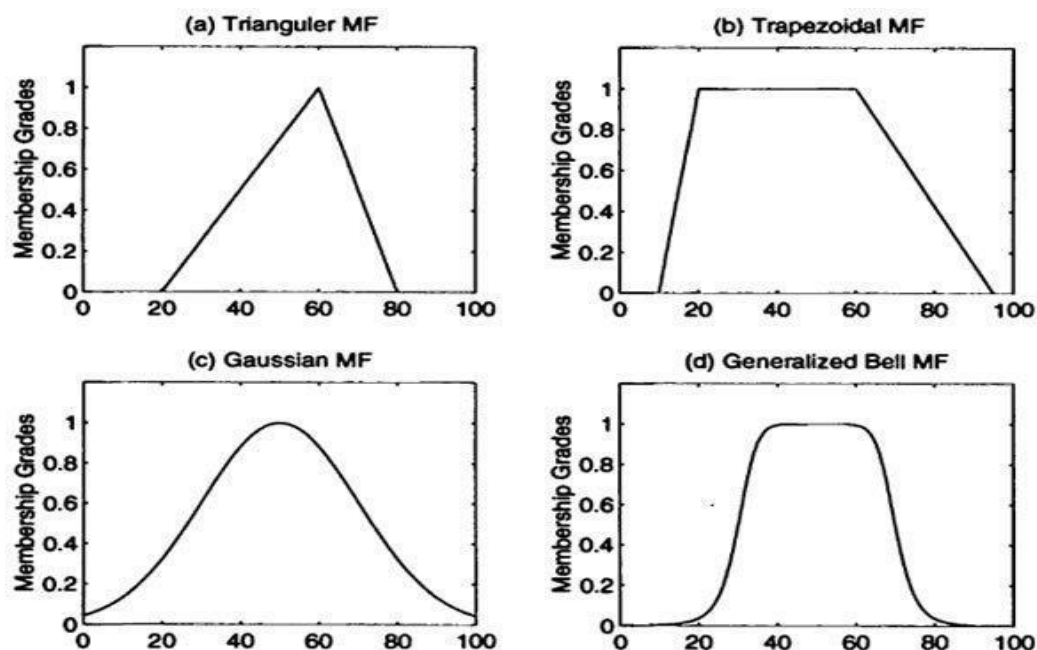


Figure III.2 Graphiques des différentes fonctions d'appartenance d'un contrôleur logique floue [25].

III.3.4 Les règles floues

Des règles floues sont développées pour contrôler les variables de sortie dans un système qui comporte un contrôleur logique floue. L'objectif principal des systèmes flous est de créer une base théorique permettant d'établir des hypothèses et des associations logiques entre des termes de référence inexacts. Dans les systèmes technologiques de logique floue, on appelle cela le raisonnement approximatif. Les principaux sujets et verbes de la logique floue sont constitués d'ensembles flous et d'opérateurs flous, ou d'énoncés de règles dites "Si-Alors". Ces derniers sont appliqués lors de l'élaboration des énoncés conditionnels "Si-Alors" qui constituent l'identité et la base de la logique floue. Ainsi, par exemple, si une règle floue affirme que si x est A, alors y doit être B si A et B sont des valeurs désignées par des ensembles flous stipulant une plage de X et Y, respectivement. Dans cette règle, la partie " Si " est considérée comme l'antécédent ou la prémisse, tandis que la partie " Alors " est désignée comme le conséquent conditionnel ou la conclusion. En fin de compte, une règle floue est, à la base, une règle Si-Alors qui comporte à la fois des conditions et une conclusion. Le processus de contrôle par logique floue part d'un ensemble de données d'entrée provenant d'un nombre quelconque de capteurs (tension, courant, irradiation, température) ; ces données sont ensuite introduites dans le système de contrôle. Simultanément, les valeurs de ces variables d'entrée subissent une modification appelée fuzzification, qui transforme les valeurs discrètes en une large gamme de valeurs. Les entrées floues sont ensuite mesurées par rapport à une série de règles de production, et les règles sélectionnées génèrent les sorties. Enfin, les données de sortie sont défuzzifiées par des commandes de contrôle.

Chapitre III : Application de l'algorithme P&O et de la logique floue pour contrôler les systèmes PV

III.3.5 La défuzzification

La défuzzification est l'étape qui consiste à transformer le sous-ensemble flou de sortie en une valeur non floue permettant la commande du procédé. L'entrée pour le processus de défuzzification est un ensemble flou et la sortie est un nombre unique qui doit être appliqué au système, pour la sortie finale souhaitée selon le système, une valeur non floue de sortie de contrôle est requise, donc une étape de défuzzification est obligatoire permettant la commande du procédé.

III.4 Simulation

III.4.1 modélisation du convertisseur DC-DC

Nous utilisons les valeurs des paramètres de convertisseur DC-DC suivants

<i>La composant</i>	<i>La valeur</i>	<i>Unité</i>
Capacité input	$C_1 = 4.10^{-3}$	<i>F</i>
Inductance	$L = 4.10^{-4}$	<i>H</i>
Capacité output	$C_2 = 5.10^{-5}$	<i>F</i>
Inductance de charge	$L_{charge} = 10^{-3}$	<i>H</i>
Résistance de charge	$R_{charge} = 12$	Ω
<i>Powergui</i>	$T_s = 5.10^{-6}$	<i>S</i>

Tableau III.1 les valeurs des paramètres de Convertisseur DC-DC.[25]

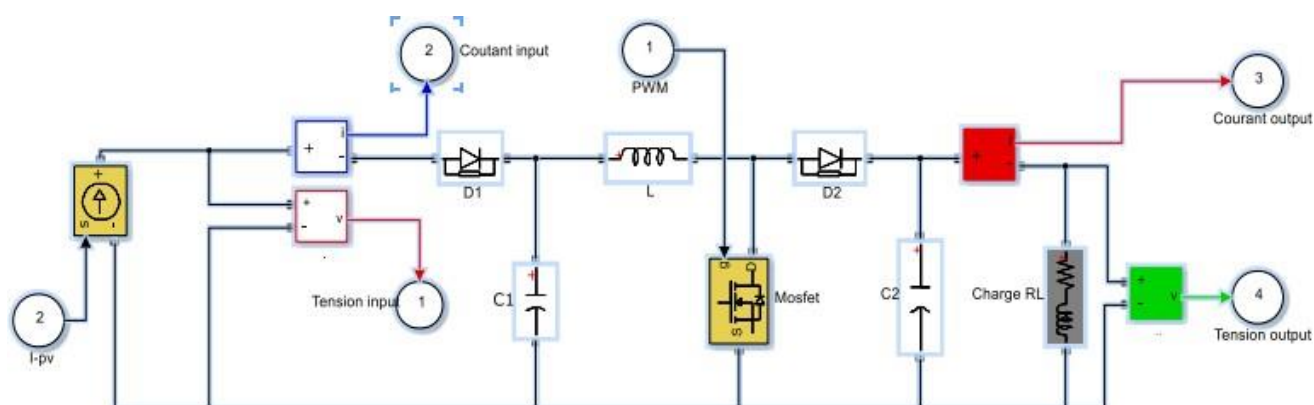


Figure III.3 Modélisation de Convertisseur DC-DC en Matlab/Simulink.

Chapitre III : Application de l'algorithme P&O et de la logique floue pour contrôler les systèmes PV

III.4.2 modélisation de de la Commande MPPT P&O en Matlab/Simulink

- Caractéristiques de panneau utilisé

Panneau photovoltaïque	
Cellules par module	Ncell=60
Tension du circuit ouvert	Voc=36.3V
Tension maximale à la MPP	Vmp=30.6V
Courant de court-circuit	Isc=8.71A
Courant maximal à la MPP	Ipm=8.17A
Puissance crête	Pmax =250 W

Tableau III.2 les Caractéristiques de panneau utilisé.

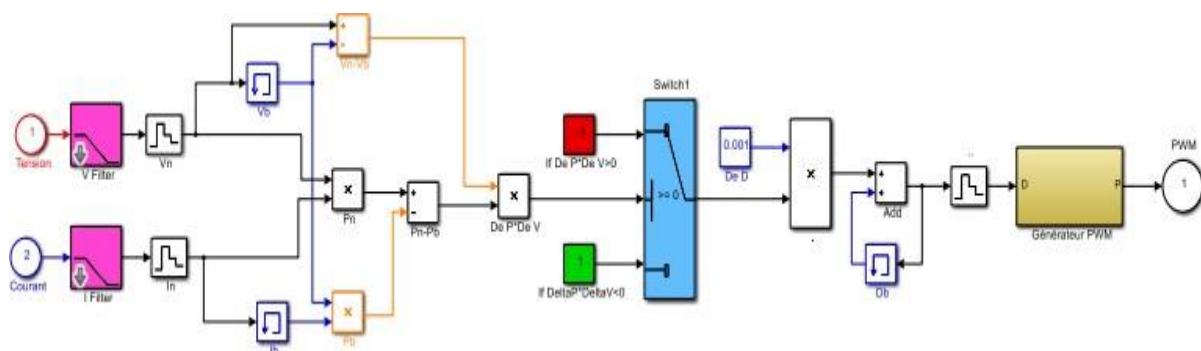


Figure III.4 Modélisation de Commande MPPT P&O en Matlab/Simulink.

Et après simulation, nous obtenons les courbes de tension et puissance et courant :

Chapitre III : Application de l'algorithme P&O et de la logique floue pour contrôler les systèmes PV

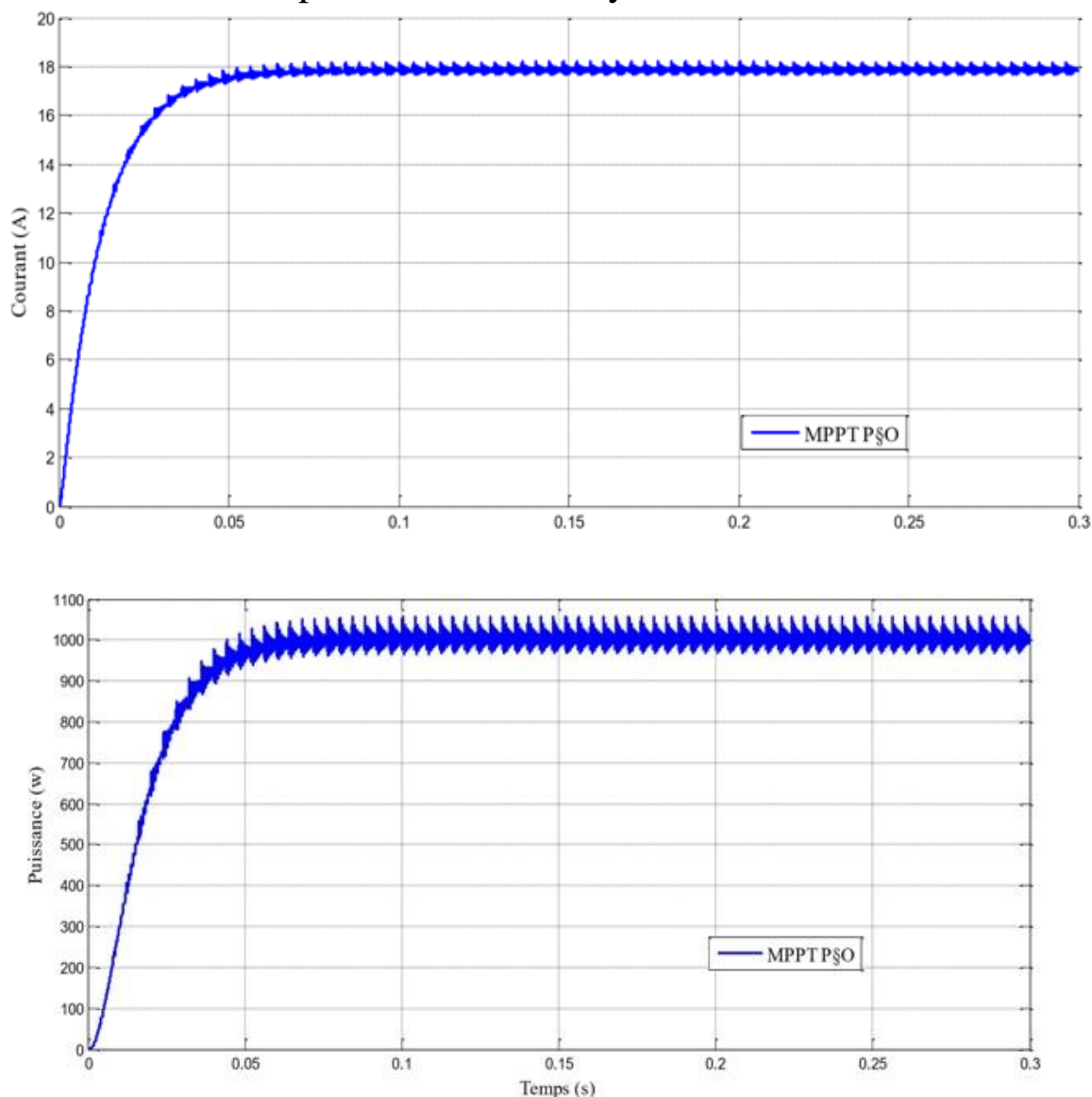


Figure III.5 Caractéristique $I(t)$ et $V(t)$ et $P(t)$ de GPV /par commande MPPT P&O.

➤ Remarques

Après avoir contacté la charge utile RL, nous notons que :

- La courbe de courant part de $t=0s$ jusqu'à ce qu'elle se stabilise au temps de montée $t_m \approx 0.05 s$ au point maximum $I_{max} \approx 17.42 A$ et continue à être stable.
- La courbe de puissance part de $t=0s$ jusqu'à ce qu'elle se stabilise au temps de montée $t_m \approx 0.05 s$ au point maximum $P_{max} \approx 1000 W$ et continue à être stable.

On note également qu'il existe une incertitude d'intensité variable dans toutes les courbes, qui est provoquée par le travail de Commande MPPT P&O.

Chapitre III : Application de l'algorithme P&O et de la logique floue pour contrôler les systèmes PV

III.4.3 modélisation générale de GPV avec la Commande MPPT P&O en Matlab/Simulink

Après avoir connecté tous les appareils, nous obtenons la forme générale, en commençant par le générateur photovoltaïque GPV connecté au convertisseur DC-DC auquel le contrôleur est commandé par MPPT P&O ; illustré sur la Figure III.6.

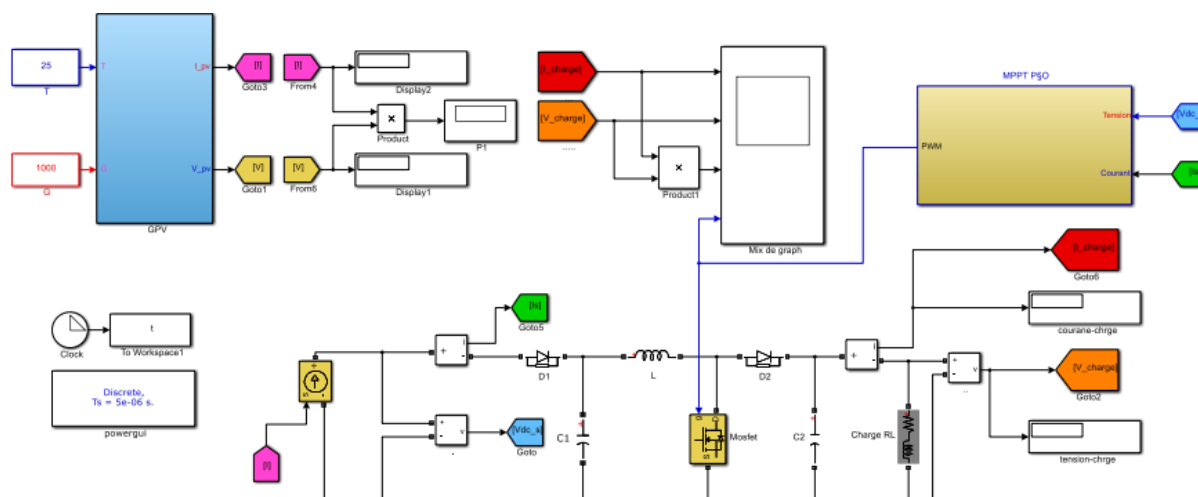


Figure III.6 Modélisation générale de GPV avec la Commande MPPT P&O en Matlab/Simulink.

III.4.4 Modélisation de Commande MPPT- Logique floue (FLC)

III.4.4.1 Structure de commande MPPT à base de logique floue

- **La fuzzification**

Dans cette étape, qui est appelée comme nous l'avons mentionné précédemment "l'étape de Fuzzification", Nous avons deux variables numériques qui ne sont pas floues et instables. Nous allons les traduire, changer leur valeur en variables de langage floues, et concevoir les entrées floues avec : 07 variables floues pour la première et deuxième variable.

Chapitre III : Application de l'algorithme P&O et de la logique floue pour contrôler les systèmes PV

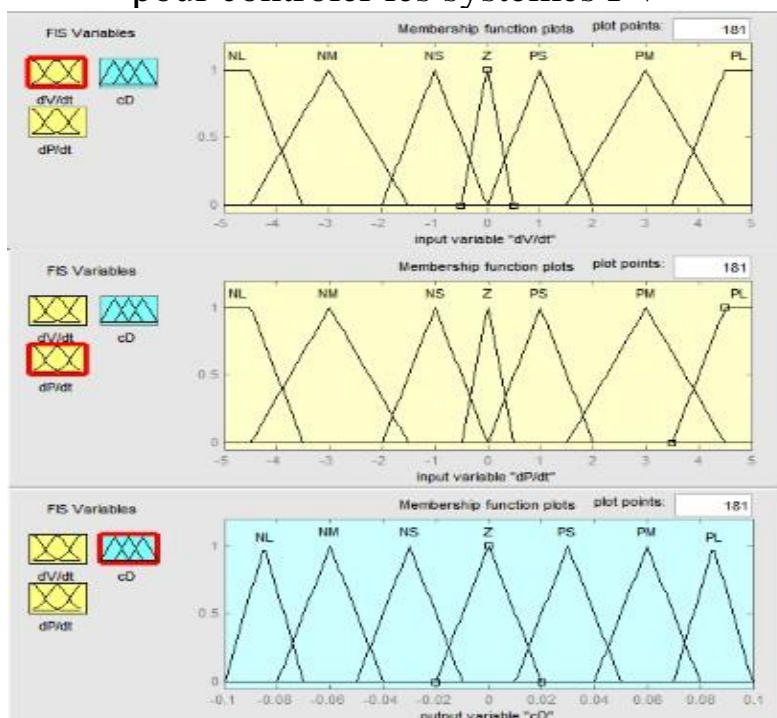


Figure III.7 les fonctions d'appartenance pour chaque changement de l'entrée et sortie.

• Inférence floue et règles linguistiques

Changement de rapporte cycle D		Changement de puissance PV (dP/dt)						
		NL	NM	NS	Z	PS	PM	PL
Changement de tension $PV(dV/dt)$	NL	NL	NL	NM	Z	PM	PL	PL
	NM	NL	NM	NM	Z	PM	PM	PL
	NS	NL	NM	NS	Z	PS	PM	PL
	Z	Z	Z	Z	Z	Z	Z	Z
	PS	PS	PS	PS	Z	Z	Z	Z
	PM	PM	PM	PS	Z	NS	NM	NL
	PL	PL	PL	PM	Z	NM	NL	NL

Tableau III.3 Les Règles de base utilisée en commande MPPT floue.

Chapitre III : Application de l'algorithme P&O et de la logique floue pour contrôler les systèmes PV

- La défuzzification

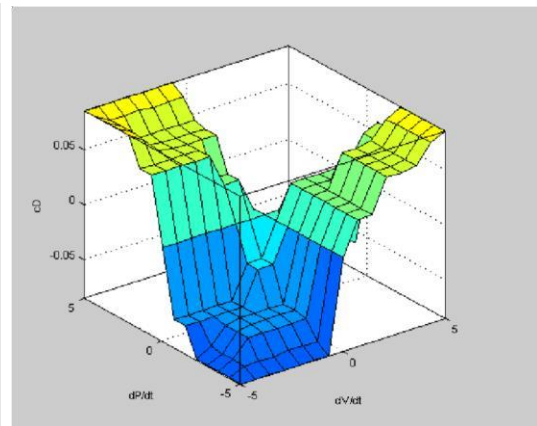
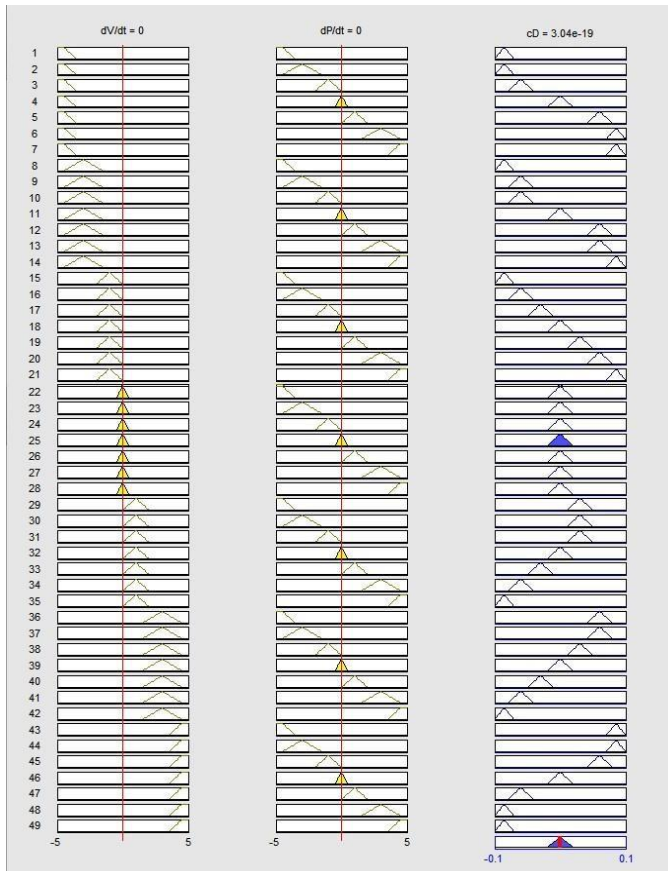


Figure III.8 Formes des règles et surface de sortie.

- Création du contrôleur floue et module global

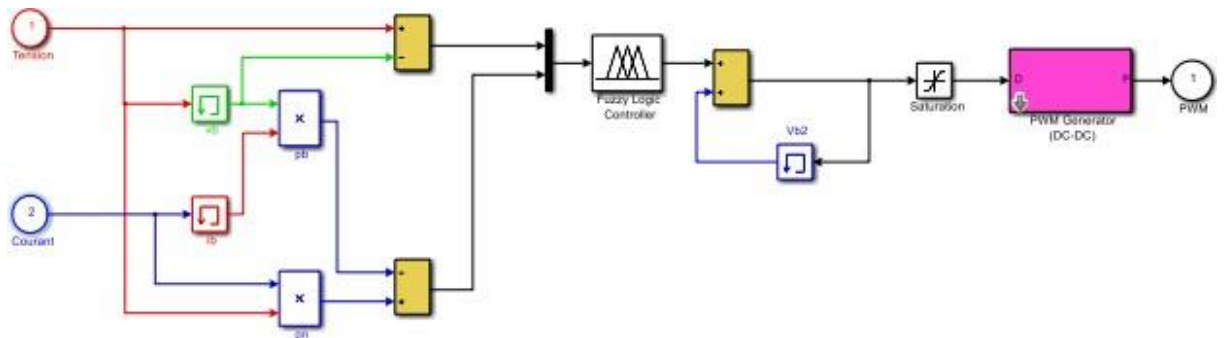


Figure III.9 Modalisation de Commande MPPT Logique Floue en Matlab/Simulink.

Et après simulation, nous obtenons les courbes de tension et puissance et courant :

Chapitre III : Application de l'algorithme P&O et de la logique floue pour contrôler les systèmes PV

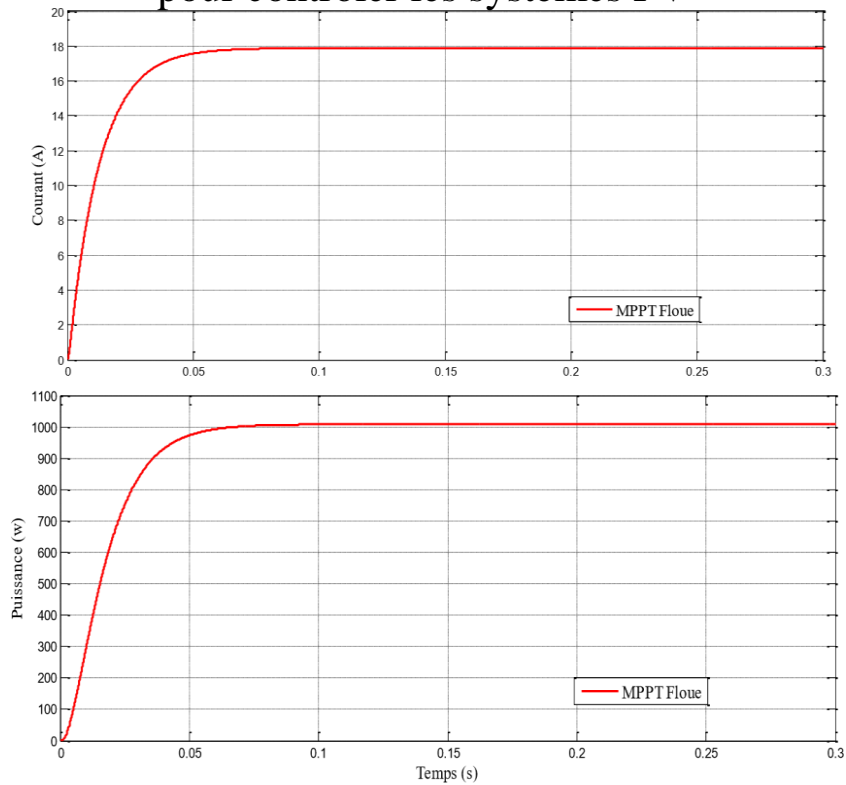


Figure III.10 Caractéristique $I(t)$ et $V(t)$ et $P(t)$ de GPV /par commande MPPT Floue

➤ Remarques

Après avoir connecté la charge utile RL et remplacer de commande MPPT P&O pour commande MPPT Floue, nous notons même remarque précédente de Figure (III.5) avec élimination de perturbation et petits diminuer de temps de montée.

Après avoir connecté tous les appareils, nous obtenons la forme générale, en commençant par le générateur photovoltaïque GPV connecté au convertisseur DC-DC auquel le contrôleur est commandé par MPPT Floue ; illustré sur la Figure (III.11).

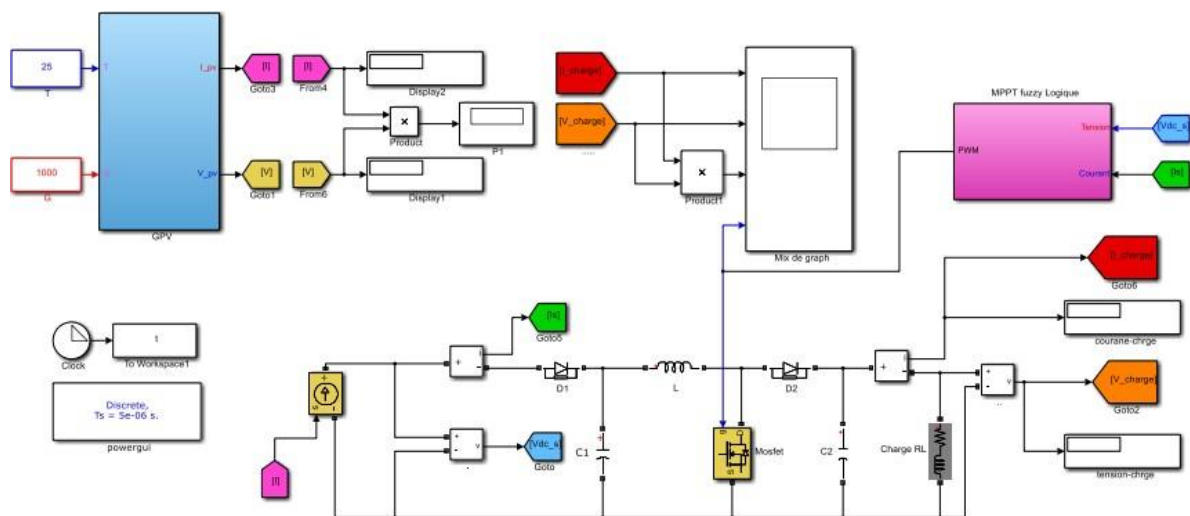


Figure III.11 Modélisation générale de GPV avec la Commande MPPT Floue en Matlab/Simulink.

Chapitre III : Application de l'algorithme P&O et de la logique floue pour contrôler les systèmes PV

III.5 Comparaison entre les deux résultats des puissances (MPPT P&O-MPPT Floue)

Le but de cette étude et simulation, après utilisation du contrôle MPPT P&O, est de constater l'amélioration qui se produit sur les caractéristiques de puissance $P(t)$ et courante $I(t)$ après utilisation du contrôle MPPT logique floue.

Les courbes suivantes illustrent cela :

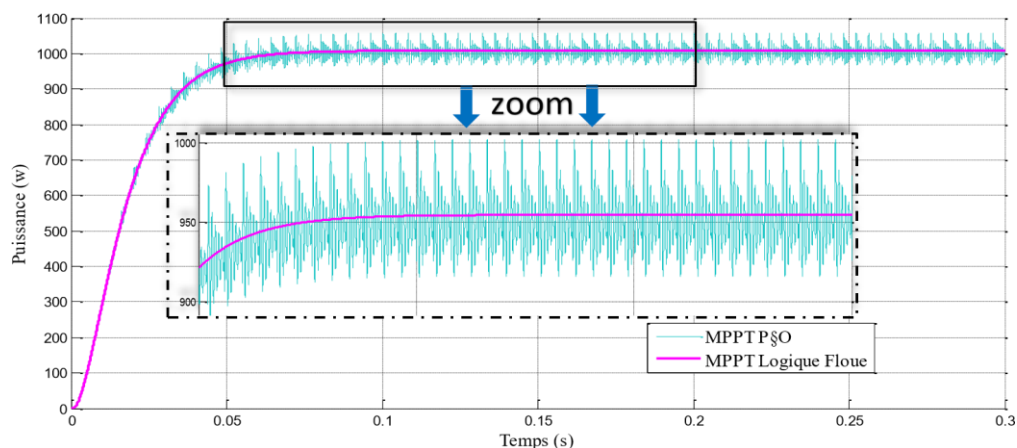


Figure III.12 Comparaison des caractéristiques $P(t)$ de GPV par deux contrôle MPPT/ logique floue FLC & perturbation et d'observation P&O.

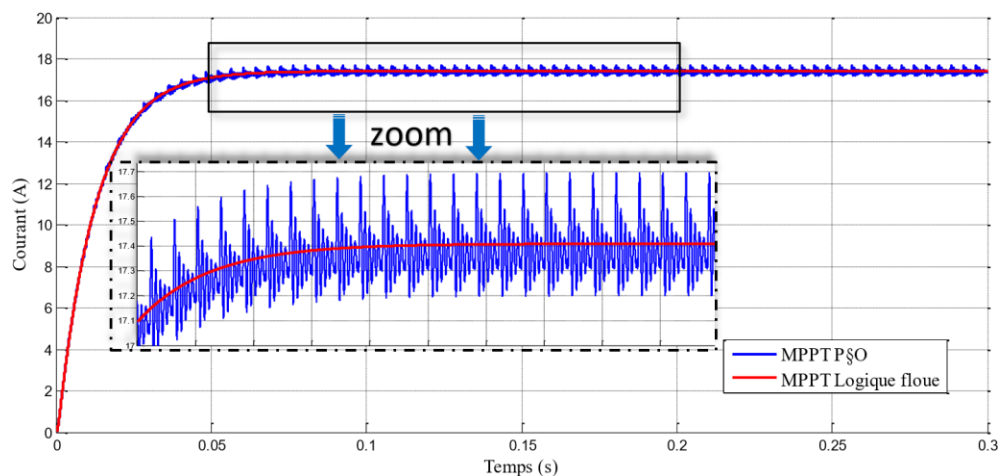


Figure III.13 Comparaison des caractéristiques $I(t)$ de GPV par deux contrôle MPPT/ logique floue FLC & perturbation et d'observation P&O.

- On remarque dans les courbes bleue (avec MPPT P&O) et rouge (avec MPPT Floue) des Figure (III.12) et Figure (III.13) après Zoom une zone de leur congruence où il y a des distorsions sur la courbe bleue par rapport à la courbe rouge
- Les observations précédentes confirment l'existence d'incertitudes d'intensité variable dans les courbes issues du système solaire lors de l'utilisation de la commande MPPT

Chapitre III : Application de l'algorithme P&O et de la logique floue pour contrôler les systèmes PV

P&O et après l'avoir remplacée par la commande à logique floue MPPT, on constate une amélioration significative sur toutes les courbes résultantes (Puissance et courant).

III.6 Conclusion

Le système proposé comprend un contrôleur **MPPT** basé sur **FLC**. Le **FLC** proposé a deux entrées et une sortie. La puissance de sortie et la tension de sortie du panneau photovoltaïque **PV** sont déterminées comme variables d'entrée, et le changement du cycle de service est spécifié comme variable de sortie du **FLC**.

Le rapport cyclique **CD** est obtenu en intégrant la sortie du **FLC**. Les résultats obtenus à partir des simulations **MATLAB/Simulink** et des études expérimentales rapportent que le cycle d'utilisation **CD** garantit un fonctionnement robuste et stable avec un faible cycle d'utilisation malgré la nécessité d'une augmentation élevée. L'efficacité du **MPPT** pour des conditions de fonctionnement stables est obtenue par un très grand pourcentage.

Conclusion générale

Conclusion générale

Conclusion générale

Le travail présenté porte sur la modélisation et la simulation du fonctionnement électrique d'un système PV adaptatif au moyen d'une commande numérique (commande MPPT) qui assure un suivi maximal de la puissance fournie par le générateur GPV.

La conception des systèmes photovoltaïques dépend du rayonnement solaire reçu par les panneaux solaires photovoltaïques et de l'effet de la température sur les panneaux, ainsi que du principe des cellules photovoltaïques en plus des avantages et inconvénients qui donnent un caractère général aux limites de l'exploitation de cette énergie.

Après l'étude, nous avons utilisé un convertisseur DC-DC de type Boost qui fournit une tension constante. Ce convertisseur a l'avantage d'augmenter la tension, ce qui permet à ce système de s'adapter aux changements de conditions météorologiques et d'extraire le maximum de puissance disponible sur la base du contrôleur numérique MPPT.

Nous nous appuyons sur l'algorithme d'observation et de perturbation P&O et choisissons les valeurs de convertisseur élévateur DC-DC (Boost) Après analyse mathématique des différentes configurations, nous sommes arrivés à développer un modèle de recherche pour MPPT dans Simulink, Nous avons étudié la modélisation et la simulation du système PV. Pour ce dernier, nous avons d'abord étudié :

- Modélisation du générateur photovoltaïque par résolution de l'équation caractéristique non linéaire de la cellule photovoltaïque.
- La représentation de la structure de contrôle numérique MPPT "perturber et observer" qui utilise directement la tension et le courant du panneau photovoltaïque.
- Trouver le point de fonctionnement correspondant à la puissance maximale.
- Construire et représenter la structure de contrôle MPPT qui repose sur la logique floue à travers ses trois étapes (Fuzzification-Mécanisme d'inférence floue et base des règles linguistiques-Défuzzification).

La commande MPPT soit classique P&O soit Logique floue permet la meilleure connexion entre le générateur photovoltaïque (GPV) et la charge et l'oblige à toujours fonctionner au point de puissance maximum, cependant, une étude comparative des résultats de simulation a révélé que la logique floue de commande MPPT conduit pour de meilleures performances (Réduire les perturbations).

A partir des résultats de la comparaison de simulation entre la commande MPPT (P&O classique ou logique floue) obtenus, on peut dire :

- L'évaluation du générateur est basée sur les conditions de base du panneau solaire ($G=1000\text{W/m}^2$ et $T = 25^\circ\text{C}$)
- Les performances de l'alternateur se détériorent avec l'augmentation de la température, la diminution de l'éclairement et les changements de charge.

Conclusion générale

- Le générateur donne de meilleures performances lors de l'abaissement de la température et de l'augmentation de l'éclairement.
- L'convertisseur fournit la tension à sa sortie la plus élevée dans des conditions optimales.
- Ces résultats montrent que l'utilisation de la commande MPPT améliore considérablement le rendement des installations photovoltaïques, notamment lors de l'utilisation de l'élément de commande Logic floue MPPT.

Résumé

Dans cette étude,

Le Poursuite de Point de Puissance Maximale MPPT du convertisseur DC-DC quadratique Boost est formulé pour garder une trace des variables souhaitées avec un rapport de conversion élevé. Le système proposé se compose d'un convertisseur Boost avec un taux d'escalade élevé et d'un contrôleur Poursuite de Point de Puissance maximum MPPT basé sur la logique floue.

L'algorithme Poursuite de Point de Puissance Maximale basé sur la logique floue est utilisé pour générer le signal de référence du convertisseur, et le changement de puissance PV et le changement de tension PV sont déterminés en tant que variables floues.

Des fonctions d'appartenance spécifiques et des règles floues conçues Poursuite de Point de Puissance Maximale MPPT dans le système photovoltaïque génèrent le signal de sortie de la sortie du contrôleur à logique floue. Il ressort clairement de la simulation MATLAB/Simulink et des résultats expérimentaux que le convertisseur Boost quadratique offre une fonctionnalité d'escalade élevée avec robustesse et stabilité. De plus, ce processus est réalisé avec un faible rapport cyclique et est assez instable par rapport au convertisseur élévateur DC-DC conventionnel Poursuite de Point de Puissance Maximale MPPT P&O.

De plus, les simulations et les résultats expérimentaux prouvent que le système proposé a une réponse rapide, et est adapté à des conditions météorologiques changeant rapidement (éclairage et température). L'efficacité en régime permanent Poursuite de Point de Puissance Maximale MPPT du système proposé est obtenue par un très grand pourcentage. En outre, la fluctuation de la puissance de sortie du transformateur est également réduite, ce qui est un problème majeur dans tous les appareils Poursuite de Point de Puissance Maximale MPPT et en particulier les traditionnels, et réduire la fluctuation de la puissance de sortie proposée est l'objectif de cette étude. Pour assurer la stabilité de la puissance de sortie dans toutes les conditions météorologiques changeantes (température + éclairage)

Abstract

In this study,

The Maximum Power Point Tracking MPPT of DC - DC quadratic boost converter is formulated to keep track of desired variables with a high conversion ratio. The proposed system consists of a boost converter with a high escalation ratio and a maximum Power Point Tracking MPPT controller based on fuzzy logic.

The Maximum Power Point Tracking algorithm based on fuzzy logic is used to generate the converter reference signal, and the change in PV power and the change in PV voltage are determined as fuzzy variables.

Specific membership functions and fuzzy rules designed Maximum Power Point Tracking MPPT in the photovoltaic system generate the output signal of the fuzzy logic controller output. It is evident from the MATLAB / Simulink simulation and experimental results that the quadratic boost converter provides high escalation functionality with robustness and stability. In addition, this process is achieved with a low duty cycle ratio and is quite unstable when compared to the conventional Maximum Power Point Tracking MPPT P&O of DC-DC boost converter.

Moreover, simulations and experimental results prove that the proposed system has a quick response, and is suitable for rapidly changing weather conditions (illumination and temperature). The steady-state Maximum Power Point Tracking MPPT efficiency of the proposed system is obtained by a very large percentage. Besides, the fluctuation of the output power of the transformer is also reduced, which is a major problem in all Maximum Power Point Tracking MPPT devices, especially the traditional ones. (temperature + illumination)

Bibliographie

- [1] A. Labouret, M. villos « Energie solaire photovoltaïque ». Dunod. 3ème édition. 2006
- [2] Chekired.F, « Etude et implémentation d'une commande MPPT neuro-floue sur FPGA»,
- [3]M. HARAOUBIA. Etude simulation d'un générateur de panneau photovoltaïque.
MEMOIRE
- [4]https://www.google.com/search?q=cellule+photovolta%C3%AFque+fonctionnement&udm=2&sa=X&ved=2ahUKEwjU69e6k_GGAxUs-wIHHR3_B60QrNwCegUIhQEQA&biw=1366&bih=641&dpr=1#vhid=RmDCNeJ77CeLCM&vssid=mosaic
- [5] <https://mypower.engie.fr/conseils/panneaux-solaires/panneau-solaire->
- [6] OUMNAD, Electronique Fondamentale, Ecole Mohammadia des Ingénieurs, Site Internet, <http://z.oumnad.123.fr/photovoltaique/types-cellules-solaires.html>.
- [7] C.Cabal « Optimisation énergétique de l'étage d'adaptation électronique dédié à conversation photovoltaïque » Thèse doctorat, Université Toulouse, France. Décembre 2008.
- [8] lumensol.fr.
- [9] fmsolenergy.com.
- [10] O. Bingöl, B. Özkaya, and S. PAÇACI, “Comparison of fuzzy logic and perturb&observe control in maximum power point tracking for photovoltaic system using buck converter,” *Mugla Journal of Science and Technology*, vol. 3, no. 1, pp. 51–57, 2017.
- [11] D. Choudhary and A. R. Saxena, “Dc-dc buck-converter for mppt of pv system,” *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, vol. 4, no. 7, pp. 813–821, 2014.
- [12] S. R. Rex and D. M. S. R. Praba, “Design of pwm with four transistor comparator for dc–dc boost converters,” *Microprocessors and Microsystems*, vol. 72, p. 102844, 2020.
- [13] B. M. Hasaneen and A. A. Elbaset Mohammed, “Design and simulation of dc/dc boost converter,” in *2008 12th International Middle-East Power System Conference*, pp. 335–340, 2008.
- [14] T. Esmam and P. L. Chapman, “Comparison of photovoltaic array maximum power point tracking techniques,” *IEEE Transactions on energy conversion*, vol. 22, no. 2, pp. 439–449, 2007.
- [15] T.-Y. Kim, H.-G. Ahn, S. K. Park, and Y.-K. Lee, “A novel maximum power point tracking control for photovoltaic power system under rapidly changing solar radiation,” in *ISIE 2001. 2001 IEEE International Symposium on Industrial Electronics Proceedings (Cat. No. 01TH8570)*, vol. 2, pp. 1011–1014, IEEE, 2001.

- [16] K.H. Hussein, I. Muta, T. Hoshino and M. Osakada, '*Maximum Photovoltaic Power Tracking, an Algorithm for Rapidly Changing Atmospheric Conditions Generation*', IEE Proceedings, Generation, Transmission and distributions, Vol. 142, N°1, pp. 59 – 64, 1995
- [17] P. Sabatier, «Optimisation énergétique de l'étage d'adaptation électronique dédié à la conversion photovoltaïque ». Thèse Doctorat de l'Université de Toulouse, 2008.
- [18] M.BEDRANE Farid. Etude comparative entre quelques méthodes de poursuite du point de puissance maximale dans les systèmes photovoltaïques. Université Abderrahmane MIRA de Bejaia
- [19] Anantapuram, "investigation on potential photovoltaic power modules for higher electrical output" ph.d in electrical engineering, kiranmayi r-jawaharlal nehru technological university , 2012
- [20] Ahmad Zbeeb, "a new microcontroller-based mppt algorithm for photovoltaic applications" for the degree of master of applied science, concordia university montreal, quebec, canada,2009.
- [21] d. Lee, H. Noh, D. Hyun, And I. Choy,"an improved mppt converter using current compensation method for small scaled pv-applications," IEEE applied power electronics conf. And exposition, vol. 1, pp. 540-545, 2003.
- [22] S. M. Ait-Cheikh, « Etude, Investigation et conception d'algorithmes de commande appliqués aux systèmes photovoltaïques ». Thèse Doctorat de l'école Polytechnique, 2007.
- [23] https://www.researchgate.net/figure/Structure-de-base-dune-commande-a-logique-floue-10-11-La-sortie-est-lincement-du_fig1_320166569
- [24] <https://fr.scribd.com/document/556043375/La-fuzzification>
- [25] <https://www.aspexit.com/la-logique-floue-ou-l'extension-de-la-logique-classique/>