

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
**Université DJILALI BOUNAAMA**



**Faculté des Sciences et de la Technologie**  
**Département de la Technologie**  
Mémoire du Projet de Fin d'Etudes  
Pour l'obtention d'un diplôme de MASTER

EN

« Automatique et informatique industrielle »

Sujet :

**Régulation de la tension d'un générateur  
photovoltaïque par un régulateur  
numérique**

Présenté par :

Mr. GHEBACHE ABDERRAHMEN  
Mr. MAZZOUZI RAHIM

Encadré par :

Mr. BOUKLI-HACENE Omar

**Année Universitaire : 2019/2020**

## *Remerciements*

*Tout d'abord nous remercions le bon Dieu pour son aide dans l'accomplissement de ce travail.*

*Nous tenons à exprimer nos vifs remerciements à notre promoteur **MR. BOUKLI-HACENE Omar** pour nous avoir encadré durant notre projet de fin d'études et de nous avoir conseillé tout au long de notre travail.*

*Nous remercions chaleureusement les membres du jury pour l'honneur qu'ils nous ont fait en acceptant d'évaluer notre projet.*

*Nous souhaitons aussi remercier tous les enseignants de l'université de Khemis Miliana et tous nos enseignants pour les connaissances qu'ils nous ont transmis, leur disponibilité et leurs efforts.*

*Nous remercions tout le personnel de l'université, et tous les étudiants de notre groupe Automatique et Informatique Industrielle.*

*Que tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce modeste travail trouvent ici l'expression de notre sincère gratitude.*

**GHEBACHE-ABDERRAHMAN & MAZOUZI-ABDERRAHI**

---

## Résumé

Durant ces dernières années, il y a eu un intérêt considérable pour les énergies renouvelables et plus particulièrement l'énergie photovoltaïque.

Ce mémoire porte sur l'étude et la conception, dans une chaîne Photovoltaïque, d'un convertisseur DC/DC de type Boost commandé par deux techniques. La première technique est la commande MPPT assurant la poursuite du PPM correspondant à la puissance maximale fournie par un générateur PV et la deuxième est la commande par un régulateur PID numérique destiné à régler la tension de sortie du générateur PV. Cette étude aborde la synthèse d'un régulateur classique continu puis numérique pour la régulation de la tension du générateur photovoltaïque qui a comme référence la tension imposée par l'algorithme MPPT.

Mots clés : Photovoltaïque, Convertisseur DC/DC, Commande MPPT, Régulation PID

## Abstract

These past years, there has been considerable interest in renewable energies and more specifically photovoltaic energy.

This dissertation deals with the study and design, in a photovoltaic chain, of a Boost DC/DC converter controlled by two techniques. The first technique is the MPPT control ensuring the tracking of the MPP corresponding to maximum power supplied by a PV generator and the second one is a digital PID regulator used to regulate the output voltage of the PV generator. This study discusses the synthesis of a classical continuous regulator then a digital one for the regulation of the voltage of the photovoltaic generator which has as reference the voltage imposed by the MPPT algorithm.

Keywords: Photovoltaic, DC/DC converter, MPPT control, PID regulation.

## ملخص

في السنوات الأخيرة، كان هناك اهتمام كبير بالطاقات المتجددة وبشكل أكثر تحديداً الطاقة الكهروضوئية.

تركز هذه المذكرة على دراسة وتصميم محول DC / DC Boost في تقنيتين بصريتين يتم التحكم فيهما في سلسلة بصرية. الأسلوب الأول هو التحكم في MPPT للتأكد من أن PPM يطابق الطاقة القصوى التي يوفرها المولد الكهروضوئي والثاني هو التحكم بواسطة منظم PID رقمي لتنظيم جهد الخرج للمولد الكهروضوئي. تتعلق هذه الدراسة بتركيب منظم جهد تيار مستمر تقليدي ثم رقمي لمولد كهروضوئي يحتوي على مرجع للجهد الذي تفرضه خوارزمية MPPT .

الكلمات المفتاحية: الخلايا الكهروضوئية، محول DC/DC، تحكم MPPT، تنظيم PID

## Table des matières

|  |    |
|--|----|
| Résumé .....   | 3  |
| Liste des figures .....  | 8  |
| Liste des tableaux .....   | 11 |
| Liste des abréviations .....                                       | 12 |
| Introduction générale .....  | 14 |
| Chapitre I : Généralité sur les générateurs photovoltaïques .....  | 18 |
| I.1 Introduction .....   | 18 |
| I.2 L'énergie solaire .....  | 18 |
| I.3 L'énergie solaire photovoltaïque .....                         | 19 |
| I.3.1 Avantages et Inconvénients de l'Énergie Photovoltaïque ..... | 20 |
| I.3.1.1 Avantages du photovoltaïque .....                          | 20 |
| I.3.1.2 Inconvénients du photovoltaïque .....                      | 20 |
| I.4 L'effet photovoltaïque .....                                   | 20 |
| I.5 Le générateur photovoltaïque .....                             | 21 |
| I.5.1 La Cellule .....   | 22 |
| I.5.2 Cellule photovoltaïque réel .....                            | 23 |
| I.6 La résistance dynamique d'un GPV .....                         | 24 |
| I.7 Les Différents types de cellules photovoltaïques .....         | 24 |
| I.8 Système photovoltaïque .....                                   | 25 |
| I.8.1 Les Différents Types de Systèmes Photovoltaïques .....       | 25 |
| I.8.1 Installation électriques photovoltaïque autonomes .....      | 25 |
| I.8.1.1 Le régulateur de charge (2) .....                          | 26 |
| I.9 La prise en charge de plusieurs modes de charges .....         | 26 |
| I.10 Étage d'Adaptation entre un Générateur PV et une Charge ..... | 26 |

|   |    |
|---|----|
| I.11 Les caractéristiques d'un générateur photovoltaïque .....        | 27 |
| I.12 Les caractéristique I/V et P/V utilisé dans la simulation.....   | 29 |
| I.13 Protéction d'électricité d'un système d'énergie électrique ..... | 31 |
| I.14 Type de Stabilité.....   | 31 |
| I.14.1 Phénomènes de stabilité liés à "l'angle rotorique" .....       | 31 |
| I.14.2 Phénomènes de stabilité liés à la tension.....                 | 31 |
| I.14.2.1 Causes des phénomènes d'instabilité liés à la tension :..... | 32 |
| I.15 Conclusion :.....  | 33 |
| Chapitre II : Les convertisseurs DC/DC .....                          | 35 |
| II.1 Introduction.....  | 35 |
| II.2 Le Convertisseur Statique .....                                  | 35 |
| II.3 Le hacheur .....   | 36 |
| II.4 Le rôle du convertisseur DC/DC.....                              | 36 |
| II.5 Le commutateur du convertisseur statique.....                    | 36 |
| II.6 Les types de convertisseurs DC/DC.....                           | 37 |
| II.7 Le convertisseur survolteur .....                                | 37 |
| II.8 Convertisseur dévolteur .....                                    | 39 |
| II.9 Convertisseur dévolteur-survolteur.....                          | 41 |
| II.10 Rendement du convertisseur statique.....                        | 42 |
| II.11 Le choix de convertisseur .....                                 | 43 |
| II.12 Dimensionnements des composants d'un convertisseur BOOST .....  | 43 |
| II.12.1 Le cahier de charge pour le hacheur parallèle (BOOST).....    | 43 |
| II.13 Modèle mathématique du convertisseur Boost .....                | 45 |
| II.14 Simulation d'un convertisseur Boost .....                       | 47 |
| II.15 Résultat de la simulation.....                                  | 47 |
| II.16 Conclusion .....  | 48 |

|  |    |
|--|----|
| Chapitre III : Les algorithmes de poursuite du MPP .....                               | 50 |
| III.1 Introduction.....  | 50 |
| III.2 Techniques de commande MPPT .....  | 50 |
| III.2.1 Méthode direct .....   | 51 |
| III.2.2 Méthode indirecte .....  | 51 |
| III.3 Les Algorithmes MPPT .....   | 52 |
| III.3.1 les algorithmes de MPPT. Les plus utilisés sont .....                          | 52 |
| III.3.1.1 Algorithme de la Tension Constante (CV, Constant Voltage) .....              | 52 |
| III.3.1.2 Algorithme du Courant constant (Constant Current) : .....                    | 53 |
| III.3.1.3 Algorithme du Perturbation et Observation (Perturb & Observe, P&O).....      | 54 |
| III.3.1.5 Algorithme du Conductance Incrémentale (IncCond, Incremental Conductance).56 |    |
| III.4 Simulation.....  | 59 |
| III.5 Conclusion .....   | 61 |
| Chapitre IV : Régulation de la tension photovoltaïque .....                            | 63 |
| IV.1 Introduction .....  | 63 |
| IV.2 Le rôle du régulateur de tension .....  | 63 |
| IV.2.1 La commande PID.....  | 63 |
| IV.2.2 Bref historique de la régulateur PID.....                                       | 64 |
| IV.2.3 Schéma fonctionnelle d'une boucle de régulation.....                            | 65 |
| IV.2.3.1 Action de régler .....  | 66 |
| IV.3 Description des régulateurs PID.....  | 66 |
| IV.4 Contrôle par PID.....   | 68 |
| IV.4.1 « P », Proportionnel.....   | 69 |
| IV.4.2 « I », Intégré .....  | 70 |
| IV.4.3« D », Dérivé .....  | 71 |
| IV.5 Les algorithmes de PID .....  | 72 |

|   |    |
|---|----|
| IV.5.1 L'Algorithme P.....                    | 72 |
| IV.5.2 L'Algorithme PI.....                   | 73 |
| IV.5.3 L'Algorithme PID.....                  | 73 |
| IV.6 Les différentes structures d'un PID..... | 74 |
| IV.6.1 PID série ou parallèle.....            | 74 |
| IV.6.2 Une <b>3ème</b> forme de PID :.....    | 75 |
| IV.6.3 La principale différence.....          | 76 |
| IV.7 Synthèse du régulateur.....              | 77 |
| IV.7.1 Méthode fréquentielle.....             | 77 |
| IV.8 Analyses du Modèle.....                  | 78 |
| IV.9 Synthèse du régulateur PID.....          | 80 |
| IV.10 Le PID numérique.....                   | 82 |
| IV.11 Discrétisation du régulateur.....       | 83 |
| IV.12 Conclusion.....                         | 84 |
| Référence bibliographique.....                | 87 |

## Liste des figures

|  |    |
|--|----|
| Figure I.1 : Exemple sur les capteurs plans d'énergie solaire.....   | 18 |
| Figure I.2 : Plan de l'utilisation de l'énergie solaire.....   | 19 |
| Figure I.3 : L'effet photovoltaïque.....   | 21 |
| Figure I.4: Composants d'un GPV.....   | 22 |
| Figure I.5 : modèle simple d'une cellule PV.....   | 22 |
| Figure I.6: Modèle de la cellule PV à une diode.....   | 23 |
| Figure I.7: Figure I.7: Silicium polycristallin.....   | 24 |
| Figure I.8 : Types Type de cellules photovoltaïques.....   | 24 |
| Figure I.9 : Schéma typique d'un système photovoltaïque autonome.....  | 25 |
| Figure I.10 : Courbe de charge de la batterie.....   | 26 |
| Figure I:11: Etage d'adaptation entre un GPV et une charge .....   | 27 |
| Figure I.12 : Caractéristiques ( $V_{pv}$ ) et $P(V_{pv})$ d'un générateur $PV$ pour une température et un pour une température et un niveau d'ensoleillement donnés.....  | 27 |
| Figure I.13 : Comportement des caractéristiques ( $V_{pv}$ ) et ( $V_{pv}$ ) sous l'influence de.....  | 28 |
| Figure I.14 : a- Caractéristique $I(V)$ d'un module (BP350) pour différentes valeurs de l'éclairement en température standard $T=25^{\circ}C$ . b- Caractéristique $P(V)$ d'un module (BP350) pour différentes valeurs de l'éclairement standard $T=25^{\circ}C$ ..... | 30 |
| Figure I.15: Classification des catégories de stabilité des systèmes de puissance.....   | 32 |
| Figure II.1:Tension de commande (PWM) du commutateur.....  | 36 |
| Figure II.2:Schéma de principe d'un survolteur.....  | 37 |
| Figure II.3: Schémas équivalents du convertisseur survolteur (a), K fermé (b), ouvert.....   | 38 |
| Figure II.4: Schéma du circuit électrique d'un convertisseur dévolteur.....  | 39 |
| Figure II.5:Schémas équivalents du convertisseur dévolteur.....  | 40 |
| Figure II.6 : Schéma de base d'un dévolteur / survolteur.....  | 41 |
| Figure II.7 : Schémas équivalents du Convertisseur dévolteur-survolteur.....   | 41 |
| Figure II.8: Schéma de principe du hacheur parallèle.....  | 47 |

|  |    |
|--|----|
| Figure II.9:simulation d'un convertisseur BOOST avec un panneau PV de type BP350.....                    | 47 |
| Figure II.10 : La tension de la sortie de convertisseur .....  | 47 |
| Figure III.1 : Schéma de principe du convertisseur MPPT.....   | 50 |
| Figure III.2 : Algorithme de la Tension Constante.....   | 53 |
| Figure III.3 : Algorithme du constant courant.....   | 54 |
| Figure III.4 : la courbe de puissance-Tension de panneau solaire.....                                    | 55 |
| Figure III.5 : Organigramme de la méthode de perturbation et d'observation.....                          | 55 |
| Figure III.6 : Caractéristique de tension-puissance du panneau.....                                      | 56 |
| Figure III.7 : L'algorithme IncCond classique.....   | 58 |
| Figure III.8: Simulation d'un Convertisseur Boost avec le panneau et le régulateur de MPP.....           | 59 |
| Figure III.9 : rapport cyclique.....   | 59 |
| Figure III.10: La puissance.....   | 59 |
| Figure III.11: La variation de l'éclairement pour différents niveaux d'irradiation.....                  | 60 |
| Figure III.12: Le rapport cyclique pour plusieurs niveaux d'irradiation.....                             | 60 |
| Figure III.13:la puissance de Panneau délivre par le panneau PV aux différents niveau d'irradiation..... | 60 |
| Figure IV.1 : Boucle de commande globale.....  | 64 |
| Figure IV.2 : Schéma d'une boucle de régulation.....   | 65 |
| Figure IV.3: Schéma général d'un système de régulation.....  | 66 |
| Figure IV.4:Schéma fonctionnel d'un processus réglé par un PID classique.....                            | 67 |
| Figure IV.5: Asservissement avec régulateur PID.....   | 69 |
| Figure IV.6 : Modélisation sous Maple de la réponse à un échelon dans un asservissement en position..... | 71 |
| Figure IV.6 : Modélisation sous Maple de la réponse à un échelon dans un asservissement en position..... | 72 |
| Figure IV.7 : Modélisation sous Maple de la réponse à un échelon.....                                    | 70 |
| Figure IV.8 : Modélisation sous Maple de la réponse à un échelon.....                                    | 71 |
| Figure IV.9 : Schéma synoptique d'un régulateur PID.....   | 73 |
| Figure IV.10 : PID en série.....   | 74 |

|  |    |
|--|----|
| Figure IV.11: PID en parallèle.....  | 74 |
| Figure IV.12: PID standard.....  | 75 |
| Figure IV.13 : block paramètres PID contrôle.....                                      | 76 |
| Figure IV.14: diagramme de Bode.....   | 78 |
| Figure IV.15 : Réponse indicielle du système.....                                      | 79 |
| Figure IV.16: Réponse du système en BF non corrigée.....                               | 79 |
| Figure IV.17: La boucle fermée du système.....   | 80 |
| Figure IV.18 : Le tracé de Bode de la boucle ouverte corrigé.....                      | 81 |
| Figure IV.19 : Réponse du système corrigé pour une variation de 1V de l'entrée.....    | 82 |
| Figure IV.20 : Les deux voies pour la synthèse de correcteur numérique illustré.....   | 82 |
| Figure IV.21 : Tracé de Bode de l'approximation discrète et du régulateur continu..... | 84 |

## Liste des tableaux

|   |    |
|---|----|
| Table I.1: Les différentes caractéristiques de panneau.....                             | 29 |
| Table II.1: Différentes structures de convertisseurs statiques et leurs rendements..... | 43 |
| Table II.2: Le dimensionnement des éléments du hacheur parallèle (BOOST).....           | 43 |

## Liste des abréviations

**GPV** : Générateur photovoltaïque

**PV** : photovoltaïque

**DC/DC** : continu/continu

**V<sub>D</sub>** : Tension de diode

**I<sub>D</sub>** : Courant de diode

**I** : Intensité aux bornes du générateur

**I<sub>S</sub>** : Courant de saturation inverse de la diode

**V** : Tension aux bornes du capteur

**V<sub>t</sub>** : Potentiel thermique

**R<sub>s</sub>** : Une résistance en série

**R<sub>sh</sub>** : Résistance shunt

**q** : Charge de l'électron

**K** : Constante de Boltzmann

**T<sub>j</sub>** : Température de jonction

**I<sub>ph</sub>** : Photo courant

**V<sub>pv</sub>** : La tension photovoltaïque

**I<sub>cc</sub>** : Courant de court-circuit.

**V<sub>oc</sub>** : Tension de circuit ouvert

**R<sub>pv</sub>** : La résistance à la sortie du panneau

**A** : Le facteur d'idéalité de la diode

**V<sub>1</sub>** : La tension d'entrée

**V<sub>2</sub>** : La tension de sortie

**ΔI<sub>max</sub>** : L'ondulation du courant

**ΔV<sub>2</sub>** : L'ondulation de la tension

**C<sub>1</sub>** : Capacité d'entrée

**C<sub>2</sub>** : Capacité de sortie

**L** : L'inductance

**V<sub>ref</sub>** : Le vecteur de référence

**P&O** : Perturbation et Observation

**F** : la fréquence

**T** : la période

**D** : le rapport cyclique

**MPPT** : Maximum Power Point Tracking

**PPM** : Point de Puissance Maximale

**MLI** : Modulation de L'arguer d'Impulsion

**PWM** : Pulse Width Modulation

**Introduction**

**générale**

Depuis la généralisation de l'utilisation de l'électricité, la consommation énergétique n'a cessé d'augmenter, des années soixante à nos jours celle-ci s'est triplée. Actuellement, les principales sources d'énergie proviennent des combustibles fossiles (charbon, pétrole, gaz naturel). Cependant, depuis les crises successives du pétrole des années soixante-dix, le problème de la conversion et du stockage de l'énergie a conduit à la recherche et au développement de nouvelles sources d'approvisionnement. Cet intérêt s'est accru face à l'épuisement inéluctable des énergies fossiles, à leur impact sur l'environnement et aux déchets qu'elles engendrent.

A partir de ce constat, il été nécessaire de chercher d'autres ressources d'énergie de remplacement. Les énergies renouvelables, comme l'énergie photovoltaïque, éolienne ou hydraulique, représentent une solution de remplacement par excellence et elles sont de plus en plus utilisées de nos jours. Ce type d'énergie n'est pas seulement gratuit et inépuisable, mais aussi très propre pour l'environnement. D'ailleurs, on parle souvent d'une « énergie verte », puisqu'elle permet d'éviter totalement la pollution produite par les sources traditionnelles.

Parmi celles-ci, l'énergie solaire est la mieux partagée par tous les habitants du globe terrestre. Son exploitation permettrait de fournir en électricité des sites isolés des réseaux électriques et éviterait la création de nouvelles lignes électriques qui demandent généralement un lourd investissement [1] [2].

La technologie photovoltaïque (PV) est une solution attrayante comme remplacement ou complément aux sources conventionnelles d'approvisionnement en électricité en raison de ses nombreux avantages [3] :

- Elle est un moyen fiable qui requiert peu d'entretien.
- Elle fournit de l'électricité grâce à l'énergie gratuite et renouvelable du soleil.
- Elle ne nécessite aucun combustible.
- Elle est silencieuse, non polluante et respectueuse de l'environnement.
- Elle est polyvalente et peut être ajustée selon les besoins.

Concernant ce travail, nous nous sommes limités aux systèmes photovoltaïques autonomes dotés de convertisseurs DC-DC (pas d'onduleur et pas de système raccordé aux réseaux électriques). L'objectif de ce travail est de contribuer à la synthèse d'un régulateur classique et numérique permettant la régulation de la tension d'un générateur photovoltaïque.

Le mémoire comprend quatre chapitres, dans le premier chapitre, nous présenterons quelques généralités dans le domaine photovoltaïque, le fonctionnement des cellules photovoltaïques et leurs caractéristiques principales ainsi que les paramètres limitants, ainsi que la réalisation de la simulation du panneau (BP350) utilisé dans ce mémoire.

Le deuxième chapitre a été consacré à présenter une étude théorique du convertisseur continu/continu ou bien les hacheurs, ainsi que le dimensionnement d'un hacheur survolteur et la détermination de son modèle mathématique et la réalisation de la simulation du convertisseur sous Simulink.

Le troisième chapitre sera consacré à la présentation du principe de suivi du point maximal de la puissance (MPPT), ainsi que l'étude des techniques les plus connues dans la littérature pour la recherche du MPP d'un système photovoltaïque. La simulation du système étudié pour définir l'objectif du MPPT est aussi présentée.

Le dernier chapitre expose la régulation de la tension de sortie d'un générateur photovoltaïque en prenant en compte l'étude de la stabilité du système photovoltaïque. Cette régulation est accomplie à travers la synthèse d'un régulateur PID dans le domaine fréquentiel selon un cahier des charges imposé. Enfin, un régulateur PID numérique est obtenu en appliquant la transformation bilinéaire de Tustin.

Nous terminerons ce mémoire par une conclusion générale.

# Chapitre I

# Chapitre I : Généralité sur les générateurs photovoltaïques

## I.1 Introduction

Dans ce chapitre nous allons présenter une étude bibliographique dédiée à un générateur photovoltaïque autonome, nous allons exposer quelques généralités liées au domaine du solaire photovoltaïque, la cellule, le système photovoltaïque, les caractéristiques et les protections d'électricité qui sont relative au générateur photovoltaïque.

## I.2 L'énergie solaire

L'énergie solaire correspond au type d'énergie que le soleil diffuse dans l'atmosphère par son rayonnement. Elle est obtenue grâce à des panneaux solaires et est utilisée par les humains sous deux formes différentes : électrique et thermique. L'énergie solaire photovoltaïque permet de transformer les rayons du soleil en électricité, par une réaction photovoltaïque par l'utilisation des cellules solaires photovoltaïque, tandis que l'énergie thermique est plutôt utilisée pour produire de la chaleur. Les panneaux solaires peuvent être installés partout où le soleil brille toute l'année, comme c'est le cas pour les pays situés aux abords de la ligne équatoriale, mais peuvent également servir de source d'énergie d'appoint dans les régions plus nordiques comme la nôtre [4].

Par l'utilisation de deux types de capteur, capteurs solaires plan qui est utilisé pour

Le chauffage de l'eau, le séchage des récoltes agricoles, et des capteurs solaires à concentration dont leur accès à très haute température produit la vapeur chaude et comprimée par la concentration du rayonnement solaire sur la surface de l'absorbeur par des surfaces réfléchissantes, ce deuxième type de capteur (capteurs solaires à concentration) permet aussi de produit l'électrice comme les cellules solaires photovoltaïque [5].



Figure I.1 : Exemple sur les capteurs plans d'énergie solaire [10].

On peut donner le résumé de ce passage, selon l'utilisation d'énergie solaire, on désigne le plan suivant :

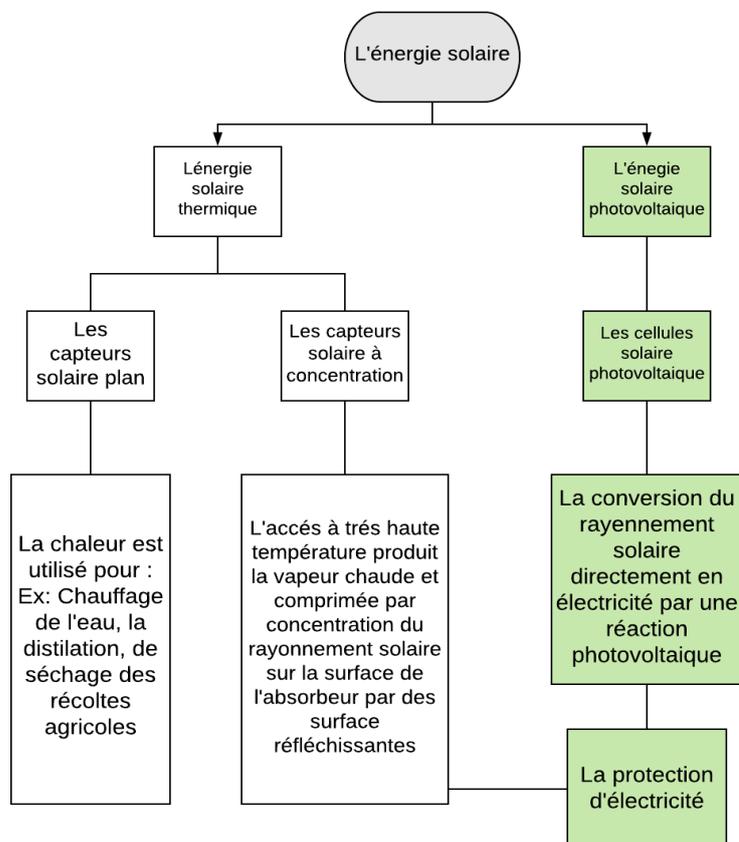


Figure I.2 : Plan de l'utilisation de l'énergie solaire.

À la vue du plan traitée dans cette thèse, seule la catégorie de l'énergie solaire photovoltaïque sera étudiée.

### I.3 L'énergie solaire photovoltaïque

L'énergie solaire photovoltaïque se base sur l'effet photoélectrique pour créer un courant électrique continu à partir d'un rayonnement électromagnétique. Cette source de lumière peut être naturelle (soleil) ou artificielle (une ampoule). L'énergie photovoltaïque est captée par des cellules photovoltaïques.

### **I.3.1 Avantages et Inconvénients de l'Énergie Photovoltaïque**

En tant que source d'énergie électrique, un système photovoltaïque offre des avantages mais aussi des inconvénients [5].

#### **I.3.1.1 Avantages du 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.

#### **I.3.1.2 Inconvénients du photovoltaïque**

- Les rendements des panneaux photovoltaïques sont encore faibles et de l'ordre de 23.4 %
- 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.
- La durée de vie d'une installation photovoltaïque n'est pas éternelle mais de l'ordre de 20 à 30 ans. De plus, 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 L'effet photovoltaïque**

Le mot « photovoltaïque » vient des grecques « photos » qui signifie lumière et de « Volta » du nom du physicien italien qui en 1800 découvrit la pile électrique [6].

L'effet photovoltaïque, c'est-à-dire la production d'électricité directement de la lumière, fut observée la première fois, en 1839, par le physicien français Edmond Becquerel. Toutefois, ce n'est

qu'au cours des années 1950 que les chercheurs de la compagnie Bell Téléphone, aux Etats-Unis, parvinrent à fabriquer la première photopile, l'élément primaire d'un système photovoltaïque [6].

Lorsqu'un matériau est exposé à la lumière du soleil, les atomes exposés au rayonnement sont " bombardés " par les photons constituant la lumière ; sous l'action de ce bombardement, les électrons des couches électroniques supérieures (appelés électrons des couches de valence) ont tendance à être "arrachés " [5].

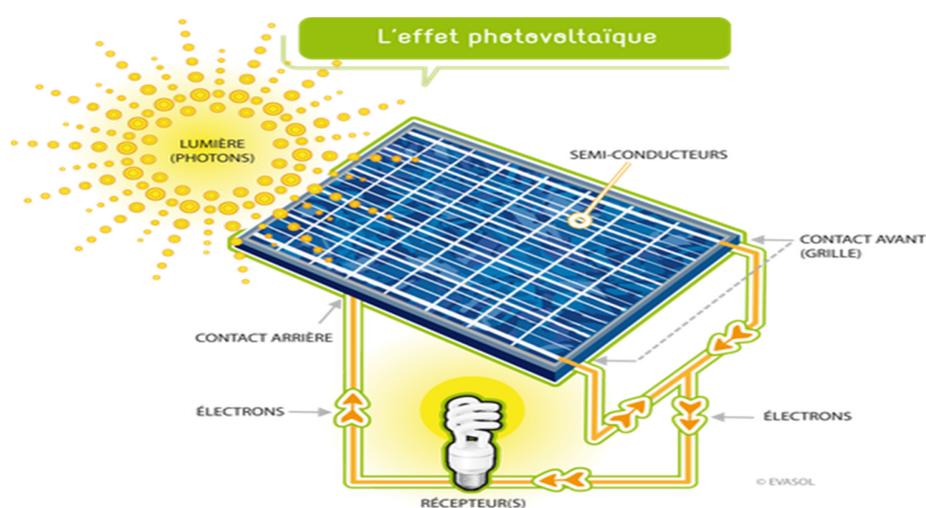


Figure I.3 : L'effet photovoltaïque [6].

Si l'électron revient à son état initial, l'agitation de l'électron se traduit par un échauffement du matériau. L'énergie cinétique du photon est transformée en énergie thermique. Par contre, dans les cellules photovoltaïques, une partie des électrons ne revient pas à son état initial. Les électrons " arrachés " créent une tension électrique continue faible. Une partie de l'énergie cinétique des photons est ainsi directement transformée en énergie électrique : c'est l'effet photovoltaïque [5].

### I.5 Le générateur photovoltaïque

Le générateur PV est l'élément principal d'un système PV et c'est l'unité de production d'énergie électrique sous forme de courant continu. Le composant élémentaire de cette unité qui convertit l'énergie solaire en énergie électrique est la cellule photovoltaïque [7].

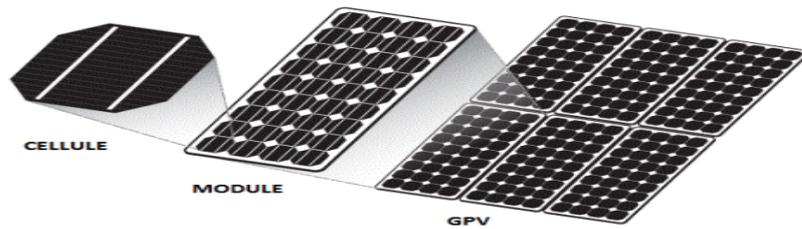


Figure I.4 : Composants d'un GPV [10].

### I.5.1 La Cellule

La cellule photovoltaïque ou photopile (composant optoélectronique) est le plus petit élément d'une installation photovoltaïque. Elle est composée de matériaux semi-conducteurs et transforme directement l'énergie lumineuse en énergie électrique [7].

Une cellule photovoltaïque peut être décrite de manière simple comme une source idéale de courant qui produit un courant  $I_{ph}$  proportionnel à la puissance lumineuse incidente, en parallèle avec une diode qui correspond à l'air de transition p-n de la cellule PV (Figure I.5). Si l'on connecte une charge résistive aux bornes du générateur photovoltaïque, ce dernier y débite une part de courant  $I$  et le reste, le courant  $I_D$ , dans la diode.

$$\text{Nous avons alors la relation : } I = I_{ph} - I_D \quad (\text{I.1})$$

Pour un générateur, la tension aux bornes de la résistance est égale à celle aux bornes de la diode :  $V = V_D$ .

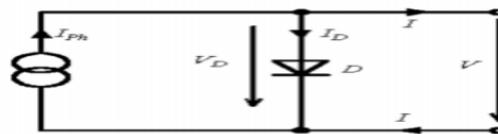


Figure I.5 : modèle simple d'une cellule PV [7].

La diode étant un élément non linéaire, sa caractéristique est donnée par la relation :

$$I_D = I_S \left( \exp \left( \frac{V_D}{V_t} \right) - 1 \right) \quad (\text{I.2})$$

Avec :  $I_S$  : courant de saturation inverse de la diode

$V_t = kT/q$  : Potentiel thermique.

Ce modèle reste théorique et ne rend pas compte du comportement d'une cellule photovoltaïque dans des conditions réelles.

### I.5.2 Cellule photovoltaïque réel

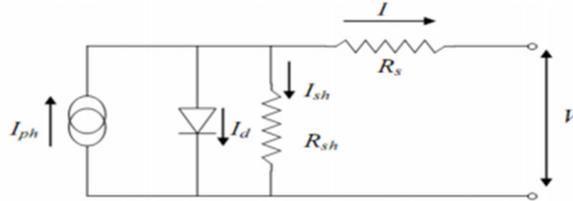


Figure I.6 : Modèle de la cellule PV à une diode [7].

Le modèle photovoltaïque précédent ne rendait pas compte de tous les phénomènes présents lors de la conversion d'énergie lumineuse. En effet, dans le cas réel, on observe une perte de tension en sortie ainsi que des courants de fuite. Cette perte de tension est modélisée donc par une résistance en série  $R_s$  et les courants de fuite par une résistance en parallèle  $R_{sh}$  comme montre la Figure I.6.

L'équation de la caractéristique est alors :

$$I = I_{ph} - I_S \left( \exp \left( \frac{q(V+R_S I)}{A.K.T.J} \right) - 1 \right) - \frac{V+R_S I}{R_S} \quad (I.3)$$

Avec :

$I$  : Intensité aux bornes du générateur [A]

$I_S$  : Le courant de saturation de la diode [A]

$V$  : Tension aux bornes du capteur [V]

$I_{ph}$  : Photo courant [A], proportionnel à l'irradiation  $G$ , avec correction selon  $T$ .

$R_s$  : Résistance série [ $\Omega$ ]

$R_{sh}$  : Résistance shunt (ou parallèle) [ $\Omega$ ].

$q$  : Charge de l'électron ( $1.6 \cdot 10^{-19}$  Coulomb).

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

$A$  : Le facteur d'idéalité de la diode compris entre 1 et 2.

$T_j$  : Température de jonction.

Nous obtenons une équation implicite en I et V qui peut être résolue grâce à une méthode numérique.

### I.6 La résistance dynamique d'un GPV

Le rapport de la tension aux bornes d'un GPV sur le courant le traversant varie avec la tension ou le courant. Le rapport d'une variation de la tension sur la variation du courant définit ce qu'on appelle la résistance dynamique qui représente la pente de la courbe de la caractéristique  $I = f(v)$  en un point. Il est à noter que la résistance dynamique du GPV est négative [8].

En se basant sur le circuit de la figure I.6 et en négligeant la résistance shunt, on peut écrire :

$$I = I_{ph} - I_s(h - 1) \quad (I.4)$$

$$h = \exp\left(\frac{v+R_s I}{V_t}\right) \quad (I.5)$$

$$r_{pv} = \frac{dV}{dI} \quad (I.6)$$

$$r_{pv} = \frac{-V_t - R_s I_s h}{I_s h} \quad (I.7)$$

### I.7 Les Différents types de cellules photovoltaïques

- Cellule en silicium amorphe (rendement : 6 à 10%).
- Cellule en silicium monocristallin (rendement : 13 à 17%).
- Cellule en silicium poly cristallin (rendement : 11 à 15%) 12).
- Cellule Tandem - Cellule en matériaux organiques (rendement : 3.6%).



Figure I.7 :  
Silicium  
polycristallin.

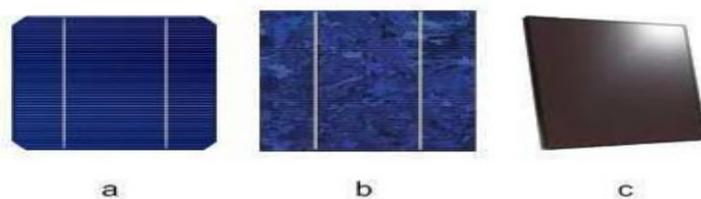


Figure I.8 : Types Type de cellules photovoltaïques. (a)silicium monocristallin, (b) silicium polycristallin, (c) silicium amorphe.

## I.8 Système photovoltaïque

La cellule solaire, de forme ronde ou carrée, est l'élément de base d'un système solaire. Un ensemble de cellules forme un module solaire. Dans un module les cellules sont reliées électriquement entre elles et encapsulées. Plusieurs modules forment un panneau solaire. Plusieurs panneaux forment un système ou un champ solaire. On ajoute à ce système des protections, un régulateur, un système de stockage de l'énergie (batterie), des appareils de contrôle et de mesure, un convertisseur etc... [9].

### I.8.1 Les Différents Types de Systèmes Photovoltaïques

- Alimentations électriques faibles puissances
- Installations ou centrales électriques photovoltaïques raccordées au réseau
- Installations ou centrale électriques photovoltaïques hybride
- Installations électriques photovoltaïques autonomes

Dans ce mémoire on va baser sur les Installations électriques photovoltaïques autonomes.

### I.8.1 Installation électriques photovoltaïque autonomes

En site isolé, le champ photovoltaïque (1) (figure I.9) peut fournir directement l'énergie électrique nécessaire pour faire fonctionner les récepteurs (éclairage et équipement domestique). Un système de régulation (2) et une batterie (3) d'accumulateurs permettent de stocker l'énergie électrique qui sera ensuite utilisé en l'absence du soleil. Les batteries sont utilisées pour stocker l'énergie électrique sous une forme chimique. Elles restituent l'énergie électrique au besoin selon ses caractéristiques [10].

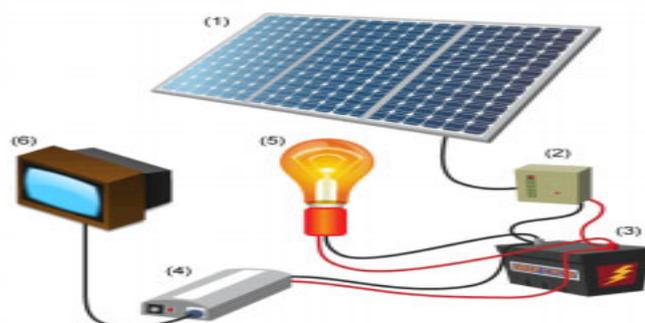


Figure I.9 : Schéma typique d'un système photovoltaïque autonome [10].

### I.8.1.1 Le régulateur de charge (2)

Le régulateur de charge principalement sert avant tout à contrôler l'état de la batterie. Il existe plusieurs valeurs limites correspondant chacune à un type de protection différent : surcharge, décharge profonde, température de fonctionnement, court-circuit, etc. Les nouvelles générations de régulateurs, quant à eux, sont de plus en plus perfectionnées et proposent des fonctionnalités plus nombreuses et de plus en plus évoluées [10].

## I.9 La prise en charge de plusieurs modes de charges

La charge idéale d'une batterie ne se fait pas à tension constante. Les batteries à décharge profonde demandent d'être rechargées en trois étapes distinctes. Elles ont besoin d'une charge rapide pulsée (Buck ou boost) suivie d'une charge lente (absorption). Ensuite le voltage est abaissé et maintenu à valeur fixe ; charge de maintien ou phase d'entretien (float) [11].

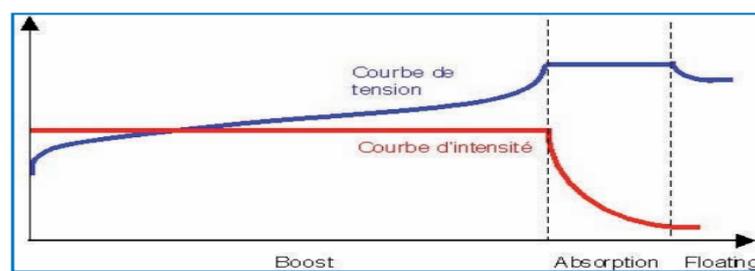


Figure I.10 : Courbe de charge de la batterie [11].

## I.10 Étage d'Adaptation entre un Générateur PV et une Charge

Un GPV présente des caractéristiques  $I(V)$  non linéaires avec des points de puissance maximaux (PPM). Ces caractéristiques dépendent au niveau d'éclairement et de la température de la cellule. De plus, selon les caractéristiques de la charge sur laquelle le GPV débite, nous pouvons trouver un très fort écart entre la puissance potentielle du générateur et celle réellement transférée à la charge en mode connexion directe. Afin d'extraire à chaque instant le maximum de puissance disponible aux bornes du GPV et de la transférer à la charge, la technique utilisée classiquement est d'utiliser un étage d'adaptation entre le GPV et la charge comme décrit dans la figure I.11 Cet étage joue le rôle d'interface entre les deux éléments en assurant à travers une action de contrôle, le transfert du maximum de puissance fournie par le générateur pour qu'elle soit la plus proche possible de P<sub>MAX</sub> disponible [13].

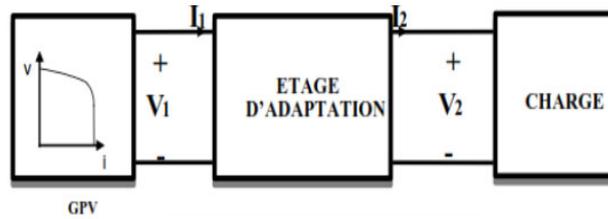


Figure I .11 : Etage d'adaptation entre un GPV et une charge [11].

L'adaptateur communément utilisé en PV est un convertisseur statique (convertisseur de puissance DC/DC).

Dans la suite, nous allons présenter en termes simples les caractéristiques d'un générateur photovoltaïque.

### I.11 Les caractéristiques d'un générateur photovoltaïque

Les modules photovoltaïques ont un point commun : la tension et le courant qu'ils débitent, varient en fonction de l'ensoleillement et de la température. A cet effet, il faut donc gérer au mieux cette variabilité imprévisible de production d'énergie [11].

La figure I.12 montre les caractéristiques courant-tension ( $V_{pv}$ ) et puissance-tension ( $V_{pv}$ ) d'un générateur photovoltaïque pour une température et un niveau d'ensoleillement donnés [14].

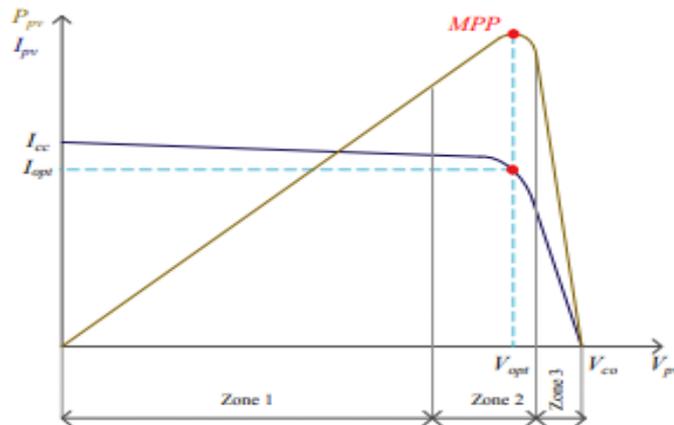


Figure I.12 : Caractéristiques ( $V_{pv}$ ) et ( $P_{pv}$ ) d'un générateur PV pour une température et un pour une température et un niveau d'ensoleillement donnés [14].

Nous pouvons décomposer la figure I.12 suivant l'axe de la tension photovoltaïque  $V_{pv}$  en trois zones.

- Zone 1 : elle est assimilable à un générateur de courant  $I_{cc}$  proportionnel à l'irradiation. Le fonctionnement de la cellule dans cette zone donne des puissances faibles, des courants élevés et des tensions faibles.

- Zone 3 : elle est assimilable à un générateur de tension  $V_{co}$ , le fonctionnement de la cellule dans cette zone donne des puissances faibles, des courants faibles et des tensions élevées.

- Zone 2 : elle correspond au coude de cette caractéristique, le fonctionnement du générateur dans cette zone donne des puissances élevées à valeurs de courant et tension modérées. Un point optimal de puissance "MPP" (maximum power point) peut être identifié au point  $(I_{opt}, V_{opt})$ . Par conséquent, ce point de fonctionnement permet d'exploiter au mieux le gisement solaire.

La nature intermittente de l'énergie solaire, fonction des conditions météorologiques ainsi que des demandes coté consommateur, rend complexe la possibilité d'un fonctionnement optimal. Remédier aux problèmes d'optimisation et de gestion des systèmes photovoltaïques, impose généralement un étage d'adaptation comprenant un ou plusieurs convertisseurs statiques, contrôlés par des stratégies de poursuite en temps réel du point de fonctionnement à puissance maximale dites "MPPT" (Maximum Power Point Tracking).

Les caractéristiques tension-courant et puissance-tension varient sensiblement avec la température et sous divers éclairagements. L'augmentation d'ensoleillement à température fixe, se traduit respectivement par une augmentation de courant photovoltaïque et de la puissance produite,

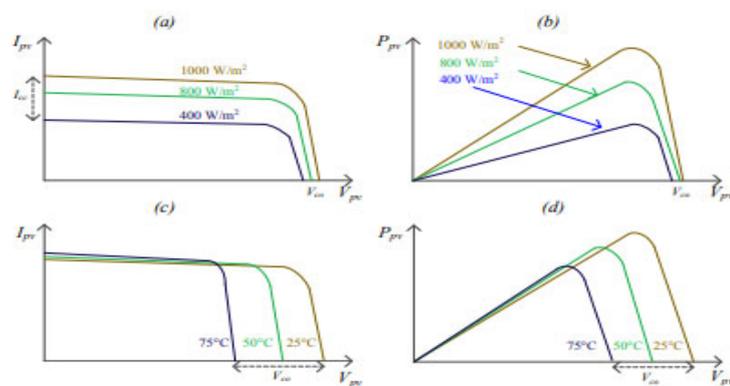


Figure I.13 : Comportement des caractéristiques ( $V_{pv}$ ) et ( $V_{pv}$ ) sous l'influence de ((a) et (b)) : l'éclairement à température fixe, ((c) et (d)) : la température à éclairement fixe [14].

La figure I.13 (a) et (b). L'accroissement du courant de court-circuit  $I_{cc}$  est beaucoup plus important que celui de la tension à circuit ouvert  $V_{co}$ . Par ailleurs, une augmentation de la température à éclairage fixe, engendre une diminution de la tension de circuit ouvert de l'ordre de 2 à 2.5  $mV/°C$  pour une cellule cristalline [15].

En se référant à la figure I.13, il est évident qu'une hausse de l'éclairage et une baisse de la température favorisent l'exploitation des champs photovoltaïques. Cependant, ces deux conditions ne sont que rarement vérifiées simultanément dans l'année. En outre, sachant que l'éclairage est le paramètre prépondérant pour fonctionner en plein régime ; le peu de retour d'expérience, nous informe que le rendement d'une installation solaire même au Sahara n'est pas aussi élevé qu'attendu. À titre d'exemple, l'expérience menée durant un mois (fin avril-fin mai 2003) [16], où les conditions météorologiques étaient proches des conditions STC (1000  $W/m^2$ , 25  $°C$ ) ont montré que la surface des cellules atteignait une température moyenne de 80  $°C$ , et que le rendement chuté de 69% par rapport à sa valeur maximale.

### I.12 Les caractéristique I/V et P/V utilisé dans la simulation

Le model de panneau utilisé dans notre étude est BP350 et on a rempli les paramètres de ce model [8].

Les caractéristiques de panneau sont regroupées sur le tableau ci-dessous :

| Caractéristiques    | Valeur |
|---------------------|--------|
| Nombre de cellules  | 72     |
| Tension $V_{ppm}$   | 17.5V  |
| Courant $I_{ppm}$   | 2.89A  |
| Courant $I_{cc}$    | 3.20A  |
| Tension $V_{co}$    | 21.8V  |
| Puissance $P_{ppm}$ | 50 W   |

Table I.1 : Les différentes caractéristiques du panneau [8].

Avec :

$I$  : Intensité aux bornes du générateur = 3.2157A

$I_S$  : Le courant de saturation de la diode =  $1.1687 \cdot 10^{-10}$

$R_S$  : Résistance série =  $0.55804 \Omega$

$R_{sh}$  : Résistance shunt =  $113.5349 \Omega$

$A$  : Le facteur d'idéalité de la diode = 0.49152

La simulation effectuée avec le logiciel Matlab/Simulink®.

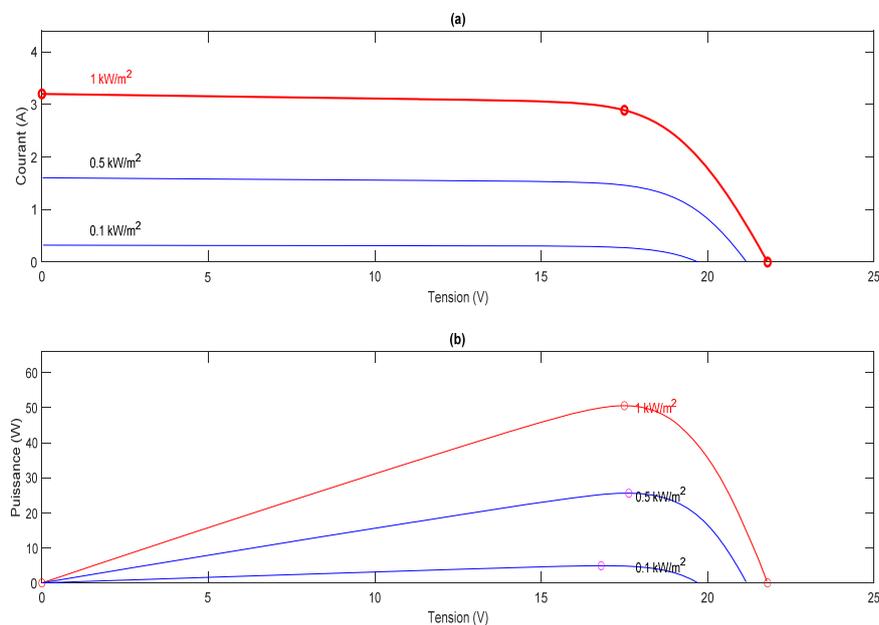


Figure I.14 : a- Caractéristique I (V) d'un module (BP350) pour différentes valeurs de l'éclairement en température standard  $T=25^{\circ}\text{C}$ . b- Caractéristique P(V) d'un module (BP350) pour différentes valeurs de l'éclairement standard  $T=25^{\circ}\text{C}$ .

Comparant avec les caractéristiques données par le constructeur, nous déduisons un bon accord entre les caractéristiques expérimentales et celles déduites par simulation sous MATLAB. Pour chacune de différentes caractéristiques, correspond une puissance que pourrait fournir le panneau. Notons aussi la légère diminution de la tension du circuit ouvert suite à la diminution du flux lumineux. Aussi nous remarquons que le courant est directement proportionnel à l'irradiation à ces niveaux d'éclairement.

### **I.13 Protection d'électricité d'un système d'énergie électrique**

Un générateur photovoltaïque est par définition, une installation électrique extérieure qui doit être protégée contre les effets des intempéries telles que la pluie, le vent, la foudre, etc. D'autre part elle doit présenter quelque condition de sécurité nécessaire.

La stabilité d'un système de puissance est l'aptitude d'un système d'énergie électrique, pour une condition de fonctionnement initiale donnée, à regagner un état de fonctionnement équilibré après avoir subi une perturbation physique. En gardant la plupart des variables du système dans leurs bornes, de manière que l'intégrité du système soit préservée. L'intégrité du système est préservée quand tout le système électrique reste pratiquement intact, sans avoir recours au déclenchement des générateurs ou des charges [14].

### **I.14 Type de Stabilité**

Avant de commencer l'analyse et le traitement des problèmes liés à la stabilité des systèmes de puissance, il est primordial d'identifier la classe de perturbations, source du problème. Selon la nature physique de l'instabilité, sa plage de temps et son amplitude, trois catégories de stabilité peuvent être distinguées [11].

#### **I.14.1 Phénomènes de stabilité liés à "l'angle rotorique"**

La stabilité de "l'angle interne" concerne la capacité des machines synchrones d'un système de puissance interconnecté de rester en synchronisme suite à une perturbation. Elle dépend de la capacité de maintenir/restaurer l'équilibre entre les couples électromagnétique et mécanique agissant sur le rotor de chaque machine synchrone dans le système. L'instabilité qui peut résulter se produit sous forme d'augmentation des oscillations angulaires de certains générateurs pouvant conduire à une perte de synchronisme avec d'autres générateurs [17].

#### **I.14.2 Phénomènes de stabilité liés à la tension**

La stabilité de tension se rapporte à la capacité d'un système de puissance à maintenir des tensions acceptables à tous ses nœuds, dans des conditions du fonctionnement normales ou suite à une perturbation. L'instabilité qui pourrait provenir, survient sous la forme d'une baisse progressive ou d'une augmentation de la tension de certains nœuds [12].

La figure I.15 présente les principales catégories de stabilité d'un système de puissance.

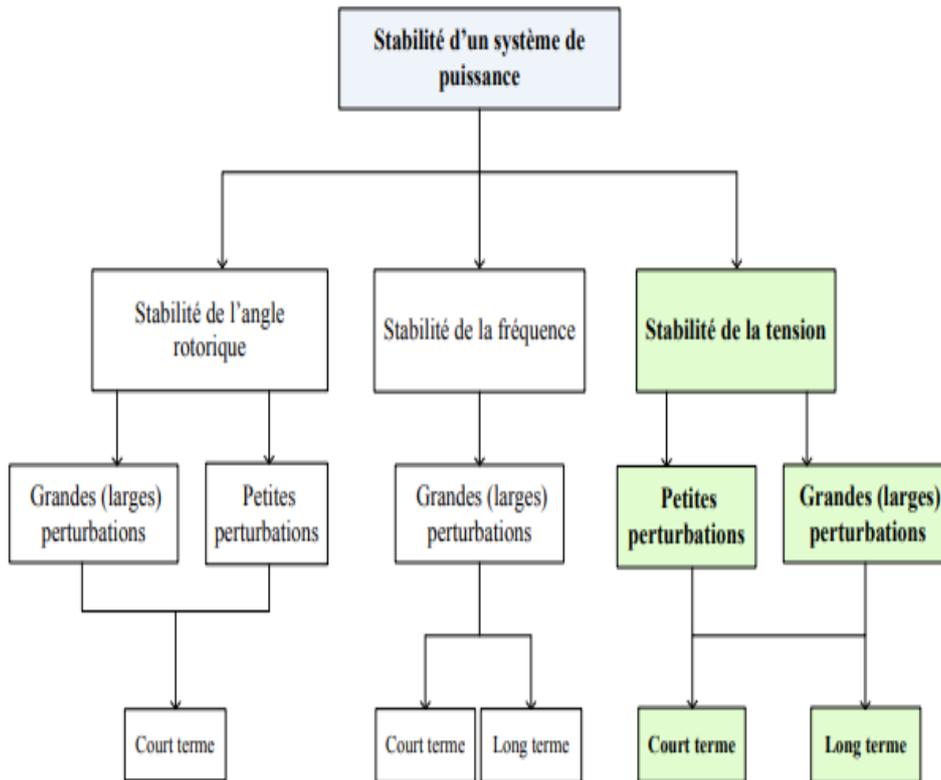


Figure I.15 : Classification des catégories de stabilité des systèmes de puissance.

À la vue de l'application traitée dans cette thèse, seule la catégorie de stabilité liée à la tension sera développée.

#### **I.14.2.1 Causes des phénomènes d'instabilité liés à la tension :**

Le facteur principal contribuant à l'instabilité de la tension est généralement lié à la chute de la tension qui survient lors d'une variation de puissance conséquente (supérieure ou égale à la puissance nominale du système) à travers des éléments passifs associés aux filtres de sortie. Cela provoque un chargement excessif de ces éléments, ce qui engendre des pertes réactives élevées et amoindrit la puissance maximale transmissible. Il est alors possible de perdre, si la puissance apparente consommée est excessive, la contrôlabilité du système [14].

### **I.15 Conclusion :**

Les thématiques développées au cours de ce chapitre visent à préciser les objectifs de ce travail de thèse. Pour cela, ce chapitre était consacré de l'énergie photovoltaïque. Nous avons rappelé quelques généralités liées au domaine photovoltaïque, on a fait la simulation sous Matlab Simulink pour montrer les caractéristiques du panneau utilisé, à la fin de ce chapitre. Nous avons présenté les protections d'électricité liés au système d'énergie électrique.

# Chapitre II

# Chapitre II : Les convertisseurs DC/DC

## II.1 Introduction

Pour que la puissance fournie par le générateur à la charge soit maximale, il faut en permanence poursuivre le point appelé Point de Puissance Maximale (PPM) sur la fonction caractéristique du courant fournie par le générateur en fonction de sa tension. Dans le chapitre précédent, nous avons vu les caractéristiques  $I=f(V)$  et  $P=f(V)$  d'un panneau solaire qui montrent bien que la puissance maximale générée dépend fortement de l'intensité des radiations solaires ainsi que de la température. En plus de ces dépendances, le panneau solaire ne peut générer puissance maximale que pour une certaine tension et courant de fonctionnement, La position de ce point de fonctionnement dépendant à son tour de l'ensoleillement et de la température ainsi que de la charge [19].

Pour assurer le fonctionnement optimal du PV, un équipement de commande doit être mis entre le PV et la charge, dont le but est l'adaptation des deux équipements (panneau photovoltaïque /charge) pour un meilleur transfert d'énergie vers la charge. Ce dernier peut augmenter d'une manière significative le rendement en puissance du PV, nous utilisons pour cela un convertisseur statique DC- DC (hacheur) menu d'une commande MPPT, ce qu'on appelle poursuite de point de puissance maximale. (Nous allons détailler la commande MPPT dans le chapitre III).

Dans cette partie nous allons voir le principe de fonctionnement des convertisseurs DC-DC dont le rôle primordial est de transformer une puissance continue d'entrée fixe en une puissance continue de sortie variable, Le dimensionnement de convertisseur que l'on a choisi et son modèle mathématique.

## II.2 Le Convertisseur Statique

Un convertisseur statique est un dispositif, à base de semi-conducteurs, qui transforme de l'énergie électrique disponible, en une forme appropriée pour alimenter une charge [19].

Les convertisseurs statiques sont des dispositifs à composants électroniques capables de modifier la tension et/ou la fréquence de l'onde électrique [19].

## Chapitre II : Les convertisseurs DC/DC

---

### II.3 Le hacheur

Les hacheurs sont des convertisseurs statiques continu-continu permettant de générer une tension continue variable à partir d'une source de tension fixe. Ils se composent des condensateurs, d'inductances et de commutateurs [20].

### II.4 Le rôle du convertisseur DC/DC

L'utilisation des convertisseurs DC -DC permet le contrôle de la puissance électrique dans les circuits fonctionnant en courant continu avec une très grande souplesse et un rendement élevé. Dans les systèmes photovoltaïques les convertisseurs DC-DC permettent de poursuivre le point de fonctionnement optimum.) [10].

### II.5 Le commutateur du convertisseur statique

Généralement le commutateur est un transistor MOSFET qui travaille en mode bloqué-saturé. Si le commutateur est bloqué, son courant est nul, il ne dissipe donc aucune puissance, s'il est saturé, la chute de tension à ses bornes sera presque nulle et par conséquent la puissance perdue sera très petite. Le commutateur du convertisseur est commandé par un signal PWM (Pulse Width Modulation) ou MLI (Modulation Largeur d'Impulsion), avec une fréquence de commutation  $F$  et un rapport cyclique  $D$  variable. La Figure II.2 montre le signal de commande PWM du commutateur [39].

D'abord on ferme le commutateur pendant un temps de fermeture égal à  $DT$ , ensuite on l'ouvre durant un temps d'ouverture égal à  $(1-D)T$ , où :

- $T$  est la période de commutation qui est égale à  $1/F$ .
- $D$  est le rapport cyclique du commutateur  $D \in [0, 1]$ .

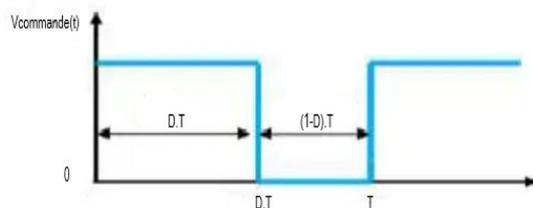


Figure II.1 : Tension de commande (PWM) du commutateur [39].

## Chapitre II : Les convertisseurs DC/DC

### II.6 Les types de convertisseurs DC/DC

Il y a un plusieurs topologies des convertisseurs DC-DC. Ils sont classés par catégorie selon que la topologie isolée ou non isolée. Les topologies isolées emploient un transformateur d'isolement fonctionnant à haute fréquence, elles sont très employées souvent dans les alimentations à découpage. Les topologies les plus connues dans la majorité des applications sont le Fly back, en demi-point et en pont complet. Dans les applications photovoltaïques (PV), les systèmes de couplage avec le réseau électrique emploient souvent ces types de topologies quand l'isolement électrique est préféré pour des raisons de sûreté [21].

Les topologies non isolées ne comportent pas de transformateurs d'isolement. Elles sont généralement utilisées dans l'entraînement des moteurs à courant continu [21]. Ces topologies sont encore classées en trois catégories :

- Elévateurs (Boost).
- Abaisseurs (Buck).
- Elévateurs-Abaisseurs (Buck-Boost).

### II.7 Le convertisseur survolteur

Le convertisseur survolteur, connu aussi sous le nom de « Boost ». Il est utilisé pour convertir sa tension d'entrée en une tension de sortie supérieure. Son schéma de principe est présenté sur la figure II.2 [22].

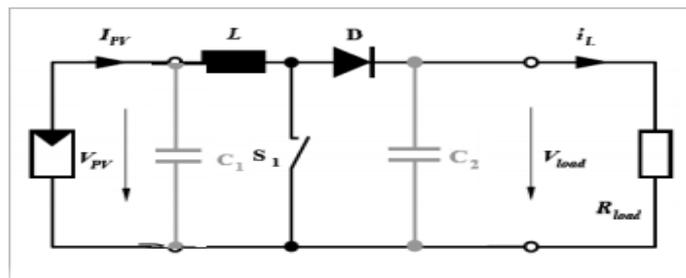


Figure II.2 : Schéma de principe d'un survolteur [22].

Afin de pouvoir synthétiser les fonctions du convertisseur survolteur à l'état d'équilibre, il est nécessaire de présenter les schémas équivalents du circuit à chaque position de l'interrupteur K. La figure (II.3) représente les deux schémas équivalents du convertisseur survolteur pour les deux cycles deux fonctionnements.

## Chapitre II : Les convertisseurs DC/DC

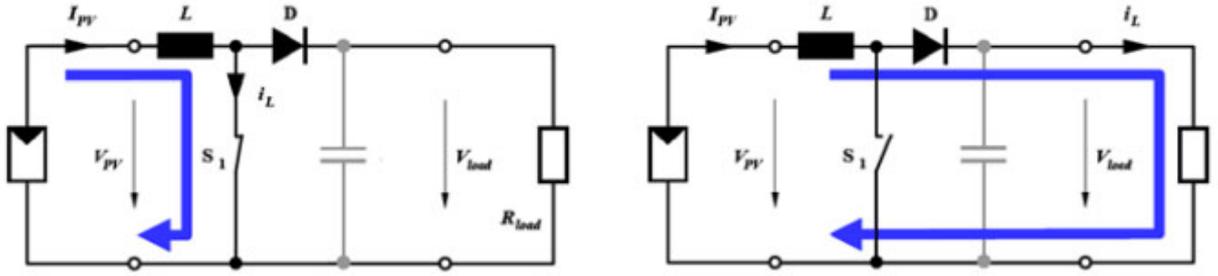


Figure II.3 : Schémas équivalents du convertisseur survolteur (a), K fermé (b), ouvert.

Lorsqu'on applique la loi de Kirchhoff sur les deux circuits équivalents du convertisseur survolteur des deux phases de fonctionnement, on aura les deux systèmes d'équations suivantes :

Pour la première période  $dT_s$  :

$$\begin{cases} i_{c1} = c1 \frac{dv_i(t)}{dt} = i_i(t) - i_l(t) \\ i_{c2} = c2 \frac{dv_o(t)}{dt} = -i_o(t) \\ v(t) = l \frac{di_l}{dt} = -v_i(t) \end{cases} \quad (\text{II.1})$$

Pour la deuxième période  $(1-d) T_s$ :

$$\begin{cases} i_{c1} = c1 \frac{dv_i(t)}{dt} = i_i(t) - i_l(t) \\ i_{c2} = c2 \frac{dv_o(t)}{dt} = i_l(t) - i_i(t) \\ v(t) = l \frac{di_l}{dt} = v_i(t) - v_o(t) \end{cases} \quad (\text{II.2})$$

Pour trouver une représentation dynamique valable pour tout la période  $T_s$  , on utilise généralement l'expression suivante [23] :

$$\left\langle \frac{dx}{dt} \right\rangle_{T_s} = \frac{d_s}{dt dT_s} d T_s + \frac{dx}{dt(1-D)T_s} (1-D)T_s .$$

Où  $\left\langle \frac{dx}{dt} \right\rangle$  est la valeur moyenne de la dérivée de x sur une période. Cette relation est valide

Si  $\frac{d_s}{dt dT_s}$  et  $\frac{dx}{dt(1-D)T_s}$  sont constants sur les périodes  $dT_s$  et respectivement  $(1-D)T_s$  .

En appliquant la relation (II.3) sur les systèmes d'équations (II.1) et (II.2), on trouve le modèle approximé du convertisseur survolteur.

## Chapitre II : Les convertisseurs DC/DC

$$\begin{cases} i_l(t) = i_i(t) - c_1 \frac{dv_i(t)}{dt} \\ i_0(t) = (1-d)i_l - c_2 \frac{dv_i(t)}{dt} \\ v_i(t) = l \frac{di_l}{dt} = (1-d)v_0 \end{cases} \quad (\text{II.3})$$

Pour une étude en régime continu, en éliminant les dérivées des variables dynamiques, et en remplaçant ces signaux par leurs valeurs moyennes. Le système d'équations devient :

$$\begin{cases} i_0 = (1-d)i_1 \\ i_i = i_1 \\ v_i = (1-d)v_0 \end{cases} \quad (\text{II.4})$$

Le rapport de conversion est défini comme étant le rapport entre la tension de sortie et la tension d'entrée comme suit [23] :

$$M = \frac{v_0}{v_i} = \frac{d}{1-d} \quad (\text{II.5})$$

Donc le convertisseur survolteur est bien élévateur de tension

### II.8 Convertisseur dévolteur

Le convertisseur dévolteur peut être souvent trouvé dans la littérature sous le nom « Buck ». Son application typique est de convertir sa tension d'entrée en une tension de sortie inférieure. La figure (II.4) représente le schéma de principe du convertisseur dévolteur [22],[23].

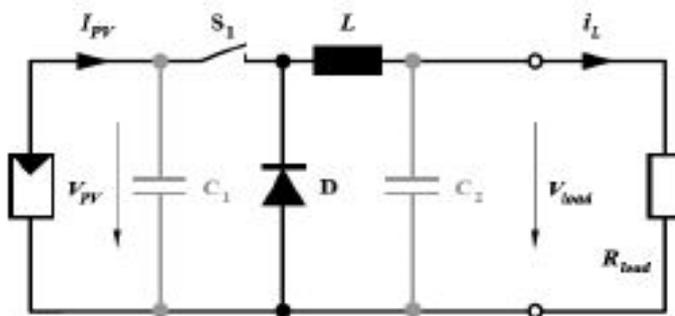


Figure II.4 : Schéma du circuit électrique d'un convertisseur dévolteur [23].

Afin de pouvoir synthétiser les fonctions du convertisseur dévolteur à l'état d'équilibre, il est nécessaire de présenter les schémas équivalents du circuit à chaque position de l'interrupteur K. La figure (II.5) représente les deux schémas équivalents du convertisseur dévolteur pour les deux cycles deux fonctionnements [22], [23].

## Chapitre II : Les convertisseurs DC/DC

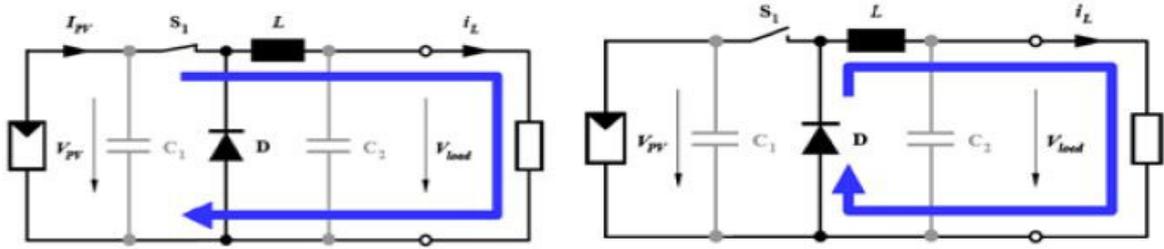


Figure II.5 : Schémas équivalents du convertisseur dévolteur [22].

Comme pour le convertisseur survolteur, en appliquant les lois de Kirchhoff sur les deux circuits de la figure (II.5), on obtient les systèmes d'équations suivants :

Pour la première période  $dT_s$  :

$$\begin{cases} i_{c1}(t) = c1 \frac{dv_i(t)}{dt} = i_i(t) - i_l(t) \\ i_{c2}(t) = c2 \frac{dv_0(t)}{dt} = i_l(t) - i_0(t) \\ i_l(t) = l \frac{di_l}{dt} = v_i(t) - v_0(t) \end{cases} \quad (\text{II.7})$$

Pour la deuxième période  $(1-d) T_s$  :

$$\begin{cases} i_{c1}(t) = c1 \frac{dv_i(t)}{dt} = i_i(t) \\ i_{c2}(t) = L \frac{di_L(t)}{dt} = i_L(t) - i_0(t) \\ i_l(t) = l \frac{di_l}{dt} = -v_0(t) \end{cases} \quad (\text{II.8})$$

En appliquant la relation (II.3) sur les systèmes d'équations (II.7) et (II.8), on trouve le modèle approximé du convertisseur dévolteur.

$$\begin{cases} i_0(t) = i_L(t) - c_2 \frac{dv_0(t)}{dt} \\ i_L(t) = \frac{1}{d} (i_l(t) - c_1 \frac{dv_i(t)}{dt}) \\ v_i(t) = \frac{1}{d} ((L \frac{di_L(t)}{dt} + v_0(t))) \end{cases} \quad (\text{II.9})$$

Pour une étude en régime continu, en éliminant les dérivées des variables dynamiques, et en remplaçant ces signaux par leurs valeurs moyennes. Le système d'équations devient :

$$\begin{cases} i_0 = di_l \\ i_0 = i_l \\ dv_i = v_0 \end{cases} \quad (\text{II.10})$$

## Chapitre II : Les convertisseurs DC/DC

Le rapport de conversion du convertisseur dévolteur est donné par [16], [17] :

$$M = \frac{v_0}{v_i} = d \quad (\text{II.11})$$

Donc le Buck série est bien abaisseur de tension.

### II.9 Convertisseur dévolteur-survolteur

Le convertisseur dévolteur-survolteur a acquis les caractéristiques et les propriétés électriques des deux types évoqués précédemment. Il présente donc une sortie d'un transformateur hybride (abaisseur/élevateur) pour une tension d'entrée/sortie continue, son schéma de base est illustré par la figure (II.6) [16], [17].

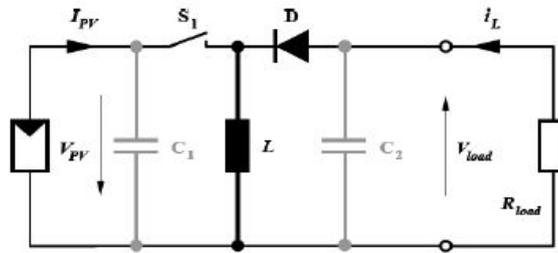


Figure II.6 : Schéma de base d'un dévolteur / survolteur [22].

La figure (II.7) montre les deux schémas équivalents du convertisseur dévolteur survolteur pour les deux cycles de fonctionnement [22] [23].

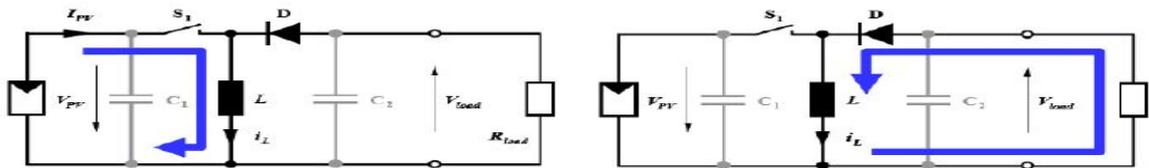


Figure II.7 : Schémas équivalents du Convertisseur dévolteur-survolteur [23].

En appliquant la loi de Kirchhoff sur les deux circuits équivalents du convertisseur dévolteur-survolteur des deux phases de fonctionnement, on obtient :

Pour la première période  $dTs$ .

$$\begin{cases} i_{c1}(t) = c1 \frac{dv_i(t)}{dt} = i_i(t) - i_L(t) \\ i_{c2}(t) = c2 \frac{dv_0(t)}{dt} = -i_0(t) \\ v_L(t) = L \frac{di_L}{dt} = v_l(t) \end{cases} \quad (\text{II.12})$$

## Chapitre II : Les convertisseurs DC/DC

---

Pour la deuxième période (1-d) Ts :

$$\begin{cases} i_{c1}(t) = c_1 \frac{dv_i(t)}{dt} = i_i(t) \\ i_{c2}(t) = c_2 \frac{dv_0(t)}{dt} = i_L(t) - i_0(t) \\ v_L(t) = L \frac{di_L}{dt} = v_0(t) \end{cases} \quad (\text{II.13})$$

En appliquant la relation (II.3) sur les systèmes d'équations (II.12) et (II.13), on trouve le modèle approximé du convertisseur dévolteur-survolteur.

$$\begin{cases} i_L(t) = \frac{1}{d} (i_i - c_1 \frac{dv_i(t)}{dt}) \\ i_0(t) = -\frac{1}{d} (1-d)i_L - c_2 \frac{dv_0(t)}{dt} \\ v_i(t) = -\frac{1}{d} (1-d)v_0 + L \frac{di_L}{dt} \end{cases} \quad (\text{II.14})$$

Comme précédemment, en annulant les dérivées des variables dynamiques, en remplaçant ces signaux par leurs grandeurs moyennes. Le système d'équations devient :

$$\begin{cases} I_0 = dI_L \\ I_0 = -(1-d)I_L \\ dV_i = -(1-d)V_0 \end{cases} \quad (\text{II.15})$$

A partir le système d'équations (II.15), on peut calculer le rapport de conversion du convertisseur dévolteur-survolteur [16], [17] :

$$M(d) = \frac{v_0}{v_i} = -\frac{d}{1-d}$$

Donc, le convertisseur est abaisseur/élevateur de tension.

### II.10 Rendement du convertisseur statique

Les convertisseurs Buck et Boost présentent un meilleur rendement. En effet, il existe d'autres configurations de convertisseur, mais dont le rendement est plus faible. Le tableau (II.1) ci dessus donne une idée sur le rendement de quelques convertisseurs connus.

L'expression du rendement du convertisseur est donnée par [10] :

$$\mu_{conv} = \frac{p_{out}}{p} \quad (\text{I.16})$$

## Chapitre II : Les convertisseurs DC/DC

---

| Structure  | Rendement de conversion | Batterie |
|------------|-------------------------|----------|
| Buck       | 93%                     | 12V      |
| Boost      | 92%                     | 24V      |
| Buck-Boost | 92%                     | 12-24    |
| Cuk        | 89%                     | 12V      |
| Flyback    | 79.1%                   | 24V      |
| Flyback    | 74%                     | 12V      |

Table II.1 : Différentes structures de convertisseurs statiques et leurs rendements [10].

### II.11 Le choix de convertisseur

La topologie Buck est employée pour les faibles tensions. Dans les applications PV, le convertisseur Buck est habituellement employé comme chargeur de batteries et dans des systèmes de pompage de l'eau.

La topologie boost est employée pour augmenter la tension. Les systèmes de production de l'énergie emploient un convertisseur boost pour augmenter la tension de sortie au niveau du service avant l'étage de l'onduleur.

Puis, il y a des topologies capables d'augmenter et de diminuer la tension telles que le Buck-Boost, Les convertisseurs DC-DC peuvent être vus comme des transformateurs DC-DC

Dans ce mémoire on a choisi le convertisseur DC/DC de type évaluateur (Boost).

### II.12 Dimensionnements des composants d'un convertisseur BOOST

#### II.12.1 Le cahier de charge pour le hacheur parallèle (BOOST)

Le dimensionnement des éléments du hacheur parallèle (BOOST) est basé sur le cahier de Charge donné par le tableau :

|                            | Paramètre        | Valeur nominale |
|----------------------------|------------------|-----------------|
| La Tension d'entrée        | $V_1$            | 17.3 V          |
| La tension de sortie       | $V_2$            | 24 V            |
| Le rendement               | $\eta$           | > 90 %          |
| L'ondulation du courant    | $\Delta I_{Max}$ | 500 mA          |
| L'ondulation de la tension | $\Delta V_2$     | 10 mV           |

Table II.2 : Le dimensionnement des éléments du hacheur parallèle (BOOST).

## Chapitre II : Les convertisseurs DC/DC

---

Avant de dimensionner les composants de nos hacheurs, il faut connaître d'abord leurs fréquences de commutation.

Il faut noter aussi que les composants sont limités en fréquence. Il n'est donc pas possible de choisir une fréquence de commutation trop élevée lorsque des contraintes d'encombrement sont imposées. Dans de nombreuses applications, la fréquence de commutation est choisie supérieure au domaine audible ( $\approx 20\text{KHz}$ ) [25].

On a choisi une fréquence de 40 KHz car c'est inaudible et on a le moins de pertes par commutation

La figure II.2 représentée le hacheur boost que nous allons considérer dans notre étude.

Afin de pouvoir dimensionner correctement les composants et notamment les semi-conducteurs, il est nécessaire de connaître les valeurs maximales (dans les conditions de fonctionnement les plus sévères) des tensions et des courants. Les expressions permettant d'obtenir les valeurs des différents composants du convertisseur sont :

$$\text{- Capacité d'entrée : } C_1 \geq \frac{\Delta i_L}{8V_{pv}f} \quad (\text{II.17})$$

$$\text{- Inductance : } L \geq \frac{V_{pv}\alpha}{2\Delta i_L f} \quad (\text{II.18})$$

$$\text{- Capacité de sortie : } C_2 \geq \frac{p_{pv}\alpha}{8v\Delta v f} \quad (\text{II.19})$$

En utilisant les expressions vues précédemment et après calcul, on obtient les valeurs satisfaisant le cahier de charges :

$$\text{- } C_1 \geq 150\mu F$$

$$\text{- } L \geq 120\mu H$$

$$\text{- } C_2 \geq 35\mu F$$

Finalement, les valeurs définitives choisies sont :

$$\text{- } C_1 \geq 220\mu F$$

$$\text{- } L \geq 140\mu H$$

$$\text{- } C_2 \geq 47\mu F$$

## Chapitre II : Les convertisseurs DC/DC

### II.13 Modèle mathématique du convertisseur Boost

Le modèle mathématique du hacheur parallèle est obtenu par l'application des lois de Kirchhoff sur le schéma représenté sur la Figure II.8 et par rapport au régime de fonctionnement et la condition de l'interrupteur S. Dans notre cas, le convertisseur est branché à un GPV en entrée et à une batterie en sortie. Les pertes de puissance sont supposées nulles et la chute de tension aux bornes de la diode est négligeable.

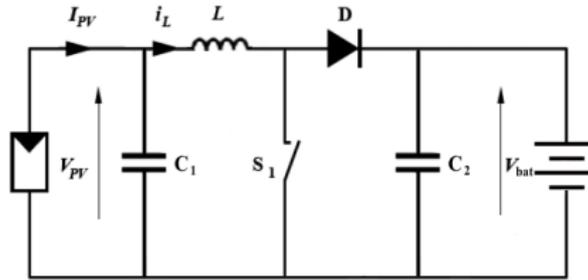


Figure II.8 : schéma de principe du hacheur parallèle [8].

La tension aux bornes de l'inductance et le courant à travers le condensateur \$C\_1\$ pour chaque état du commutateur (a : fermé, b : ouvert) sont donnés par :

$$a : \begin{cases} L \frac{di}{dt} = V_{pv} \\ C_1 = \frac{dv_{pv}}{dt} = i_{pv} - i_L \end{cases} \quad (\text{II.20})$$

$$b : \begin{cases} L \frac{di}{dt} = V_{pv} - V_{bat} \\ C_1 = \frac{dv_{pv}}{dt} = i_{pv} - i_L \end{cases} \quad (\text{II.21})$$

En utilisant la méthode de la valeur moyenne, on obtient les équations décrivant le système sur une période de commutation.

$$\begin{cases} L \frac{\overline{di}}{dt} = \overline{V_{pv}} - V_{bat} \overline{d}' \\ C_1 = \frac{d\overline{v_{pv}}}{dt} = \overline{i_{pv}} - \overline{i_L} \end{cases} \quad (\text{II.22})$$

## Chapitre II : Les convertisseurs DC/DC

---

L'analyse des petits signaux du système permet d'obtenir la représentation dans l'espace des états et la fonction de transfert suivante :

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \widehat{i_L} \\ \widehat{v_{pv}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{L} \\ -\frac{1}{C} & \frac{1}{r_{pv}C_1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \widehat{i_L} \\ \widehat{v_{pv}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\frac{v_{bat}}{L} \\ 0 \end{bmatrix} \widehat{d'} \quad (\text{II.23})$$

$$\text{Ou } r_{pv} = \frac{\widehat{v_{pv}}}{\widehat{r_{pv}}} \quad (\text{II.24})$$

$$y = [0 \quad 1] \begin{bmatrix} \widehat{i_L} \\ \widehat{v_{pv}} \end{bmatrix} \quad (\text{II.25})$$

$$G_{Boost}(s) = \frac{\widehat{v_{pv}}(s)}{\widehat{d'}(s)} = \frac{\frac{v_{bat}}{LC_1}}{s^2 + \frac{1}{r_{pv}C_1}s + \frac{1}{LC_1}} \quad (\text{II.26})$$

On remarque que le modèle mathématique du convertisseur Boost a un paramètre à temps variant qui est la résistance dynamique  $r_{pv}$ . La fonction de transfert représentant le système peut être écrit sous la forme d'un second ordre où  $K$  est le gain  $\xi$  est le facteur d'amortissement et  $\omega_n$  la pulsation propre.

$$G(S) = \frac{K}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} \quad (\text{II.27})$$

$$K = \frac{v_{bat}}{LC_1} \quad (\text{II.28})$$

$$\omega_n = \frac{1}{\sqrt{LC_1}} \quad (\text{II.29})$$

$$\xi = -\frac{1}{2r_{pv}C_1\omega_n} \quad (\text{II.30})$$

## Chapitre II : Les convertisseurs DC/DC

### II.14 Simulation d'un convertisseur Boost

Pour illustrer le principe de fonctionnement de convertisseur étudié dans ce mémoire on a fait la simulation suivante :

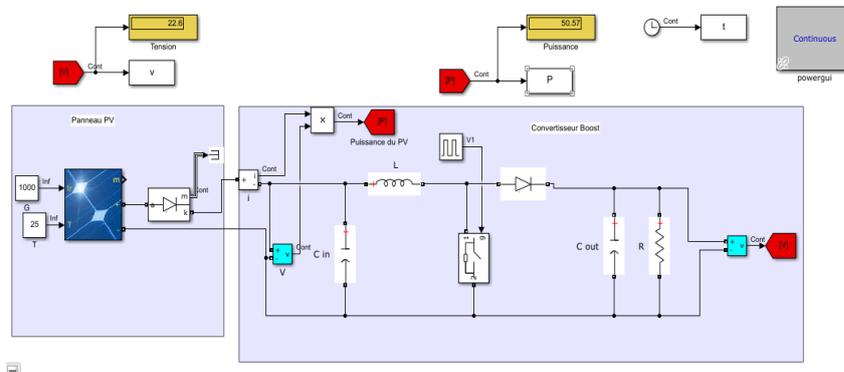


Figure II.9 : simulation d'un convertisseur BOOST avec un panneau PV de type BP350.

La figure II.9 représente la simulation d'un convertisseur BOOST connecté avec un panneau (PB350).

### II.15 Résultat de la simulation

Les résultats de la simulation sont présentés ci-dessous, Les valeurs des composants du CS ont été choisies selon les valeurs calculées précédemment. Avec  $R=10\Omega$ .

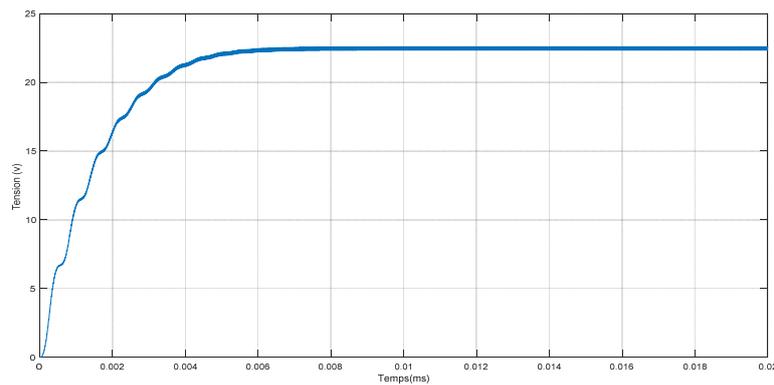


Figure II.10 : La tension de la sortie de convertisseur.

Les figures (II.10) représente la tension la sortie aux bornes de la charge du convertisseur Boost en fonction du temps, on remarque en régime permanent que la valeur atteinte par la tension est égale à 22V.

## **Chapitre II : Les convertisseurs DC/DC**

---

### **II.16 Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons entamé une partie importante de cette étude. Il s'agit de présenter les hacheurs tout en donnant les différents types des hacheurs avec un rappelle théorique sur chaque type. Ensuite, on a présenté le dimensionnement et le modèle mathématique du convertisseur utilisé, En fin on a réalisé la simulation de convertisseur BOOST avec un panneau PV pour montrer l'objectif de convertisseur utilisé.

# Chapitre III

# Chapitre III : Les algorithmes de poursuite du MPP

## III.1 Introduction

La puissance de fonctionnement des panneaux solaires est facile à calculer. Elle vaut le produit tension, courant. Mais, la détermination de la puissance de référence est plus délicate vue que cette dernière est fonction des paramètres météorologiques (température et éclairement). Cette référence variable, caractérisée par une fonction non linéaire, rend le fonctionnement à puissance maximale plus difficile à réaliser. Alors, une commande pour la poursuite du PPM s'impose. Cette commande, dite algorithme MPPT, peut être plus ou moins compliquée. Elle est basée généralement sur l'ajustement du rapport cyclique du convertisseur statique jusqu'à se placer sur le PPM. Différentes méthodes MPPT ont été publiées dans la littérature afin d'obtenir un fonctionnement optimal. Beaucoup de chercheurs s'intéressent au rappel et à la comparaison des différentes techniques MPPT qui existent dans la littérature. BHATNAGAR cite plus de trente techniques MPPT dans son article. ESRAM et CHAPMAN comparent plusieurs algorithmes MPPT selon leurs dépendances des paramètres des panneaux solaires et de leurs complexités d'implémentait [26].

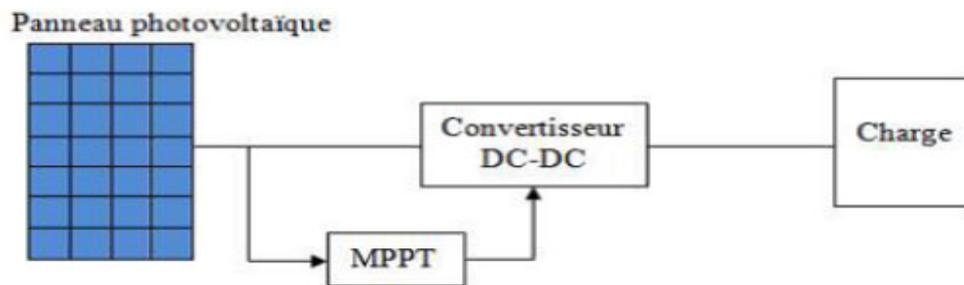


Figure III.1 : Schéma de principe du convertisseur MPPT [26].

## III.2 Techniques de commande MPPT

Au cours des dernières décennies, de nombreuses méthodes pour trouver le MPP ont été développées. Ces techniques diffèrent dans de nombreux aspects tels que les capteurs nécessaires, la complexité, le coût, la portée de l'efficacité, la vitesse de convergence, le suivi correct lors de l'irradiation et / ou le changement de température, le matériel nécessaire pour la mise en œuvre, entre autres.

## **Chapitre III : Les algorithmes de poursuite du MPP**

---

La classification des algorithmes du suiveur peut être basée sur la fonction des techniques ou des stratégies de commande utilisées. Ainsi, deux catégories peuvent être présentées : méthodes directes et indirecte [27].

### **III.2.1 Méthode direct**

Ce type de commandes MPPT utilise le lien existant entre les variables mesurées ( $I_{cc}$  ou  $V_{co}$ ), qui peuvent être facilement déterminées, et la position approximative du MPP. Il compte aussi les commandes se basant sur une estimation du point de fonctionnement du GPV réalisée à partir d'un modèle paramétrique défini au préalable. Il existe aussi des commandes qui établissent une poursuite de la tension optimale en prenant en compte uniquement les variations de la température des cellules donnée par un capteur. Ces commandes ont l'avantage d'être simples à réaliser. Elles sont plutôt destinées à des systèmes peu coûteux et peu précis devant fonctionner dans des zones géographiques où il y a peu de changements climatiques. Parmi ces méthodes, on retrouve la méthode de la tension de circuit ouvert du générateur, la méthode de court-circuit etc. [28].

### **III.2.2 Méthode indirecte**

Ce type de commande MPPT détermine le point de fonctionnement optimal (MPP) à partir des courants, tensions ou puissances mesurés dans le système. Il peut donc réagir à des changements imprévisibles du fonctionnement du GPV. Généralement, ces procédures sont basées sur un algorithme de recherche, avec lequel le maximum de la courbe de puissance est déterminé sans interruption du fonctionnement. Pour cela, la tension du point de fonctionnement est incrémentée 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. Le point de fonctionnement réel oscille alors autour du MPP. Ce principe de base peut être préservé par d'autres algorithmes contre des erreurs d'interprétation. Ces erreurs peuvent survenir, par exemple, à cause d'une mauvaise direction de recherche, résultant d'une hausse de puissance qui, est due à une augmentation rapide du niveau de rayonnement. La détermination de la valeur de la puissance du générateur PV, indispensable pour la recherche du MPP, nécessite la mesure de la tension et du courant du générateur, ainsi que la multiplication de ces deux variables. Parmi ces méthodes, on retrouve la méthode de différenciation, la méthode Perturbe & Observe (P&O), la méthode d'optimisation de l'essaim de particules (PSO), etc. [27].

## Chapitre III : Les algorithmes de poursuite du MPP

---

### III.3 Les Algorithmes MPPT

Il existe plusieurs principes de fonctionnement des commandes MPPT plus ou moins performantes basées sur les propriétés du GPV. Une synthèse des principaux modes de recherche du PPM existants dans ce chapitre nous a permis de bien identifier l'existant et les points qu'il restait à améliorer [10].

#### III.3.1 les algorithmes de MPPT. Les plus utilisés sont

- Algorithme de la Tension Constante (CV, Constant Voltage).
- Algorithme du Courant constant (Constant Current).
- Perturbation et Observation (P&O, Perturb and Observe).
- Conductance Incrémentale (IncCond, Incremental Conductance).

##### III.3.1.1 Algorithme 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 (III-1) liant cette tension avec la tension de point maximal  $V_{MPP}$  du GPV [29].

$$V_{mpp} = k_1 * V_{oc} \quad (III.1)$$

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 (III-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.

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  $V = V_{ref}$ .

## Chapitre III : Les algorithmes de poursuite du MPP

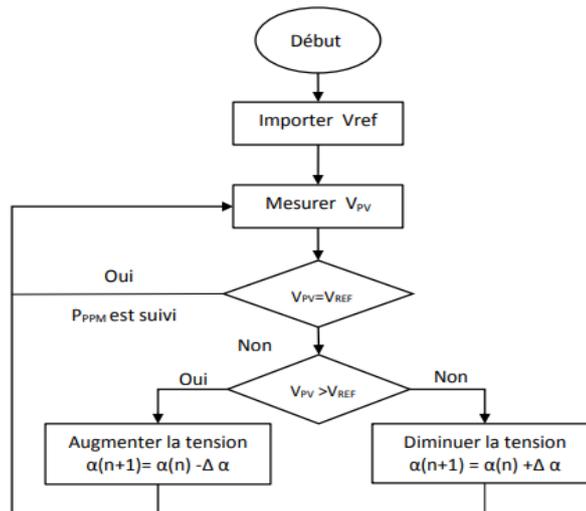


Figure III.2 : Algorithme de la Tension Constante [27].

Cette méthode présente deux avantages : la rapidité de la réponse aux fluctuations et l'absence de variations (même infimes) en état stationnaire [29]. Cependant, ces points forts ne peuvent cacher leurs défauts, à cause de la dépendance de la tension du panneau avec l'ensoleillement et la température, la tension de puissance maximale est déviée, alors la tension de référence doit être corrigée pour différents ensoleillements et températures au long des périodes de l'année Aussi, le MPP n'est pas toujours entre 71% et 78% de la tension Voc. et n'oublie pas la perte de la puissance disponible lors de la déconnection de la charge du GPV.

### III.3.1.2 Algorithme du Courant constant (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) et la relation linéaire approximative (III-2) liant ce courant avec le courant de point maximal  $I_{MPP}$  du GPV [30].

$$I_{MPP} = k_2 * I_{sc} . \quad (III-2)$$

Avec  $k_2$  constante de proportionnalité. Comme pour la méthode CV,  $k_2$  est déterminée pour le GPV utilisé. La constante  $k_2$  est généralement comprise entre 0.78 et 0.92 [30].

La mesure du courant  $I_{sc}$  durant le fonctionnement est problématique. Un commutateur est généralement ajouté au convertisseur de puissance pour court-circuiter le panneau et mesurer le courant  $I_{sc}$  à l'aide d'un capteur de courant.

## Chapitre III : Les algorithmes de poursuite du MPP

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 [30].

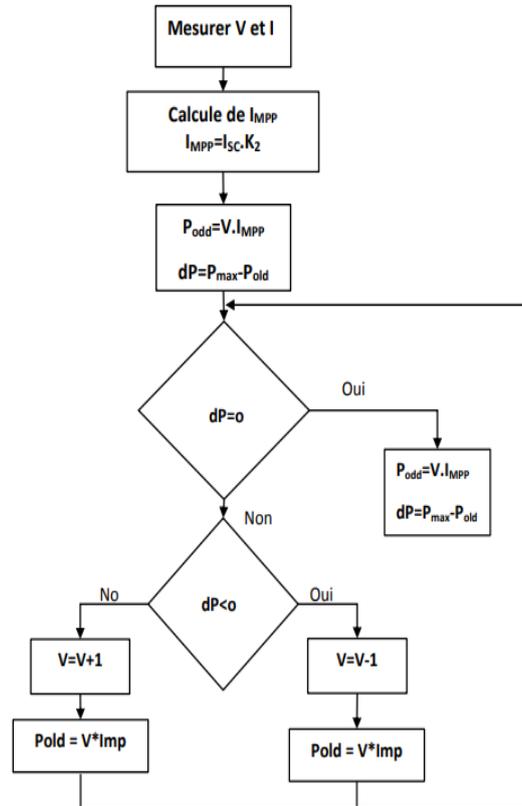


Figure III.3 : Algorithme du constant courant [27].

### III.3.1.3 Algorithme du Perturbation et Observation (Perturb & Observe, P&O)

La méthode de perturbation et observation (P&O) est une approche largement répandue dans la recherche de MPPT, parce qu'elle est simple et exige seulement des mesures de tension et de courant du PV,  $V_{PV}$  et  $I_{PV}$  respectivement, elle peut dépister le point maximum de puissance même lors des variations de l'éclairement et la température. Le principe de cet algorithme est d'effectuer une perturbation sur la tension et le courant du panneau PV, suite on a calculé la puissance fournie par ce panneau PV à l'instant  $k$   $P_{PV}(k)$ , puis on la compare à la précédente instant  $P_{PV}(k-1)$  [30].

## Chapitre III : Les algorithmes de poursuite du MPP

En va avoir par suivant la figure III.4 que représente la puissance fournie par ce panneau PV para pore la tension du module.

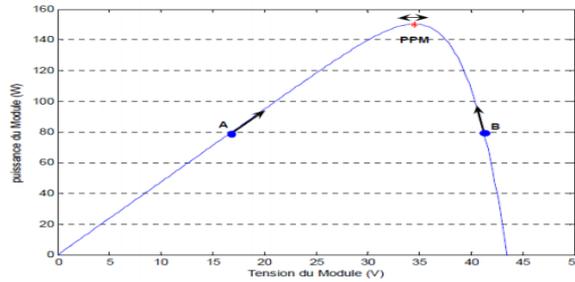


Figure III.4 : la courbe de puissance-Tension de panneau solaire [27].

Si la puissance de sortie a augmenté,  $V_{PV}$  est ajustée dans la même direction que dans l'instant précédent. Si la puissance de sortie a diminué,  $V_{PV}$  est ajustée dans la direction opposée que dans le cycle précédent. Lorsque le point de puissance maximale est atteint,  $V_{PV}$  oscille autour de la valeur optimale  $V_{OP}$ . Ceci cause une perte de puissance qui augmente avec le pas de l'incrémentation de la perturbation. Lorsque le pas d'incrémentation est grand, l'algorithme du MPPT répond rapidement aux changements soudains des conditions de fonctionnement.

D'un autre côté si le pas est petit, les pertes lors des conditions de changements atmosphériques lents ou stables, seront inférieures mais le système ne pourra pas répondre rapidement aux changements rapides de la température ou de l'éclairement. Le pas idéal est déterminé expérimentalement en fonction des besoins [30].

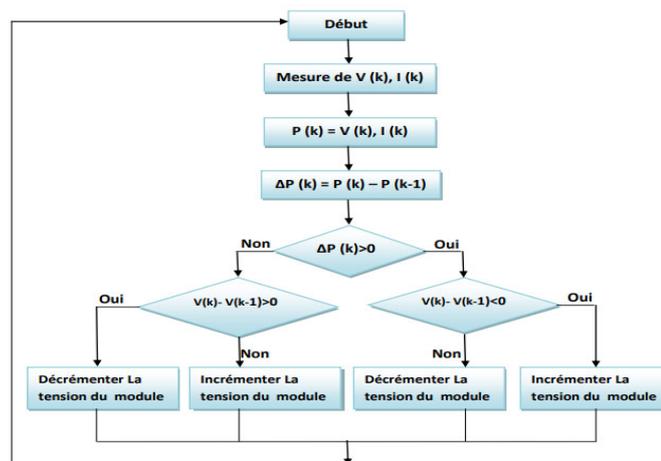


Figure III.5 : Organigramme de la méthode de perturbation et d'observation [28].

## Chapitre III : Les algorithmes de poursuite du MPP

Si une augmentation de l'ensoleillement, on aura donc une augmentation à la puissance du panneau. 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 qui l'éloigne du vrai point de puissance maximale. Ceci cause un retard de réponse lors des changements soudains de fonctionnement et des pertes de puissance. Pour remédier à l'inconvénient majeur de la déviation de cette méthode lors de la recherche du MPP durant l'augmentation rapide des niveaux d'insolation, une version améliorée de cet algorithme est proposée, où on introduit une nouvelle condition dans la branche « Oui » de condition  $\Delta P(k) > 0$  dans la structure de l'organigramme de l'algorithme de P&O [30].

### III.3.1.5 Algorithme du Conductance Incrémentale (IncCond, Incremental Conductance)

Cette méthode est basée 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 Figure III.6.

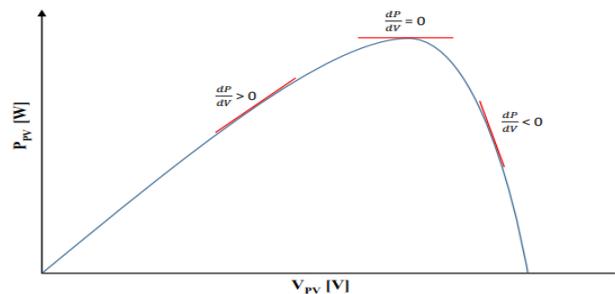


Figure III.6 : Caractéristique de tension-puissance du panneau [29].

On observe que :

$$\begin{cases} dP/dV = 0 & \text{ou PMM} \\ dP/dV > 0 & \text{à gauche de PMW} \\ dP/dV < 0 & \text{à droite de PMW} \end{cases} \quad (\text{III.3})$$

Puisque :

La puissance du panneau solaire est donnée par :

$$P = V \times I \quad (\text{III.4})$$

## Chapitre III : Les algorithmes de poursuite du MPP

---

Et sa dérivée partielle est donnée par :

$$\frac{dP}{dV} = \frac{d(IV)}{dV} = I + V \frac{dI}{dV} \cong I + V \frac{\Delta I}{\Delta V} \quad (\text{III.5})$$

Donc, l'équation (III-3) peut être écrite comme suit :

$$\begin{cases} \Delta I / \Delta V = -\frac{1}{V} & \text{le point de fonctionnnemtn est sur le PMM} \\ \Delta I / dV > -\frac{1}{V} & \text{le point de fonctionnnemtn est à gauche de PMW} \\ \Delta I / dV < -\frac{1}{V} & \text{le point de fonctionnnemtn est à droite de PMW} \end{cases} \quad (\text{III.6})$$

Le PPM peut être atteinte en comparant à chaque instant la valeur de la conductance (IPV/VPV) avec celle de l'incrément de conductance (dIPV/dVPV). Si l'incrément de conductance (dG) est supérieur à l'opposé de la conductance (-G), on diminue le rapport cyclique. Par contre, si l'incrément de conductance est inférieur à l'opposé de la conductance, on augmente le rapport cyclique. Ce processus est répété jusqu'à atteindre le PPM. La Figure III.7 montre l'algorithme de cette méthode [30].

Pratiquement, comme la méthode P&O, cette technique présente des oscillations autour du MPP car il est difficile de remplir la condition  $dP/dV = 0$ , ce qui fait que le système reste toujours en train de la chercher. L'algorithme IncCond est plus complexe que celui du P&O, ce qui engendre un temps d'exécution plus long [32].

Cette méthode peut être améliorée en amenant le point de fonctionnement près du MPP dans une première étape, puis d'utiliser l'algorithme IncCond pour suivre exactement le MPP dans une deuxième étape. Généralement, 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  $I_{sc}$ . Ces deux solutions assurent que le vrai MPP est poursuivi s'il existe plusieurs maxima locaux. Une manière moins évidente pour effectuer la méthode IncCond est d'utiliser la conductance instantanée et l'incrément de la conductance pour générer un signal d'erreur [32].

$$e = \frac{1}{V} + \frac{dI}{dV} \quad (\text{III.7})$$

## Chapitre III : Les algorithmes de poursuite du MPP

D'après l'équation (III-7), 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 [32].

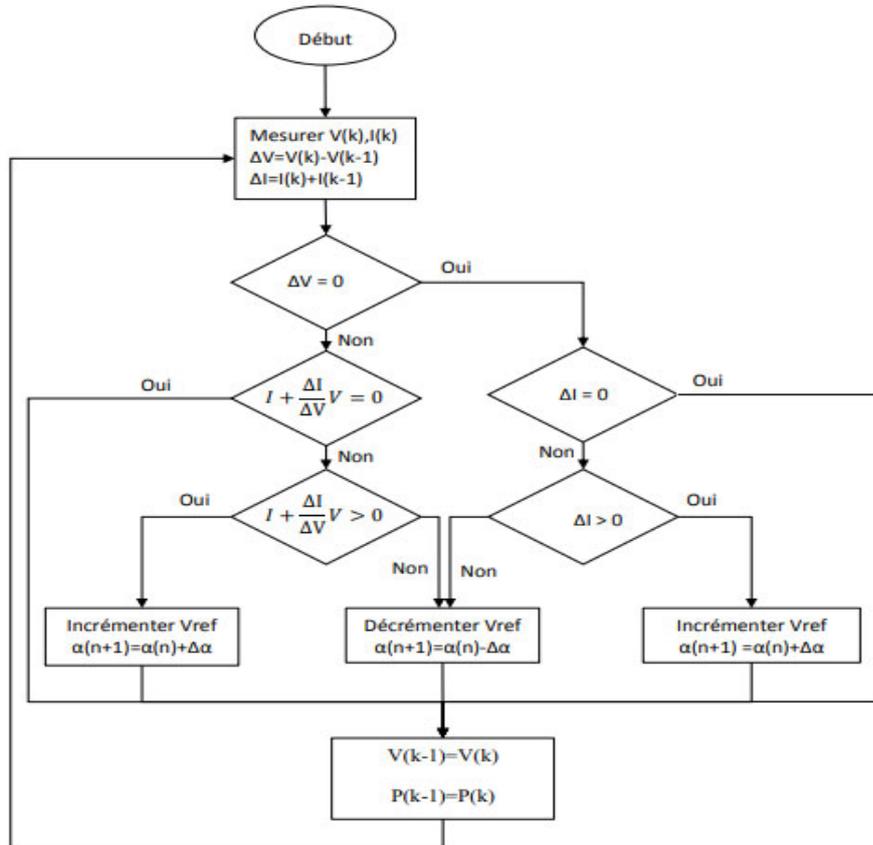


Figure III.7 : L'algorithme IncCond classique [10].

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 propose est [31] :

$$\alpha(k) = \alpha(k-1) \pm N \times \left| \frac{P(k) - P(k-1)}{V(k) - V(k-1)} \right| \quad (\text{III.8})$$

# Chapitre III : Les algorithmes de poursuite du MPP

## III.4 Simulation

Il s'agit de la simulation d'un panneau PV BP350 et un convertisseur Boost avec une commande MPPT à des conditions standard de température 25°C et l'éclairement 1000 w/m<sup>2</sup>

Comme nous avons au début de ce chapitre, le schéma de la commande MPPT est présenté dans la figure III.8 et pour illustrer le concept de MPPT nous avons réalisé la simulation suivante :

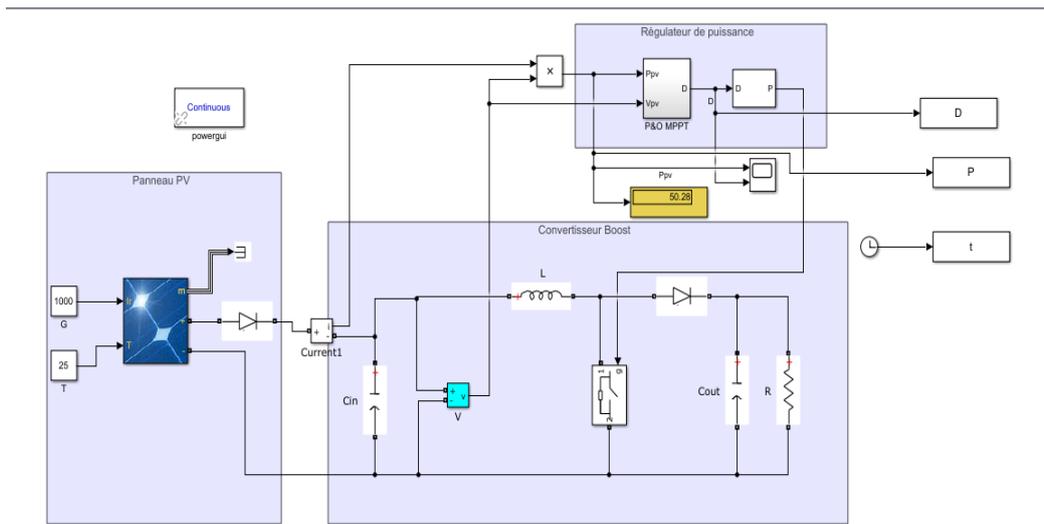


Figure III.8 : Simulation d'un Convertisseur Boost avec le panneau et le régulateur de MPP

### Résultat de la simulation :

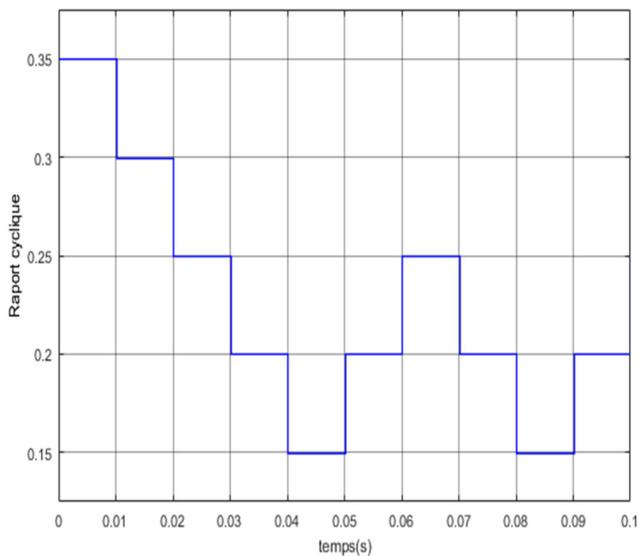


Figure III.9 : rapport cyclique

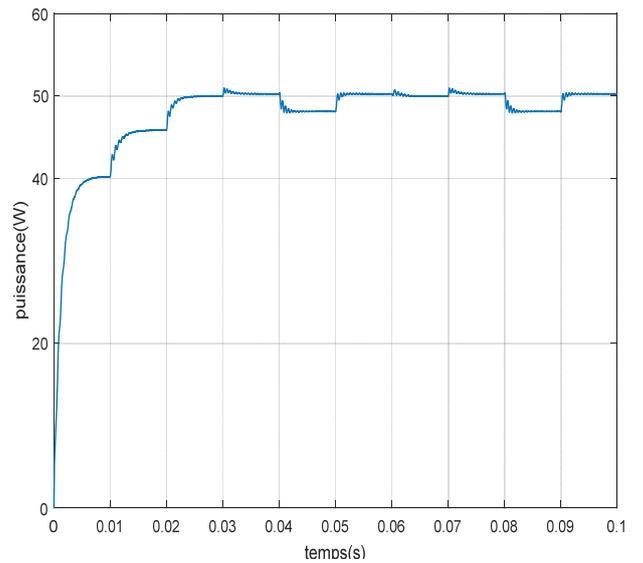


Figure III.10 : La puissance

## Chapitre III : Les algorithmes de poursuite du MPP

Dans la Figure III.9, le rapport cyclique augmente et diminue pour qu'il puisse toucher la puissance maximale.

Cela permet de dire que la puissance maximale atteinte du panneau PV de notre système fonctionne au point de puissance maximal (MPP) grâce à la commande MPPT (Maximum Power Point Tracking)

Dans la deuxième simulation nous avons simulé notre système dans différents niveaux d'irradiations et une température constante  $T = 25^{\circ}\text{C}$ , les résultats sont illustrés dans les figures suivantes :

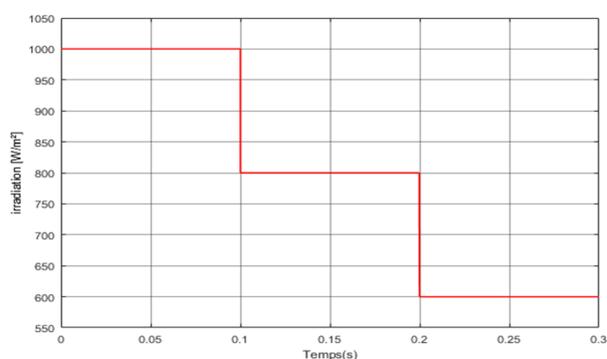


Figure III.11 : La variation de l'éclairement pour différents niveaux d'irradiation

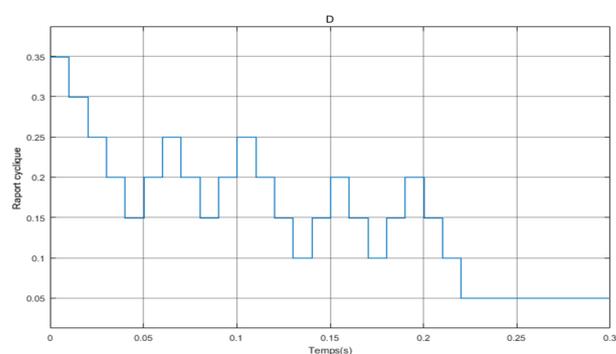


Figure III.12 : Le rapport cyclique pour plusieurs niveaux d'irradiation

La Figure III.13 montre que le convertisseur MPPT donne la puissance maximale dans chaque niveau de variation de l'éclairement, cela implique que l'algorithme P&O utilisé nous a donné des très bons résultats.

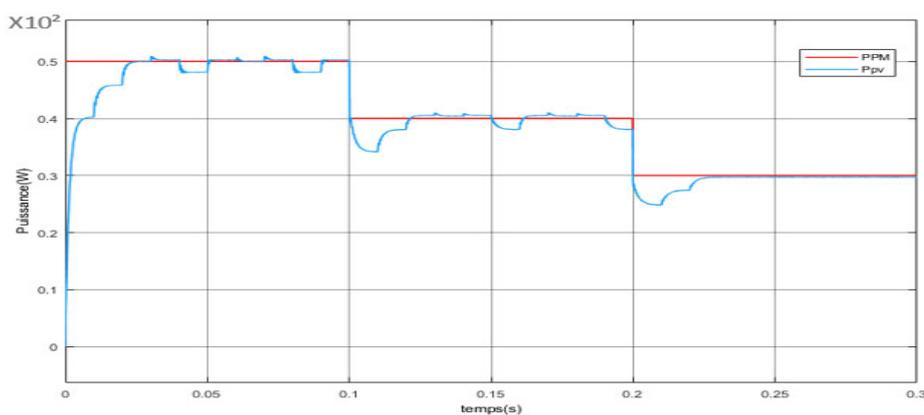


Figure III.13 : la puissance de Panneau délivré par le panneau PV aux différents niveaux d'irradiation.

## **Chapitre III : Les algorithmes de poursuite du MPP**

---

### **III.5 Conclusion**

Dans ce chapitre nous avons présenté le principe de la recherche du point de puissance maximale « MPPT » ainsi que les différentes méthodes (algorithmes) rencontrées le plus souvent dans la littérature, En suite on a réalisé la simulation de convertisseur BOOST, un panneau PV avec une commande MPPT pour l'évaluation de la tension et la puissance en sortie du convertisseur.

# Chapitre IV

# Chapitre IV : Régulation de la tension photovoltaïque

## IV.1 Introduction

Dans le chapitre I, Nous avons évoqué la stabilisation et la régulation de tension pour protéger l'équipement électrique sensible, Et dans ce chapitre nous allons étudier la stabilisation de notre système avec le régulateur PID.

## IV.2 Le rôle du régulateur de tension

Parmi les rôles principaux de la régulation de tensions on a [34] :

- Régulé la tension de sortie par rapport à sa tension de consigne
- Stabiliser le système
- Diminuer la sensibilité aux perturbations
- Augmenter les performances (par exemple la précision statique)
- Répondre aux exigences temporelles et fréquentielle
- Augmenter la bande passante de la réponse fréquentielle
- Obtenir une bonne robustesse.

En pratique il existe plusieurs types de régulateurs. Dans le cadre de ce travail on n'a focalisé notre étude sur le régulateur PID. Dans ce qui suit, nous allons donner des informations sur le PID.

### IV.2.1 La commande PID

La commande PID est dite aussi (correcteur, régulateur, contrôleur), se compose de trois terme P, I et D d'où le 'p' correspond au terme proportionnel, 'I' pour terme intégral et 'D' pour terme dérivé de la commande.

Les régulateur PID sont probablement les plus largement utilisés dans le contrôle industriel. Même les pulls complexe système de contrôle est industriel put un réseau de contrôle dont le principal élément de contrôle est un module de contrôle PID [33].

Le régulateur PID est une simple implémentation de retour d'information (feedback). Il a la capacité d'éliminer la compensation de l'état d'équilibre grâce à l'action intégral, et il peut anticiper le futur grâce à une action dérivée.

## Chapitre IV : Régulation de la tension photovoltaïque

La figure ci-dessous illustre la boucle de commande globale qui regroupe l'algorithme MPPT et le régulateur qui sera synthétisé dans ce chapitre. L'algorithme fournit la tension de référence  $V_{ref}$  qui représente une poursuite du MPP. Le régulateur se contente d'assurer la poursuite de la tension  $V_{ref}$  en respectant les conditions d'un cahier de charge [10].

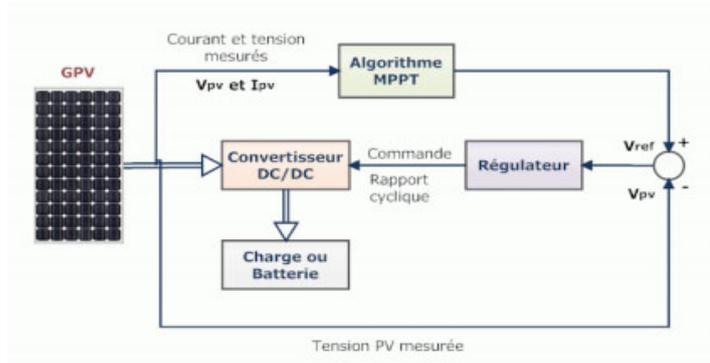


Figure IV.1 : Boucle de commande globale [10].

### IV.2.2 Bref historique de la régulateur PID

Les régulateurs de type (Proportionnel : P, Intégral : I et Dérivé : D) ou PID se révèlent suffisants pour résoudre un grand nombre de problèmes de contrôle et ce particulièrement lorsque la dynamique du système est bénigne et que les exigences en termes de performances sont modestes. Les régulateurs PID répondent à plus de 95% des besoins industriels. Malgré l'expérience acquise au fil des ans, les valeurs choisies, pour les paramètres P, I et D, ne sont pas toujours satisfaisantes, ni adaptées au processus à régler.

L'histoire des régulateurs est déjà longue et il peut être intéressant de rappeler quelques étapes importantes. Les premiers régulateurs de type centrifuge apparaissent vers 1750 pour régler la vitesse des moulins à vent, suivi en 1788 du fameux contrôleur de vitesse d'une machine à vapeur de James Watt. En 1942, Ziegler et Nichols ont proposé deux démarches permettant de trouver facilement les paramètres optimums pour une installation donnée. Au fil des ans, les propositions de Ziegler et Nichols ont été adaptées ou modifiées selon les besoins. En 1963, Horowitz a ajouté un degré de liberté supplémentaire au régulateur PID afin de mieux contrôler.

Les dépassements obtenus lors d'une réponse indicielle. Ce nouveau degré de liberté consiste, en particulier, à ne réinjecter vers le terme proportionnel qu'une partie du signal de sortie.

## Chapitre IV : Régulation de la tension photovoltaïque

Au début des années 1990 et dans le but de fournir des règles d'ajustement simples mais plus performantes que celles de Ziegler-Nichols, Åström et ses collaborateurs ont analysé le comportement dynamique d'un grand nombre de processus. Cette analyse a conduit à l'établissement de tableaux servant aux calculs des paramètres P, I et D à partir de mesures simples.

Dans ce qui suit, on présente des notions générales sur les régulateurs PID classiques. Actuellement les études se focalisent de plus en plus sur des techniques de l'amélioration des spécifications de la commande [35].

### IV.2.3 Schéma fonctionnelle d'une boucle de régulation

Une boucle de régulation doit comporter au minimum les éléments suivants :

- ✚ un capteur de mesure.
- ✚ un transmetteur souvent intégré au capteur.
- ✚ un régulateur.
- ✚ un actionneur.

Elle est souvent complétée par :

- ✚ un enregistreur.
- ✚ des convertisseurs.
- ✚ des sécurités.

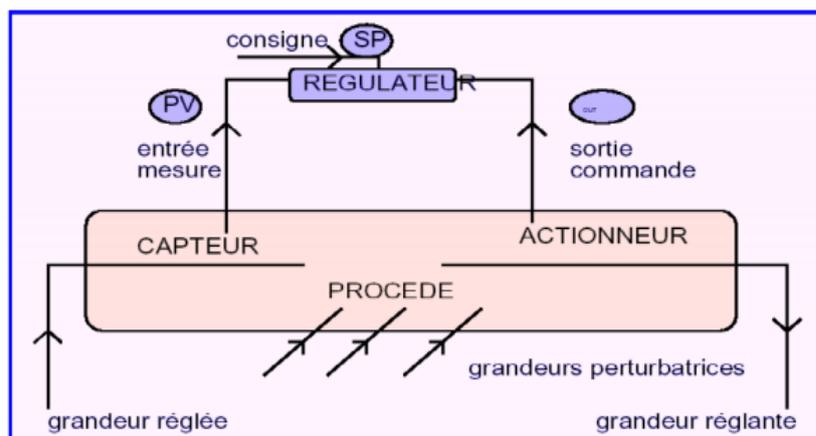


Figure IV.2 : Schéma d'une boucle de régulation [35].

## Chapitre IV : Régulation de la tension photovoltaïque

Le régulateur reçoit deux informations :

- Le signal de mesure (M ou PV) provenant du capteur.
- La consigne (S ou SP) qui peut être locale ou externe.

En fonction de l'écart entre ces deux valeurs et de l'algorithme de calcul pour lequel il a été configuré, il délivre un signal de sortie (S ou OUT) dirigé vers l'actionneur afin d'annuler cet écart et de ramener la mesure vers la valeur de consigne [35].

### IV.2.3.1 Action de régler

La plupart des systèmes comportent une réaction naturelle qui s'oppose à l'action et conduit à un nouvel état d'équilibre. Cet état n'est que rarement satisfaisant.

On est donc amené à concevoir des ensembles, dans lesquels la grandeur désirée s'aligne rigoureusement sur une grandeur de consigne. On y parvient en appliquant une retro action [36].

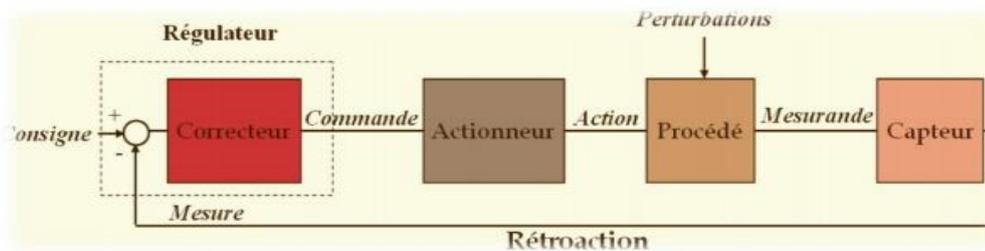


Figure IV.3 : Schéma général d'un système de régulation [35].

## IV.3 Description des régulateurs PID

Un régulateur PID remplit essentiellement trois fonctions :

1. Fournir un signal de commande  $u(t)$  en tenant compte de l'évolution du signal de sortie  $y(t)$  par rapport à la consigne  $y^*(t)$ .
2. Éliminer l'erreur statique grâce au terme intégrateur.
3. Anticiper les variations de la sortie grâce au terme dérivateur.

Le régulateur PID classique relie directement le signal de commande  $u(t)$  au signal d'écart  $e(t)$ . Sa description temporelle est la suivante :

$$u(t) = \left( K(p)e(t) + K_i \int e(t) + K_d \frac{d}{dt} e(t) \right) \quad (IV.1)$$

## Chapitre IV : Régulation de la tension photovoltaïque

L'écart se définit par :

$$e(t) = y^*(t) - y(t) \quad (IV.2)$$

Où  $y^*(t)$  est la consigne et  $y(t)$  est la sortie mesurée par le capteur. En prenant la transformée de Laplace de l'équation, on obtient la fonction de transfert du correcteur

$$C(p) = Kp + Ki \frac{1}{p} + KdP \quad (IV.3)$$

Cette combinaison des termes P, I et D est aussi désignée sous le nom de forme parallèle ou non inter active. Le schéma fonctionnel d'un processus réglé à l'aide d'un tel régulateur est donné à la figure III.4.

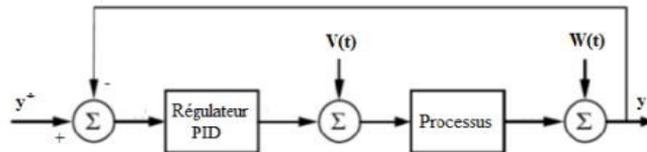


Figure IV.4 : Schéma fonctionnel d'un processus réglé par un PID classique [38].

La figure IV.4 illustre le principe général d'un processus réglé par PID où on y trouve les perturbations  $V(t)$  et  $W(t)$ . Ces bruits sont généralement issus des capteurs et des actionneurs du système. Pour atteindre les performances souhaitées d'un régulateur on tend à apporter les modifications suivantes : On réduit l'effet de la consigne sur le terme proportionnel pour minimiser les dépassements en conservant un faible temps de réglage. L'écart est alors défini par :

$$e_p(t) = K_p(y^*(t) - y(t)) \quad (IV.4)$$

Suivant le dépassement souhaité, le paramètre  $K_p$  de pondération est choisi entre 0 et 1. Afin d'éviter de fortes amplitudes du signal de commande lors de brusques variations de la consigne, on diminue ou on annule l'effet de la consigne sur le terme dérivé :

$$e_d(t) = K_d(y^*(t) - y(t)) \quad (IV.5)$$

La description temporelle du régulateur PID modifié est alors la suivante : Tenant compte des définitions des trois écarts, le signal de commande  $u(t)$  s'écrit :

$$u(t) = \left( k_p y^*(t) + K_i \int y^*(t) + K_d \frac{d}{dt} y^*(t) \right) - \left( K_p y + K_i \int y + K_d \frac{d}{dt} y \right) \quad (IV.6)$$

## Chapitre IV : Régulation de la tension photovoltaïque

---

Dont la transformée de La place vaut :

$$u(p) = \left(Kp + Ki \frac{1}{p} + Kdp\right) Y * (p) - \left(Kp + Ki \frac{1}{p} + Kdp\right) Y(p) \quad (\text{IV.7})$$

D'un point de vue pratique, deux autres modifications sont fréquemment apportées au régulateur PID. Afin de diminuer l'influence du bruit haut fréquences, on limite le gain du dérivateur en remplaçant le terme  $K_d$  par la fonction de transfert suivante, avec  $\tau$  très petit :

$$G(p) = K_d \frac{p}{1+\tau p} \quad (\text{IV.8})$$

En présence du terme intégral et dans le cas où l'écart tarde à s'annuler, la composante intégrale peut croître sans cesse et entraîner la saturation du convertisseur ou de l'actuateur commandant le processus. Puis lors du changement de signe de l'écart, il faudra attendre que la composante intégrale décroisse suffisamment pour ne plus saturer les éléments qui se trouvent en aval. Pour éviter ce temps perdu, on introduit une limitation sur la valeur maximum que peut atteindre le terme intégral. On notera qu'avec cette modification, le régulateur ne peut plus être considéré comme linéaire.

### IV.4 Contrôle par PID

Le contrôle par PID (pour proportionnel, intégral et dérivé) est une méthode de régulation souvent employée pour les asservissements. Un asservissement est un système, capable d'atteindre et de maintenir une consigne grâce aux mesures qu'il effectue. Imaginez-vous, par exemple, dans une voiture sur l'autoroute. Vous souhaitez rouler à 130Km/h sans avoir à appuyer sur l'accélérateur. La commande de vitesse de croisière de votre voiture devra par elle-même maintenir cette vitesse. À l'approche d'une pente le système s'aperçoit que pour une même puissance au niveau du moteur, il n'atteint plus la consigne des 130Km/h et rajoutera un petit coup de « boost » Oui mais de combien ? Et combien de temps faudra-t-il au système pour se stabiliser autour de la consigne ?

C'est tout le problème de l'asservissement et le contrôle par PID est un moyen de le résoudre ! Il existe beaucoup d'autres exemples d'asservissements qui utilisent d'autres variables pour leur système comme la vitesse, l'angle, la position, la tension... Mais peu importe, l'idée sous-jacente reste la même.

## Chapitre IV : Régulation de la tension photovoltaïque

Le PID est le régulateur le plus utilisé dans l'industrie. L'idée de cet organe de contrôle est de modifier intentionnellement la valeur de l'erreur qui subsiste entre la consigne et la mesure effectuée. Par exemple du cas d'un asservissement en position l'erreur serait [37] :

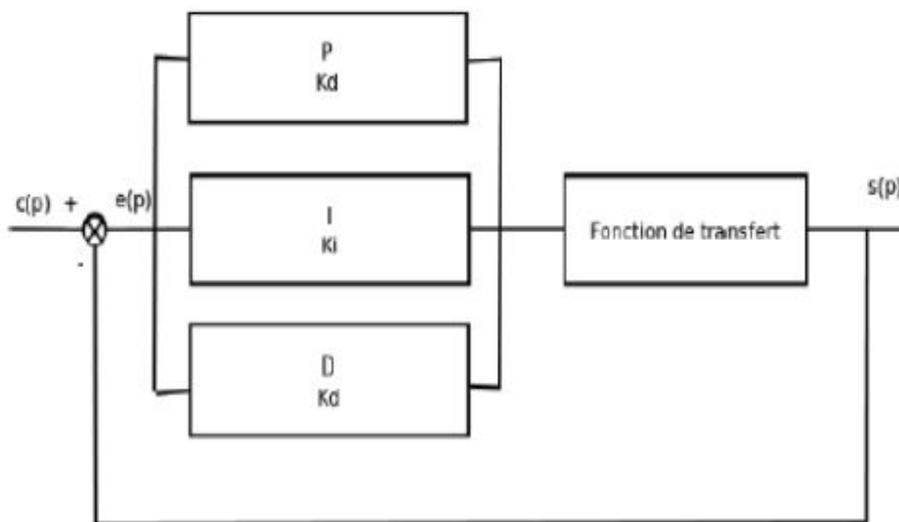


Figure IV.5 : Asservissement avec régulateur PID [37].

### IV.4.1 « P », Proportionnel

Dans le cas d'un contrôle proportionnel, l'erreur est virtuellement amplifiée d'un certain gain constant qu'il conviendra de déterminer en fonction du système [35].

$$\text{Consigne}(t) = K_p \varepsilon(t) \quad (\text{IV.9})$$

Ce qui en Laplace donne :

$$\text{Consigne}(p) = K_p \varepsilon(p) \quad (\text{IV.10})$$

L'idée étant d'augmenter l'effet de l'erreur sur le système afin que celui-ci réagisse plus rapidement aux changements de consignes. Plus la valeur de  $K_p$  est grande, plus la réponse ne l'est aussi.

En revanche, la stabilité du système s'en trouve détériorée et dans le cas d'un  $K_p$  démesuré le système peut même diverger [37].

Si l'on prend l'exemple d'une voiture qui dérive, la régulation proportionnelle consiste à contre braquer rapidement pour rétablir la voiture.

## Chapitre IV : Régulation de la tension photovoltaïque

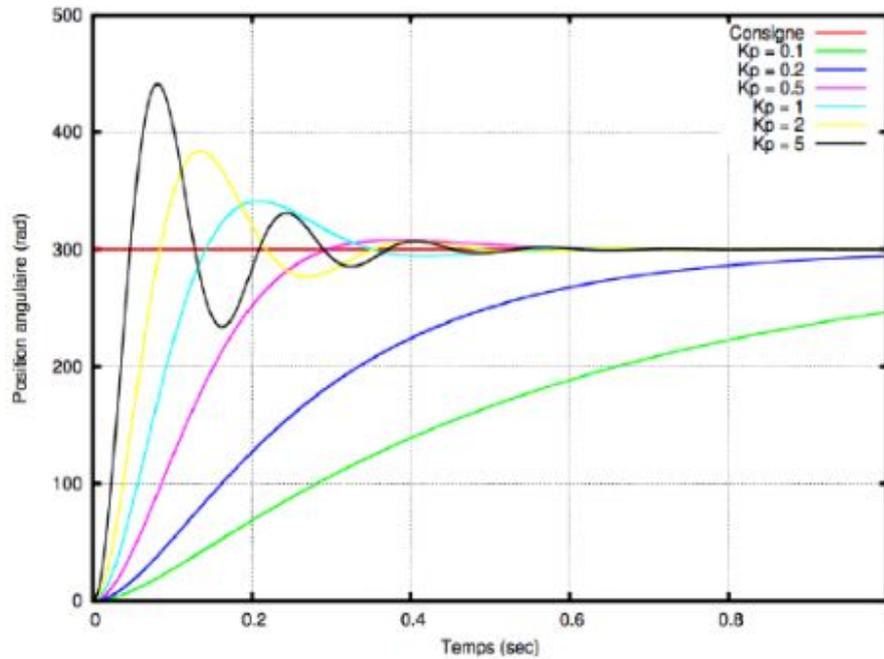


Figure IV.6 : Modélisation sous Maple de la réponse à un échelon dans un asservissement en position [36].

### IV.4.2 « I », Intégré

Au contrôle proportionnel, nous pouvons ajouter l'intégration de l'erreur. Dans ce cas nous obtenons une régulation PI (proportionnelle et intégrée).

L'erreur entre la consigne et la mesure est ici intégrée par rapport au temps et multipliée par une constante qu'il faudra aussi déterminer en fonction du système.

$$\text{Consigne}(t) = K_p \varepsilon(t) + K_i \int_0^t \varepsilon(\tau) d\tau \quad (\text{IV.11})$$

Ce qui en La place donne :

$$\text{Consigne}(p) = K_p \varepsilon(p) + K_i \frac{\varepsilon(p)}{p} \quad (\text{IV.12})$$

Lors d'un simple contrôle proportionnel, il subsiste une erreur statique. Lorsque le système s'approche de sa consigne, l'erreur n'est plus assez grande pour faire avancer le moteur. Le terme intégral permet ainsi de compenser l'erreur statique et fournit, par conséquent, un système plus stable en régime permanent. Plus  $K_i$  est élevé, plus l'erreur statique est corrigée.

## Chapitre IV : Régulation de la tension photovoltaïque

Pour reprendre l'exemple de la voiture qui dérive, le terme intégral consiste à rajouter un petit coup de contre braquage afin de se rétablir correctement [37].

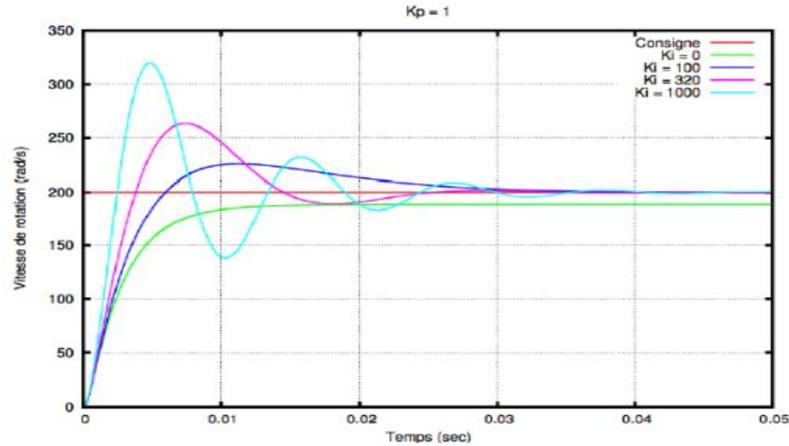


Figure IV.7 : Modélisation sous Maple de la réponse à un échelon [36].

### IV.4.3 « D », Dérivé

Pour obtenir un contrôle en PID, il nous faut encore ajouter un terme. Celui-ci consiste à dériver l'erreur entre la consigne et la mesure par rapport au temps et à le multiplier lui aussi par une constante.

$$\text{Consigne}(t) = K_p \varepsilon(t) + K_i \int_0^t \varepsilon(\tau) d\tau + K_d \frac{d}{dt} \varepsilon(t) \quad (\text{IV.12})$$

Ce qui en Laplace donne :

$$\text{Consigne}(p) = K_p \varepsilon(p) + K_i \frac{\varepsilon(p)}{p} + K_d p \varepsilon(p) = \varepsilon(p) \left[ K_p + K_i \frac{1}{p} + K_d p \right] \quad (\text{IV.13})$$

Le contrôle PI peut amener à un dépassement de la consigne, ce qui n'est pas toujours très souhaitable (exemple d'inversion de polarité dans le cas de moteurs électriques). Le terme dérivé permet de limiter cela. Lorsque le système s'approche de la consigne, ce terme

Freine le système en appliquant une action dans le sens opposé et permet ainsi une stabilisation plus rapide. Toujours avec l'exemple de la voiture, le terme dérivé représente le petit contre braquage dans le sens opposé de l'ajustement pour stabiliser la voiture lorsqu'elle s'approche du point qu'elle voulait ré joindre [37].

## Chapitre IV : Régulation de la tension photovoltaïque

---

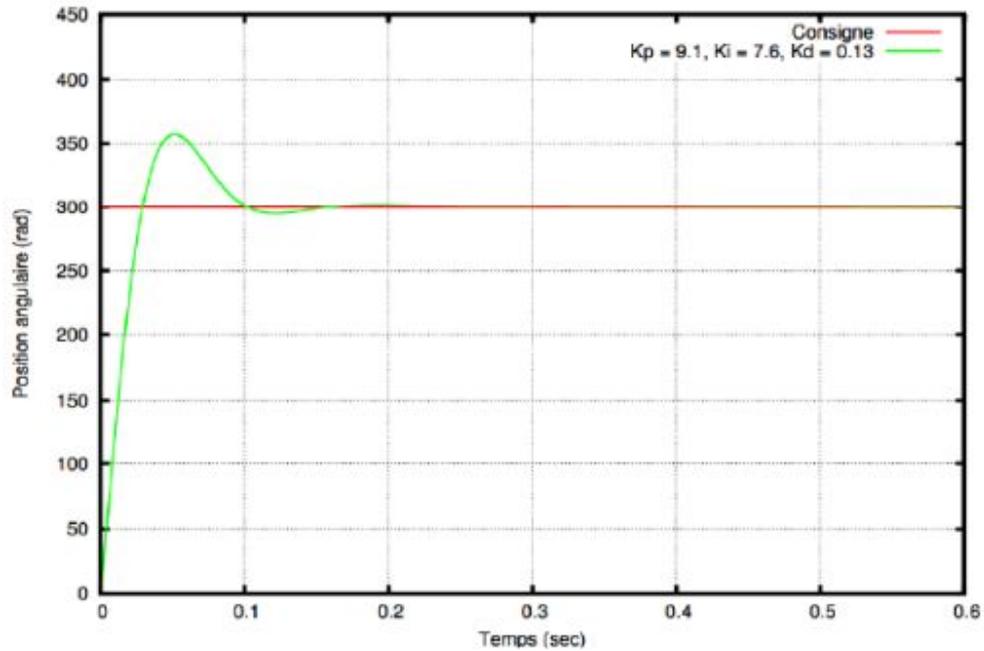


Figure IV.8 : Modélisation sous Maple de la réponse à un échelon [37].

### IV.5 Les algorithmes de PID

#### IV.5.1 L'Algorithme P

Le rôle de l'action proportionnelle est de minimiser l'écart  $\varepsilon$  entre la consigne et la mesure, et elle réduit le temps de monter et le temps de réponse.

On constate qu'une augmentation du gain  $K_p$  du régulateur entraîne une diminution de l'erreur statique et permet d'accélérer le comportement global de la boucle fermée.

$$P(t) = K_p \varepsilon(t) \quad (\text{IV.14})$$

On serait tenté de prendre des valeurs du gain élevées pour accélérer la réponse du procédé mais on est limité par la stabilité de la boucle fermée.

En effet, une valeur trop élevée du gain, augmente l'instabilité du système et donne lieu à des oscillations. En cas d'un régulateur P.

## Chapitre IV : Régulation de la tension photovoltaïque

---

### IV.5.2 L'Algorithme PI

Le correcteur intégral est en général associé au correcteur proportionnel, il élabore alors une commande qui peut être donnée par la relation suivante :

La fonction de transfert du correcteur est alors donnée par :

$$u(t) = K_p \left( \varepsilon(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t \varepsilon(t) d\tau \right) \rightarrow C(p) = K_p \frac{1+T_i p}{T_i p} \quad (\text{IV.15})$$

Pour un régulateur intégral pur, le régime dynamique est relativement long. D'un autre côté le régulateur proportionnel réagit immédiatement aux écarts de réglage mais il n'est pas en mesure de supprimer totalement l'erreur statique. La combinaison des actions proportionnelle et intégrale permet d'associer l'avantage du régulateur P, c'est-à-dire la réaction rapide à un écart de réglage, à l'avantage du régulateur I qui est la compensation exacte de la grandeur pilote. La transposition de correcteur continu consiste à discrétiser un correcteur continu afin de l'utiliser dans une commande numérique.

### IV.5.3 L'Algorithme PID

Le régulateur standard le plus utilisé dans l'industrie, est le régulateur PID (proportionnel intégral dérivé), car il permet de régler à l'aide de ses trois paramètres, les performances (amortissement, temps de réponse, ...) d'un processus modélisé par un deuxième ordre [37].

Nombreux sont les systèmes physiques qui, même en étant complexes, ont un comportement voisin de celui d'un deuxième ordre. Par conséquent, Le régulateur PID est bien adapté à la plupart des processus de type industriel, et il est relativement robuste par rapport aux variations des paramètres du procédé, quand on n'est pas trop exigeant sur les performances de la boucle fermée par rapport à celles de la boucle ouverte (par exemple, accélération très importante de la réponse ou augmentation très importante de l'amortissement en boucle fermée).

En pratique, à une catégorie donnée de systèmes à asservir correspond un type de correcteur adopté. Pour effectuer un choix judicieux, il faut connaître les effets des différentes actions : proportionnelle, intégrale et dérivée [37].



Figure IV.9 : Schéma synoptique d'un régulateur PID [36].

## Chapitre IV : Régulation de la tension photovoltaïque

---

L'action conjuguée PID permet une régulation optimale en associant les avantages de chaque action : la composante P réagit à l'apparition d'un écart de réglage, la composante D s'oppose aux variations de la grandeur réglée et stabilise la boucle de régulation ; et la composante I élimine l'erreur statique. Et c'est pour cela que ce type de correcteur est le plus utilisé en milieu industriel.

Un régulateur PID est obtenu par l'association de ces trois actions et il remplit essentiellement les trois fonctions suivantes :

- Il fournit un signal de commande en tenant compte de l'évolution du signal de sortie par rapport à la consigne.
- Il élimine l'erreur statique grâce au terme intégrateur
- Il anticipe les variations de la sortie grâce au terme dérivateur

La commande  $U(t)$  est donnée par le régulateur PID, dans sa forme Classique, elle est décrite par :

$$u(t) = K_p \left[ \varepsilon(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t \varepsilon(\tau) d\tau + T_d \frac{d\varepsilon(t)}{dt} \right] \quad (\text{IV.16})$$

Dans un régulateur PID, il existe plusieurs façons d'associer les paramètres P, I et D, en effet, le correcteur PID peut avoir une structure série, parallèle ou mixte.

### IV.6 Les différentes structures d'un PID

Au niveau du codage et de la mise en œuvre de ce type de régulateur, une question nous a récemment été posée par un client : faut-il utiliser la forme PID série ou la forme PID parallèle ? En effet, lors de nos premiers cours d'automatique, le professeur nous apprend qu'il existe deux formes de PID, mais il ne nous précise pas dans quel contexte il faut préférer l'une des formes à l'autre [38].

#### IV.6.1 PID série ou parallèle

Ces deux formes sont décrites par les équations ci-dessous :

$$C_{\text{série}}(s) = k \left( 1 + \frac{1}{sT_i} \right) (1 + sT_d) \quad (\text{IV.17})$$

## Chapitre IV : Régulation de la tension photovoltaïque

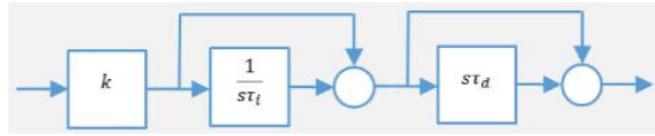


Figure IV.10 : PID en série [32].

$$C_{\text{parallèle}}(s) = k_p + k_i/s + k_d s \quad (\text{IV.18})$$

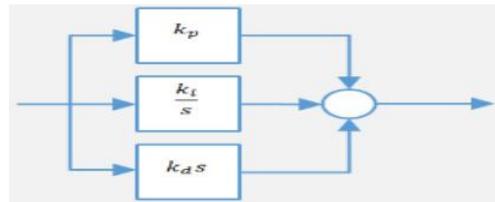


Figure IV.11 : PID en parallèle [32].

Ce qui est important de remarquer, c'est que ces deux formes sont mathématiquement équivalentes. Ainsi un régulateur sous forme série pourra être mis sous forme parallèle à partir des équations de transformation suivante [38] :

$$k_p = k(1 + \tau_d/\tau_i) \quad (\text{IV.19})$$

$$k_i = k/\tau_i \quad (\text{IV.20})$$

$$k_d = k\tau_d \quad (\text{IV.21})$$

### IV.6.2 Une 3<sup>ème</sup> forme de PID :

Une 3<sup>ème</sup> forme de PID existe ! Celle-ci est appelée "standard", "mixte" ou parfois "idéal". Elle est définie par l'équation ci-dessous :

$$C_{\text{standard}}(s) = k_p \left( 1 + 1/sT_i + sT_d \right) \quad (\text{IV.22})$$

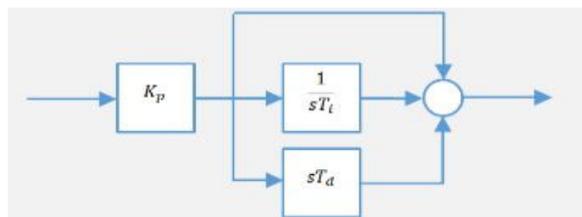


Figure IV.12 : PID standard [38].

## Chapitre IV : Régulation de la tension photovoltaïque

---

Cette forme standard se rapproche beaucoup de la forme parallèle et les équations de transformation entre les deux sont évidentes. La transformation de la forme série en forme standard s'obtient par les équations suivantes :

$$k_p = k(1 + \tau_d/\tau_i) \quad (\text{IV.23})$$

$$T_i = \tau_i + \tau_d \quad (\text{IV.24})$$

$$T_d = \tau_d \tau_i / (\tau_d + \tau_i) \quad (\text{IV.25})$$

Il existe donc trois formes différentes des mises en œuvre des régulateurs PID et ces trois formes sont presque mathématiquement équivalentes. Dans la plupart des cas (à l'exception par exemple de  $k_i = 0$ ), il existe des formules pour transformer un régulateur d'une forme vers une autre forme [38].

### IV.6.3 La principale différence

La principale différence entre ces différentes formes concerne l'effet des coefficients de réglage sur le comportement du régulateur. Ainsi la forme parallèle permet de découpler complètement les actions proportionnelle, intégrale et dérivée entre elles. Alors que dans la forme standard, une modification sur la valeur du coefficient  $K_p$  va modifier simultanément les actions proportionnelles, intégrales et dérivée. Ce titre certaines personnes, qui règlent des PID de manière manuelle, préfèrent la forme parallèle.

La forme série se trouve parfois dans certains automates de régulation du marché. Il existe une 2<sup>ème</sup> formulation de la forme série :

$$C_{\text{série}} = \frac{(1+\tau_1s)(1+\tau_2s)}{\tau_i(1+\tau_1s)} \quad (\text{IV.26})$$

Cette formulation permet de facilement mettre en relation les constantes de temps du procédé avec les paramètres de réglage du régulateur et notamment les deux zéros réels du numérateur.

## Chapitre IV : Régulation de la tension photovoltaïque

Dans l'industrie, les formes standard et parallèle sont les plus courantes. Ainsi dans le logiciel Simulink, le bloc « PID Controller » propose les formes standard (« Idéal ») et parallèle (« Parallèle »).

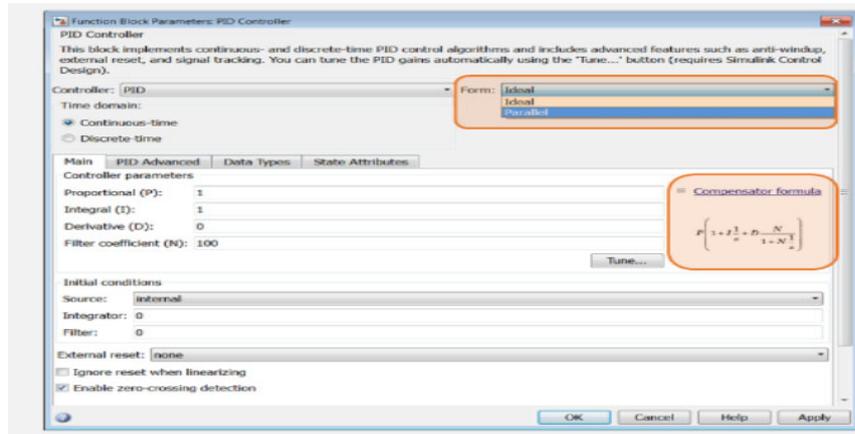


Figure IV.13 : block paramètres PID contrôle [38].

Un autre point important à remarquer est que les formes série et standard ne permettent pas l'annulation de l'action intégrale et donc la transformation d'un régulateur de type PID en régulateur de type PD.

En conclusion, il est difficile de préconiser une forme particulière pour la mise en œuvre des régulateurs PID, chacune présentant des avantages et des inconvénients. La forme standard est la plus utilisée dans l'industrie. Il est important de savoir que toutes ces formes sont finalement très similaires et qu'il existe des formules pour passer d'une forme à l'autre. Les différences portent principalement sur l'effet des paramètres de réglage sur le comportement de la boucle de régulation ce qui s'avère fondamental dans le cadre de la mise au point manuelle.

### IV.7 Synthèse du régulateur

#### IV.7.1 Méthode fréquentielle

Cette méthode est envisagée lorsque le cahier des charges contient des spécifications relatives des considérations fréquentielles : bande passante, coefficient de qualité, marge de stabilité (marge de gain ou marge de phase) avec évènement des spécifications sur la précision et les caractéristiques de la réponse transitoire [40].

## Chapitre IV : Régulation de la tension photovoltaïque

Cette méthode fut parmi les méthodes les plus anciennes basées sur la connaissance des lieux de transfert qui peut être obtenu soit expérimentalement soit par la connaissance de la fonction de transfert.

Il n'existe pas de démarche systématique à suivre pour calculer les lieux de transfert : Bode Black ou Nyquist. En pratique les deux premières représentations sont plus commodes d'utilisation que la représentation dans le plan de Nyquist.

### IV.8 Analyses du Modèle

Le modèle mathématique utilisé est décrit dans le chapitre 2.

Les valeurs des paramètres du CS utilisées pour l'analyse sont celles calculées au chapitre II. ( $C1 = 220\mu F$ ,  $V_{bat} = 24V$ ,  $L = 140\mu H$ ,  $r_{pv} = -1.8$ ), La valeur du résistance dynamique  $r_{pv}$  est donné comme un cahier de charge avec les paramètres du panneau.

La figure ci-dessous représente la réponse fréquentielle du système :

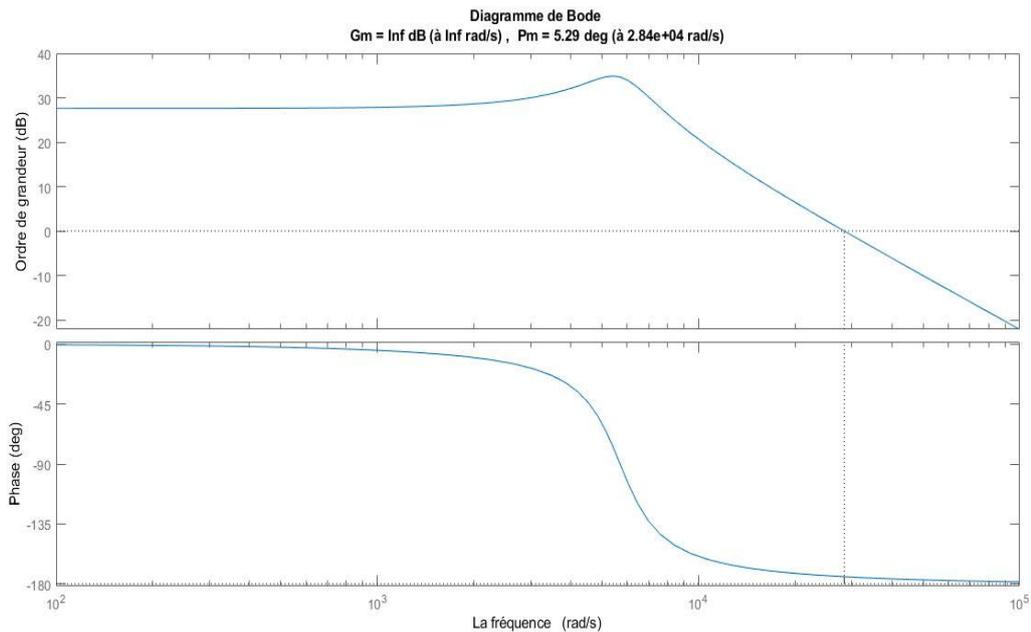


Figure IV.14 : diagramme de Bode

La marge de phase du système est de  $5^\circ$  ce qui est insuffisant, Le système en BO est stable car il n'y a pas de pôle instable.

## Chapitre IV : Régulation de la tension photovoltaïque

---

La figure ci-dessous montre la réponse du système en BO pour une différence de 5% du rapport cyclique.

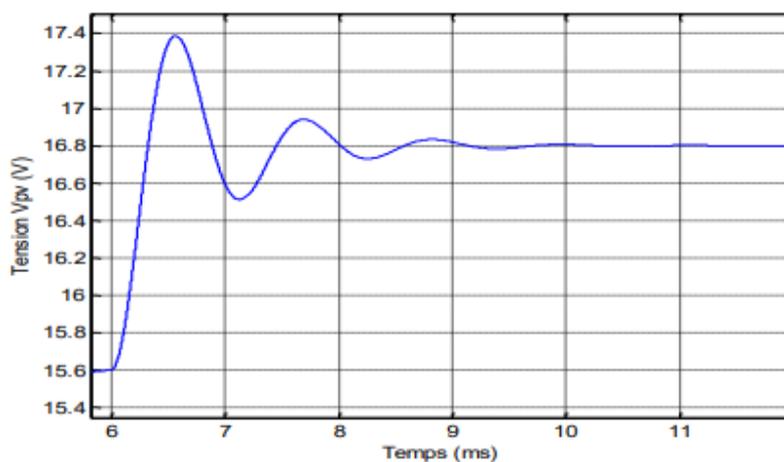


Figure IV.15 : Réponse indicielle du système.

Sur cette figure, on observe la réponse du système est peu amortie.

On analyse le comportement du système en le bouclant unitairement ; la figure suivante représente la réponse du système en BF non corrigée pour une variation de la tension d'entrée de 0,5 V.

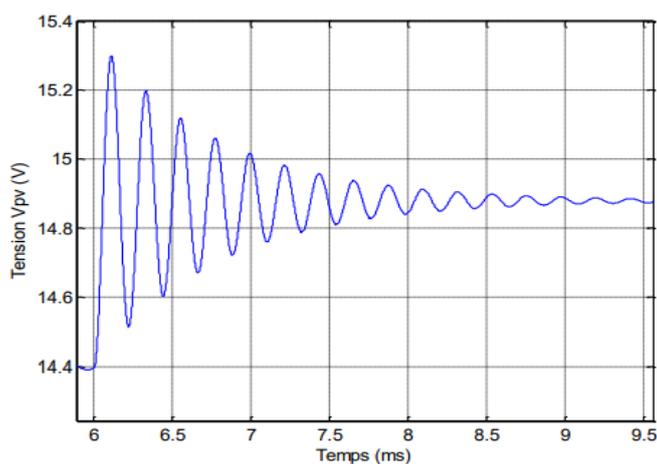


Figure IV.16 : Réponse du système en BF non corrigée.

## Chapitre IV : Régulation de la tension photovoltaïque

Sur cette figure on constate que la réponse du système est très faiblement amortie et que l'erreur statique n'est pas nulle.

La boucle de régulation de notre système est schématisée sur la figure ci-dessous :

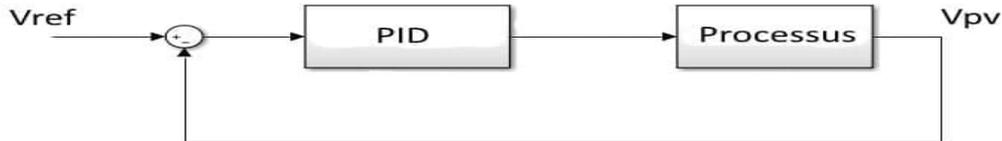


Figure IV.17 : La boucle fermée du système.

Avec :  $V_{ref} = VMPP$  est la tension de référence fournie par l'algorithme MPPT.

### IV.9 Synthèse du régulateur PID

L'expression de la fonction de transfert du régulateur PID peut avoir la forme :

$$R(S) = \frac{K_p}{T_i s} (1 + T_d s)(1 + T_i s) \quad (IV.27)$$

- $K_p$  est le gain de l'action proportionnelle.
- $T_i$  la constante de temps de l'action intégrale.
- $T_d$  celle de l'action dérivée.

$$\text{Tel que : } \frac{1}{T_i} \leq \frac{1}{T_d}$$

Pour assurer la causalité du système, on utilisera une approximation du dérivateur en remplaçant  $T_d s$  par :  $\frac{T_d s}{1 + T_f s}$  avec  $T_f s \ll T_d$

Le cahier des charges que nous nous sommes imposé se présente comme suit :

- Une erreur statique nulle.
- Un temps d'établissement inférieur à 3ms.
- Un dépassement inférieur à 20%.

L'action intégrale I du régulateur PID est suffisante pour annuler l'erreur statique. D'après le diagramme d'un système du 2<sup>nd</sup> ordre,  $D\% = (\xi)$  paramétré en marge de phase  $M\varphi$  (Annexe), l'imposition d'un dépassement inférieur à 20% exige une marge de phase supérieure à  $50^\circ$  et un amortissement supérieur à 0,45.

## Chapitre IV : Régulation de la tension photovoltaïque

L'expression de la pulsation propre d'un second ordre lorsque  $\xi < 1$  est donnée par :

$$\omega_0 = -\frac{1}{\xi t_{3.5\%}} \ln(0.05\sqrt{1-\xi^2})$$

$$\omega_0 = 2 \cdot 10^3 \text{ rad/s Pour } t_s = 3 \text{ ms.}$$

Pour avoir un temps d'établissement inférieur à 3ms on doit mettre une pulsation de coupure au-delà de cette valeur. Pour être assez loin de la résonance, on choisira une fréquence de coupure de  $2 \cdot 10^4 \text{ rad/s}$ .

Pour avoir un temps d'établissement inférieur à 3ms on doit mettre une pulsation de coupure au-delà de cette valeur. Pour être assez loin de la résonance, on choisira une fréquence de coupure de  $2 \cdot 10^4 \text{ rad/s}$ .

Finalement, la fonction de transfert du régulateur est donnée :

$$R(S) = \frac{1.834 \cdot 10^{-7} S^2 + 0.0002648 S + 0.263}{3.32 \cdot 10^{-8} S^2 + 0.01 S} \quad (\text{IV.28})$$

Le tracé de Bode de la boucle ouverte corrigée est donné sur la figure ci-dessous, la marge de phase est de  $54^\circ$  et la marge de gain est infinie.

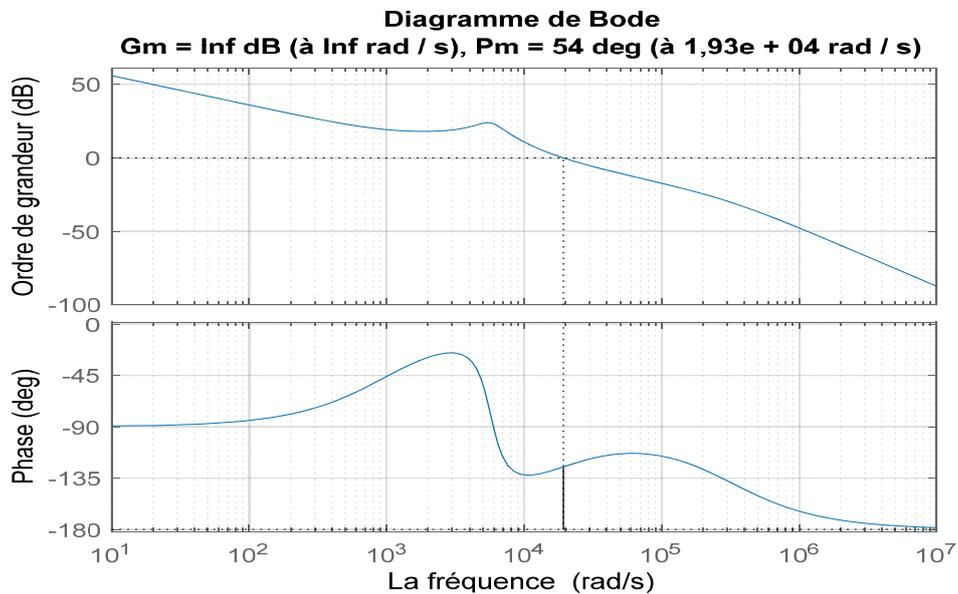


Figure IV.18 : Le tracé de Bode de la boucle ouverte corrigée

## Chapitre IV : Régulation de la tension photovoltaïque

La figure ci-dessous illustre que le cahier de charge donné (Le temps d'établissement est inférieur à 3 ms et le dépassement inférieur à 20%) a été complètement respecté pour une variation de 1V de l'entrée (de 16V à 17V). Notre objectif est atteint.

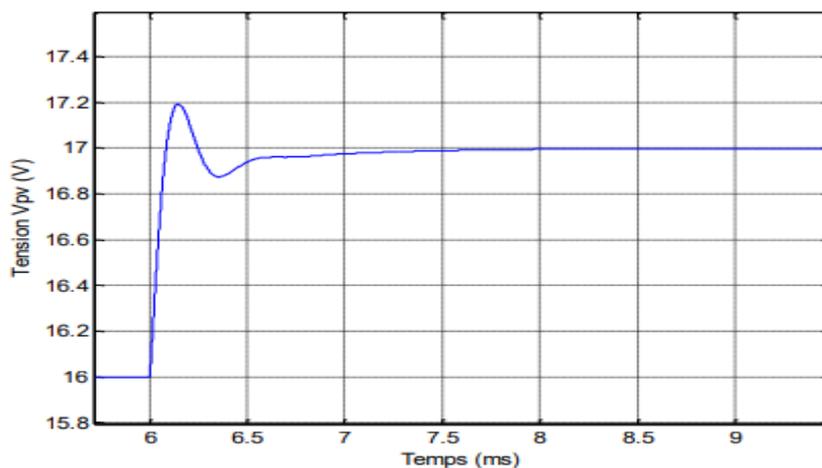


Figure IV.19 : Réponse du système corrigé pour une variation de 1V de l'entrée.

### IV.10 Le PID numérique

Les deux voies pour la synthèse de correcteur numérique illustré dans la figure ci-dessous

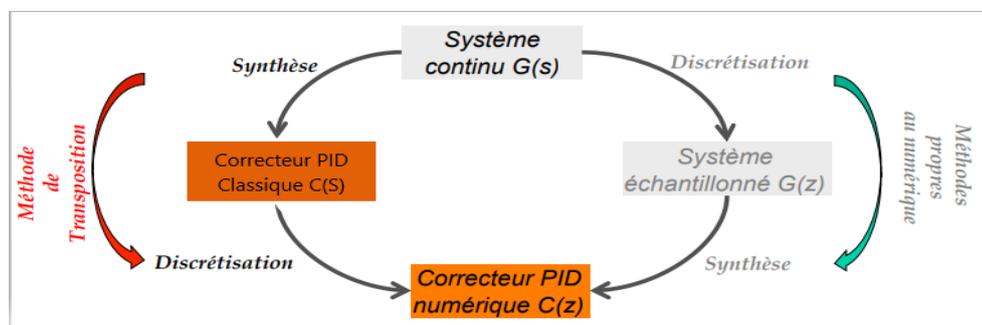


Figure IV.20 : Les deux voies pour la synthèse de correcteur numérique illustré.

La synthèse de correcteurs numériques par transposition de correcteurs continus est une approche couramment utilisée dans le domaine industriel pour deux raisons majeures :

- les méthodes de synthèse de correcteurs PID continus sont généralement bien maîtrisées
- les spécifications sont plus facilement interprétables avec des modèles continus qu'avec des modèles échantillonnés.

## Chapitre IV : Régulation de la tension photovoltaïque

---

La Transposition de la fonction de transfert du PID continu  $C(s)$  en un correcteur numérique  $C(z)$  pour avoir un algorithme de PID numérique qui s'approche le plus possible du comportement du contrôle numérique il est nécessaire de le discrétiser.

Les versions numériques du PID par les méthodes de transposition usuelles :

$$\text{Approximation avancée : } C(z) = k_p \left[ 1 + \frac{1}{T_i} \frac{T_e z}{z-1} + \frac{N(z-1)}{\left(1 + \frac{NT_e}{T_d}\right)z-1} \right]$$

$$S = \frac{z-1}{T_e} = \frac{1-z^{-1}}{T_e z^{-1}} \quad (\text{IV.28})$$

$$\text{Approximation retardée : } C(z) = k_p \left[ 1 + \frac{1}{T_i} \frac{T_e}{z-1} + \frac{N(z-1)}{z - \left(1 - \frac{NT_e}{T_d}\right)} \right]$$

$$S = \frac{z-1}{T_e z} = \frac{1-z^{-1}}{T_e} \quad (\text{IV.29})$$

$$\text{Approximation de Tustin : } C(z) = k_p \left[ 1 + \frac{T_e}{2T_i} \frac{z+1}{z-1} + \frac{N(z-1)}{\left(1 + \frac{NT_e}{2T_d}\right)z - \left(1 - \frac{NT_e}{2T_d}\right)} \right]$$

$$S = \frac{2}{T_e} \frac{z-1}{z+1} = \frac{2}{T_e} \frac{1-z^{-1}}{1+z^{-1}} \quad (\text{IV.30})$$

### IV.11 Discrétisation du régulateur

Pour pouvoir implanter le régulateur PID dans un microcontrôleur, Le choix de la fréquence d'échantillonnage est crucial. En effet, la fréquence choisie doit respecter le théorème de Shannon qui énonce que la fréquence d'échantillonnage d'un signal doit être égale ou supérieure au double de la fréquence maximale contenue dans ce signal. Si ce théorème n'est pas vérifié, des distorsions du spectre du signal échantillonné par repliement spectral seront provoquées, ce qui se traduit par une perte d'information du signal. En pratique, la fréquence d'échantillonnage  $f_s$  est choisie telle que :

$5 f_c < f < 10 f_c$  Avec :  $f_c$  fréquence de coupure du processus à commander. Pour notre système, nous avons choisi une fréquence d'échantillonnage égale à la fréquence de commutation du CS [10].

## Chapitre IV : Régulation de la tension photovoltaïque

Pour obtenir un régulateur discret, équivalent au régulateur continu synthétisé précédemment, on utilise la transformation bilinéaire de Tustin dont l'expression est :

$$s = \frac{2}{T_s} \frac{z-1}{z+1} \quad (\text{IV.31})$$

Où  $s$  est la variable complexe,  $z$  la variable discrète et  $T_s$  la période d'échantillonnage.

La fonction de transfert du régulateur PID discret (transformée en  $z$ ) pour une fréquence d'échantillonnage de 40 kHz est donnée par :

$$R(z) = \frac{4.089z^2 - 8.024z + 3.935}{z^2 - 1.453z - 0.453} \quad (\text{IV.32})$$

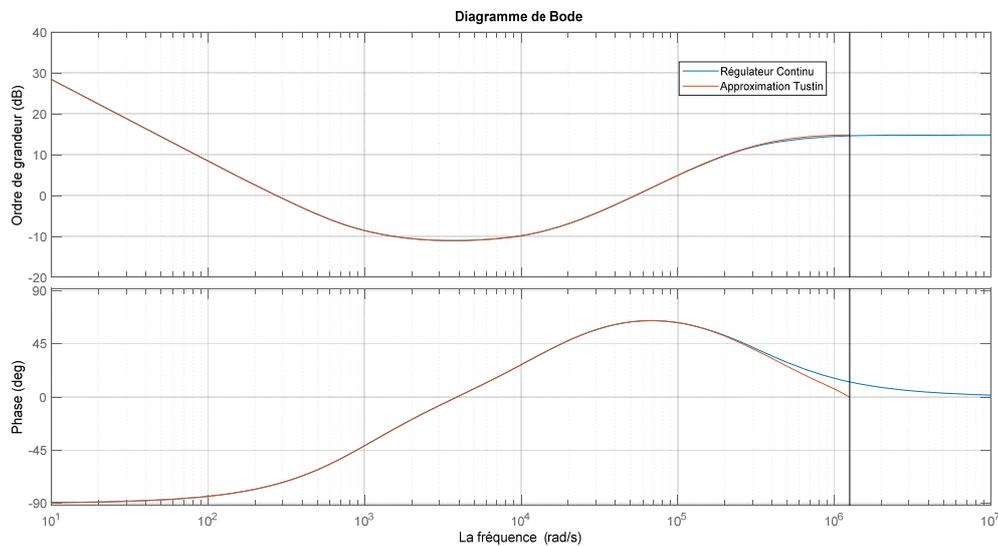


Figure IV.21 : Tracé de Bode de l'approximation discrète et du régulateur continu.

### IV.12 Conclusion

Ce chapitre a été consacré à : présenter le régulateur de tension PID, étudier deux approches pour la régulation de la tension photovoltaïque visant une robustesse et des performances meilleures. La première approche a été synthétisée dans le domaine fréquentiel et fait appel à un régulateur PID classique. La deuxième, de nature non linéaire a été synthétisée dans le domaine temporel, satisfaire un cahier des charges que nous nous sommes imposé. Les résultats de la simulation ont montré l'efficacité du régulateur synthétisé dans les deux domaines.

# **Conclusion Générale**

Les systèmes photovoltaïques sont en demande croissante à travers le monde grâce à leurs efficacité et avantages et ce notamment dans le domaine de la production et de la gestion de l'énergie électrique.

Le problème posé par l'utilisation des ressources fossiles a vu comme solution l'utilisation des énergies renouvelables qui permettent une production de l'électricité proprement tout en respectant les exigences sur la pollution. Cependant, grâce aux encouragements des décideurs pour la promotion de la technologie photovoltaïque plusieurs travaux de recherches se sont inscrits dans le domaine du développement et l'amélioration des procédés de production. Toutefois, le domaine d'applications demeure loin des attentes au vue des échéanciers fixés par les organisations internationales et demeure une des préoccupations majors de part le monde.

Le travail réalisé dans ce mémoire a été l'étude de la régulation de la tension d'un générateur photovoltaïque. Nous avons fait une étude générale sur l'énergie solaire et l'effet photovoltaïque afin d'expliquer le fonctionnement de la cellule et du générateur photovoltaïque.

Dans un premier temps nous avons étudié la modélisation du panneau photovoltaïque où on a procédé à la caractérisation du générateur photovoltaïque qui présente la caractéristique courant-tension et puissance-tension et l'influence de l'éclairement et de la température sur ces derniers afin de constituer la base pour tout ce qui suit.

Plus particulièrement, nous nous sommes intéressés tout d'abord aux notions fondamentales qui se rattachent aux convertisseurs DC/DC et la simulation de l'adaptation de convertisseur de type BOOST avec le panneau qui simplifie le fonctionnement du convertisseur.

L'étude de quelques algorithmes MPPT présent dans la littérature a aussi été faite (méthode de tension de circuit ouvert, méthode de courant de court-circuit, P&O, INC). Notre choix s'est porté sur l'algorithme de la méthode de perturbation et observation pour sa simplicité et sa facilité de mise en œuvre. L'application de cet algorithme impose l'utilisation d'une interface d'adaptation.

Afin de coïncider le point de fonctionnement du GPV avec la tension de référence imposée par l'algorithme choisi, nous avons fait appel à un régulateur de type PID. La synthèse de ce dernier a permis d'aboutir à un régulateur qui nous a permis de satisfaire un cahier des charges que nous nous sommes imposés. Les résultats des simulations faites sous MATLAB/Simulink ont montré l'amélioration apportée par le régulateur synthétisé.

## Référence bibliographique

- [1] Bourib, S., 2005. Conception et réalisation d'un système de contrôle à base de PIC16F876 pour accumulateurs au plomb (Doctoral dissertation, Alger, Ecole Nationale Polytechnique).
- [2] A. Sehlaoui, &quot ; Etude et réalisation d'un débitmètre électromagnétique, mémoire de magister, école nationale polytechnique, Alger, 2005.
- [3] HADJAB Moufdi. Développement des performances d'un système photovoltaïque, Mémoire de magister, Université Djilali Liabes Sidi Bel Abbes, 2011.
- [4] Ismail, K., 2014. Etude d'un système de poursuite solaire pour les panneaux photovoltaïques (Doctoral dissertation).
- [5] T.madani. Commande d'un Hacheur" BOOST" Alimenté par un Panneau Solaire à l'Aide d'une Carte Arduino.
- [6] OULED SALEM, M., Analyse, Modélisation et Simulation des Pertes dans un Module Photovoltaïque à Base de Silicium Monocristallin.
- [7] Bun, L., 2011. Détection et Localisation de Défauts pour un Système PV (Doctoral dissertation).
- [8] Maitourare Tahirou.A. Régulation de la tension d'un générateur photovoltaïque par un régulateur classique. Mémoire de master Université Djilali Bounaama khemis Miliana 2018-2019.
- [9] Xiao, W., 2003. A modified adaptive hill climbing maximum power point tracking (MPPT) control method for photovoltaic power systems (Doctoral dissertation, University of British Columbia)..
- [10] Boukli-Hacene, O., 2011. Conception et réalisation d'un générateur photovoltaïque muni d'un convertisseur MPPT pour une meilleure gestion énergétique.
- [11] ASSEM Houria « Le régulateur de charge et de contrôle dans un système Photovoltaïque Autonome » Attachée de Recherche Division Energie solaire Photovoltaïque, 2014.
- [12] Hamadou, Z., 2018. Optimisation des paramètres d'un FACTS shunt pour l'amélioration de la stabilité transitoire d'un système électrique (Doctoral dissertation).

- [13] Pastor, A.C., 2006. Conception et réalisation de modules photovoltaïques électroniques (Doctoral dissertation).
- [14] Houari, A., 2012. Contribution à l'étude de micro-réseaux autonomes alimentés par des sources photovoltaïques (Doctoral dissertation).
- [15] Labouret, A. et Villos, M., 2006. Energie solaire photovoltaïque (Vol. 4). Dunod.
- [16] Nassar, Y.F. et Salem, A.A., 2007. The reliability of the photovoltaic utilization in southern cities of Libya. Desalination, 209(1-3), pp.86-90.
- [17] Saoudi, K., 2018. Stabilisateurs intelligents des systèmes électro-énergétiques (Doctoral dissertation).
- [18] Tariq, T.O.U.A.M.A. et Nouh, H.A.F.I.D.I., 2019. Commande d'un MPPT avec un convertisseur DC/DC pour un système photovoltaïque (Doctoral dissertation, UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF-M'SILA) .
- [19] Petibon, S., 2009. Nouvelles architectures distribuées de gestion et conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques (Doctoral dissertation)..
- [20] soria.z .Etude et Simulation d'un Générateur Photovoltaïque Muni d'un Convertisseur MPPT pour une Meilleur Gestion Energétique , Thèse du Master Univeristé Mohamed Boudiaf -M'SILA, 2007.
- [21] Oi, A., 2005. Design and simulation of photovoltaïque water pumping système (Doctoral dissertation, Thèse de Magister de l'université California, USA)..
- [22] Bakelli, Y., 2005. Étude et dimensionnement d'un convertisseur statique pour la connexion d'un générateur photovoltaïque» mémoire de magister. Universite de Boumerdes.
- [23] BENDIAB.A et Atmaoui.N .Commande d'un Hacheur Boost a deux entrees » Mémoire de Master Unirrversité de Abderrahmane MIRA- BEJAIA .2017-2018.
- [24] Khemliche, M., Djeriou, S. and Latreche, S., 2012. Diagnostic de défauts dans le système photovoltaïque par les réseaux de neurones artificiels. Revue des Énergies Renouvelables SIENR'12 Ghardaïa, pp.331-343.

- [25] FATIHA, S., 2017. Implémentation d'un régulateur de type trois pour convertisseur DC-DC sur DSP (Doctoral dissertation, UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF-M'SILA).
- [26] Amara, K., 2015. Contribution à l'étude de conception d'une centrale photovoltaïque de puissance (1MW) interconnectée au réseau de distribution électrique moyenne tension (Doctoral dissertation, Université Mouloud Mammeri).
- [27] Khaled BE, Ayoub DE. Etude comparative des commandes MPPT pour une chaîne de conversion photovoltaïque (Doctoral dissertation, UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF-M'SILA).
- [28] Djallal Leila Imemne et Dib Yasmina, " Etude comparative de deux commandes MPPT appliquées à un Système Photovoltaïque, Mémoire de master, Université de Tlemcen, 2017.
- [29] HAKOUMI, A., BENAMAR, A. and GHITAOU, T., 2019. Commande MPPT et contrôle d'un système photovoltaïque 3KW par la logique floue (Doctoral dissertation, Université Ahmed Draïa-Adrar).
- [30] Fourquet, F., 2013. Richesse et puissance : une généalogie de la valeur (XVIe-XVIIIe siècles). La découverte.
- [31] CHOHRAOUI, H. and HADBI, R., 2016. « Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque connecté au réseau » (Doctoral dissertation).
- [32] Benadel Faiza « Etude Et Simulation D'une Commande MPPT Pour Système PV » thèse de master à L'UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA, 2015 – 2016
- [33] Aymen DE, Achref KE. Commande floue des machines électriques.
- [34] FATIHA, S., 2017. Implémentation d'un régulateur de type trois pour convertisseur DC-DC sur DSP (Doctoral dissertation, UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF-M'SILA).
- [35] Mudry, F., 2002. Ajustage des paramètres d'un régulateur PID. Ecole d'ingénieurs du Canton de Vaud-Département d'électricité et informatique.
- [36] Zohra, M.F., Mise en place d'un SIS en vue de la surveillance d'un circuit hydraulique.
- [37] Ross, D., Deguine, E. and Camus, M., 2010. Asservissement par PID. Phd, Université de Lille.

- [38] Badreddine, R.M., 2012. Gestion Énergétique optimisée pour un bâtiment intelligent multi-sources multi-charges: différents principes de validations (Doctoral dissertation).
- [39] Zorig, A. et BARKAT, S., 2011. Modélisation et commande d'un système de production d'énergie photovoltaïque couplé au réseau triphasé. *Mémoire de master, Université de Msila.*
- [40] Aymen, D.E.B.O.U.Z.E. et Achref, K.E.L.A.I.A.I.A., 2019. Commande floue des machines électriques.