

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

UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI DE TIZI-OUZOU



FACULTE DU GENIE ELECTRIQUE ET D'INFORMATIQUE
DEPARTEMENT D'ELECTROTECHNIQUE

Mémoire de Fin d'Etudes MASTER ACADEMIQUE

Domaine : **Sciences et Technologies**
Filière : **Electrotechnique**
Spécialité : **Electrotechnique industrielle**

Présenté par
ALIOUANE Massissilia
AMROUCHE Idir

Thème

Etude et simulation d'un émulateur photovoltaïque.

Mémoire soutenu publiquement le 11/07/ 2018 devant les membres de jury composé de :

M^{me} F. MEGHARBI

Professeur, U.M.M.T.O, Présidente

Mr S. HADDAD

Professeur, U.M.M.T.O, Examineur

M^{elle} D. HATEM

Maître de conférences classe A, U.M.M.T.O, Examinatrice

M^{elle} R. KACHENOURA

Maître de conférences classe B, U.M.M.T.O, Encadreur

Remerciements

Nous remercions en premier lieu Dieu le tout puissant pour nous avoir donné la force et la volonté d'accomplir ce travail.

On tient à remercier très vivement **Madame Rahma KACHENOURA** maître de conférence B à l'Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, pour la confiance qu'elle nous a accordé en nous proposant ce thème. Que toute notre gratitude lui soit exprimée pour avoir accepté de nous encadrer et encourager tout au long de ces travaux de mémoire ainsi que pour toute la documentation qu'elle a mis notre disposition. A sa grande expérience scientifique et à ses qualités humaines s'ajoute une capacité de prospection magique. Par sa disponibilité lors de mes différentes sollicitations et par ses conseils, elle nous a constamment guidé et formé. Nous lui serions toujours redevables.

Nous adressons nos plus vifs remerciements à **Madame Ferroudja BETAM ép.MEGHARBI** professeur à l'Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou pour l'honneur qu'elle nous fait en acceptant de présider le jury.

Nos remerciements vont également à tous les membres du jury pour l'honneur qu'ils nous font en acceptant de participer au jury, en l'occurrence :

Monsieur **Salah HADDAD** professeur à l'Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou.

Madame **Djidjiga HATEM** maître de conférences A à l'Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou.

On exprime notre profonde reconnaissance à nos parents pour leurs encouragements qui nous ont permis de finaliser ce travail.

On remercie tous ceux qui ont contribué, de près ou de loin, pour la réalisation de ce travail.

Dédicaces

Je dédie ce mémoire à :

Mes très chers parents qui m'ont toujours encouragé et soutenu

Surtout à ma mère la lumière de ma vie

Mes sœurs Dyhia et Thiziri

Mes frères Ghiles et Takfarinas

A toute ma famille

Mes amis(es)

Massissilia ALIOUANE

Je dédie ce mémoire à :

Mes très chers parents qui m'ont toujours encouragé et soutenu

Surtout à ma mère la lumière de ma vie

Mon frère Rabah

Ma sœur Fatima

Et surtout à ma grand-mère chérie (Zahra Hamache ep.Amrouche) qui nous a quitté y'a 15ans
en ce jour même (11/07/2003)

Aussi mon grand-père (Amrouche Rabah) décédé

A toute ma famille

Mes amis(es)

Idir AMROUCHE

Sommaire

Sommaire

| | |
|----------------------------|---|
| Introduction Générale..... | 1 |
|----------------------------|---|

Chapitre I : Etat de l'art des émulateurs photovoltaïques

| | |
|--|----|
| I.1 Introduction..... | 4 |
| I.2 Emulateurs photovoltaïques..... | 5 |
| I.2.1 Définition | 5 |
| I.2.2 Émulateurs PV: Concepts et réalisation :..... | 6 |
| I.3 Etat de l'art des émulateurs photovoltaïque..... | 7 |
| I.3.1 L'émulateur à base de lampes | 7 |
| I.3.2 Circuits d'émulateurs basés sur les amplificateurs opérationnels..... | 8 |
| A. Emulateur de source PV proposé par Baert..... | 8 |
| B. Emulateur de source PV proposé par Nagayoshi | 9 |
| C. Emulateur de source PV proposé par Easwarakhanthan | 11 |
| I.3.3 Circuits basés sur les régulateurs linéaires..... | 12 |
| A. Emulateur de source de PV proposé par Mukerjee et Dasgupta | 13 |
| B. Emulateur de source PV proposé par Lloyd..... | 14 |
| C. Émulateur de cellules PV avec une diode zener..... | 16 |
| D. Approximation de modèle de diode basée sur un émulateur de PV..... | 16 |
| E. Emulateur de source PV proposé par Haeberlin et Borgna | 17 |
| I.3.4 Circuits basés sur des convertisseurs d'électronique de puissance :..... | 19 |
| A. Emulateur de source PV proposé par Khouzam et Hoffma | 20 |
| B. Emulateur de source PV proposé par Sanchis (2003) | 21 |
| C. Emulateur PV propose par Koutroulis et autres (2007) | 23 |
| D. Emulateur avec des diodes zener :..... | 24 |
| I.3 Conclusion | 26 |

Chapitre II : Modélisation des cellules photovoltaïques

| | |
|---|----|
| II.1 Introduction | 27 |
| II.2 Rappels sur la cellule photovoltaïque..... | 27 |
| II.2.1 La cellule PV et sa structure | 27 |
| II.2.2 Définition | 28 |
| II.2.3 Caractéristique électrique..... | 29 |
| II.2.3.1 Propriétés..... | 29 |
| II.2.3.2 Caractéristique courant-tension et schéma équivalent | 30 |
| II.2.4 Paramètres d'un panneau photovoltaïque | 31 |
| II.2.4.1 Courant de court-circuit, I_{CC} | 32 |
| II.2.4.2 Tension à circuit ouvert, V_{CO} | 32 |
| II.2.4.3 Point de fonctionnement optimum P_{max} (V_{max} , I_{max}) | 33 |
| II.2.4.4 Facteur de forme FF | 33 |
| II.2.4.5 Le rendement | 34 |
| II.2.5 Association des cellules photovoltaïques..... | 34 |
| II.2.5.1 Association en série..... | 34 |
| II.2.5.2 Association en parallèle..... | 35 |
| II.3 Modélisation de la cellule photovoltaïque..... | 36 |
| II.3.1 Modèles électriques de la cellule PV | 36 |
| II.3.2 Modèles mathématique de la cellule PV | 36 |
| II.3.3 Etudes du modèle à une seule diode (5 paramètres L5P) | 39 |
| II.4 Simulation du modèle choisi(L5P)..... | 40 |
| II.4.1 Résultat de Simulation | 42 |
| II. 4.1.1 Influence de l'éclairement et la température sur les courbes $I=f(V)$ et $P=f(V)$ | 42 |
| II.5 Générateur photovoltaïque..... | 45 |
| II.6 Conclusion : | 46 |

Chapitre III : Etude et simulation du hacheur Buck/Boost

| | |
|---|----|
| III.1 Introduction : | 47 |
| III.2 Convertisseur statique : | 47 |
| III.3 Hacheur non réversibles à liaison indirecte : | 48 |
| III.3.1 Généralités : | 48 |
| III.3.2 Hacheur à stockage inductif : | 48 |
| III.3.2 .1 Principe de fonctionnement : | 49 |
| III.3.3 Modélisation d'un convertisseur DC/DC (Hacheur buck-Boost) : | 50 |
| III.3.3.1 Structure : | 50 |
| III.3.4 Ondulation du courant i_L et de la tension U_C (Choix de L et de C) : | 54 |
| III.3.4.1 Ondulation du courant i_L et choix de L : | 54 |
| III.3.4.2 Ondulation de la tension u_C et Choix de C : | 54 |
| III.3.5 Frontière entre le mode continu et intermittent : | 55 |
| III.3.6 Conduction discontinu : | 56 |
| III.3.6.1 Caractéristiques statiques avec tension de sortie : | 57 |
| III.3 .7 Application d'une commande en boucle ouverte : | 60 |
| III.3 .8 Régulation du Buck-Boost à l'aide d'un correcteur PI : | 65 |
| III.3.8.1 Introduction : | 65 |
| III.3.8.2 La Commande avec régulateur PI : | 65 |
| III.3.8.3 Caractéristiques des régulateurs : | 71 |
| III.3.8.4 Le schéma de simulation du Buck-Boost avec le régulateur PI : | 72 |
| III.3.8.5 Les résultats : | 73 |
| III.4 Influence des paramètres du hacheur : | 76 |
| III.5 Conclusion : | 78 |

Sommaire

Chapitre IV : Simulation de l'émulateur

| | |
|--|----|
| IV.1 Introduction..... | 79 |
| IV.2 Schéma globale de l'émulateur photovoltaïque..... | 79 |
| IV.3 Principe de fonctionnement de l'émulateur PV..... | 81 |
| IV.4 Principe de fonctionnement du contrôleur choisi..... | 82 |
| IV.5 Procédure à suivre pour réaliser l'émulateurs PV :..... | 83 |
| IV.6 Conclusion..... | 88 |

CONCLUSION GENERALE

| | |
|--------------------------|----|
| CONCLUSION GENERALE..... | 89 |
|--------------------------|----|

Table des Figures

| | |
|---|----|
| Figure (I. 1) : Illustration de la portée d'un émulateur de source PV | 6 |
| Figure (I. 2) : émulateur de source PV | 8 |
| Figure (I. 3) : Schéma de l'émulateur de source PV proposé par Baert | 9 |
| Figure (I. 4) : Emulateur de source de PV proposé par Nagayoshi | 10 |
| Figure (I. 5) : Principe de l'émulateur de source de PV proposé par Easwarakhanthan | 12 |
| Figure (I. 6) : Emulateur de source PV proposé par Mukerjee et Dasgupta | 13 |
| Figure (I. 7) : Emulateur de source PV proposé par Lloyd | 15 |
| Figure (I. 8) : Modèle de cellule PV proposé. | 16 |
| Figure (I. 9) : structure d'un émulateur PV conçu à l'aide | 17 |
| Figure (I. 10) : Schéma descriptif d'émulateur de source PV | 18 |
| Figure (I. 11) : Principe d'un emulateur basé sur l'électronique de puissance | 19 |
| Figure (I. 12) : Détails du bloc d'alimentation d'énergie | 20 |
| Figure (I. 13) : Description globale de l'émulateur de | 21 |
| Figure (I. 14) : Circuit de puissance de l'émulateur de source PV proposé par Sanchis | 22 |
| Figure (I. 15) : Arrangement de circuit de PVAE proposé près Koutroulis et autres | 23 |
| Figure (I. 16) : Modèle de cellule PV proposé | 25 |
| Figure (I. 17) : circuit conçu pour émuler deux cellules PV | 25 |
| | |
| Figure (II. 1) : Cellule photovoltaïque | 28 |
| Figure (II. 2) : Caractéristique (I, V) d'une cellule photovoltaïque | 29 |
| Figure (II. 3) : Caractéristique et schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque réelle | 30 |
| Figure (II. 4): Caractéristique courant-tension et paramètres | 32 |
| Figure (II. 5) : Caractéristique résultante d'un groupement | 34 |
| Figure (II. 6) : Caractéristique résultante d'un groupement | 35 |
| Figure (II. 7) : Modèles électriques de la cellule PV | 36 |
| Figure (II. 8) : Schéma équivalent simple d'une cellule photovoltaïque | 37 |
| Figure (II. 9) : Caractéristique (I, V) d'une cellule PV sous différents éclairagements E_i | 38 |
| Figure (II. 10) : Schéma équivalent d'un modèle à une diode (L5p) de la cellule | 39 |
| Figure (II. 11) : Schéma de générateur PV en MATLAB-SIMULINK | 40 |
| Figure (II. 12) : Caractéristique I(V) et P(V) d'une cellule photovoltaïque, L5P | 42 |
| Figure (II. 13) : L'influence de l'éclairément sur les caractéristiques | 43 |
| Figure (II. 14) : L'influence de la température sur les caractéristiques | 45 |
| | |
| Figure (III. 1) : Représentation schématique d'une alimentation à stockage inductif | 49 |
| Figure (III. 2) : Combinaison des alimentations | 49 |
| Figure (III. 3) : Structure d'un hacheur à accumulation inductive | 50 |
| Figure (III. 4) : Forme d'onde aux bornes des différents éléments du hacheur | 52 |
| Figure (III. 5) : Ondulation de la tension de sortie | 55 |
| Figure (III. 6) : Conduction discontinue | 56 |
| Figure (III. 7) : Courant moyen dans l'inductance et dans la charge correspondant | 58 |
| Figure (III. 8) : Caractéristiques statiques à tension d'entrée constante $U_C=C_{te}$ | 59 |

| | |
|--|----|
| Figure (III. 9) : Schéma synoptique du Buck-Boost avec une commande en boucle ouverte | 60 |
| Figure (III. 10) : Schéma bloc du convertisseur Buck-Boost..... | 61 |
| Figure (III. 11) : Résultat de simulation de la tension V_s | 62 |
| Figure (III. 12) : Résultat de simulation du courant I_s | 63 |
| Figure (III. 13) : Tension de charge en fonction du rapport cyclique α | 64 |
| Figure (III. 14) : Schéma de commande utilisant la structure PI | 65 |
| Figure (III. 15) : Le circuit équivalent pour le mode 1 | 67 |
| Figure (III. 16) : Le circuit équivalent pour le mode 2..... | 68 |
| Figure (III. 17): Le diagramme du système en boucle fermée du convertisseur buck-boost..... | 68 |
| Figure (III. 18) : Simulation du diagramme du convertisseur Buck-Boost | 71 |
| Figure (III. 19) : Schéma de simulation du Hacheur Buck-Boost avec le régulateur PI..... | 72 |
| Figure (III. 20) : Tension de charge | 73 |
| Figure (III. 21) : Courant de charge | 74 |
| Figure (III. 22) : Courant et tension de source | 75 |
| Figure (III. 23) : Influence de la résistance interne d'inductance sur la tension de charge..... | 77 |
| | |
| Figure (IV. 1) : représentation d'un émulateur PV basé sur un convertisseur. | 80 |
| Figure (IV. 2) : Principe de fonctionnement de l'émulateur PV..... | 81 |
| Figure (IV. 3) : Schéma de simulation de l'émulateur PV | 84 |
| Figure (IV. 4) : Principe de fonctionnement de l'émulateur de tableau PV | 85 |
| Figure (IV. 5) : résistance équivalente en fonction de la tension de charge..... | 86 |
| Figure (IV. 6) : Courant de charge en fonction du temps pour différentes valeurs de R_{ch} | 87 |
| Figure (IV. 7) : Tension de charge en fonction du temps pour différentes valeurs de R_{ch} | 87 |

Introduction générale

Introduction Générale

La consommation mondiale d'électricité observée durant ces dernières décennies est fortement liée au développement de l'industrie, du transport et des moyens de communications. De nos jours, une grande partie de la production électrique est produite à partir de ressources non renouvelables comme le charbon, le gaz naturel, le pétrole et l'uranium. Leur vitesse de régénération est extrêmement lente à l'échelle humaine. Ce qui entrainera à plus ou moins courte échéance un risque non nul d'épuisement de ces ressources. D'autant plus que la demande ne cesse de croître et tant dès à présent à être supérieure à l'offre, se traduisant par exemple par une forte fluctuation du prix mondial du pétrole. D'autre part, ce type de consommation énergétique n'est pas neutre sur l'impact environnemental. Pour les hydrocarbures et le charbon par exemple, d'importantes émissions de gaz à effet de serre sont générées quotidiennement jouant un rôle prépondérant au niveau du dérèglement climatique et de l'augmentation de la pollution. Ce constat pousse à rechercher de plus en plus de solutions innovantes palliant le déficit énergétique et limitant l'impact négatif sur l'environnement. Ainsi, le développement des sources non-polluantes à base d'énergie renouvelable est de plus en plus sollicité à la fois par les producteurs d'énergie et les pouvoirs publics. Par opposition, une énergie dite renouvelable doit se régénérer naturellement et indéfiniment à l'échelle temporelle de notre civilisation. Seule l'énergie issue du soleil répond actuellement à ces critères à la fois d'abondance à la surface terrestre et de régénération infinie à notre échelle. Elle peut ainsi être utilisée directement sous forme thermique et depuis la découverte de l'effet photovoltaïque, convertie en énergie électrique. Cette dernière, bien qu'elle soit connue depuis de nombreuses années, comme source pouvant produire de l'énergie allant de quelques milliwatts au mégawatt, reste à un stade anecdotique et ne se développe pas encore dans de grandes proportions, notamment à cause du coût trop élevé des capteurs mis en œuvre. D'autre part, de nombreux problèmes techniques, tels que des pannes intempestives, ont pu être relevés sur les premiers systèmes électroniques liés notamment au transfert et à la conversion de cette énergie vers la charge, montrant ainsi le manque d'optimisation du traitement de cette énergie ayant des comportements aléatoires. Aujourd'hui, la

Introduction générale

plupart des systèmes de conversion de nature onduleur souffrent souvent de faibles rendements en site réel de production qui en font encore des systèmes trop chers présentant en plus des déficiences importantes en termes de fiabilité. De plus, leurs durées de vie entre trois et cinq ans est loin d'être satisfaisantes pour répondre aux critères d'exigence de source de production d'énergie fiable et à grande échelle en comparaison avec la durée de vie des capteurs photovoltaïques commerciaux garantie pour une période supérieure à 25 ans. Ces différents constats ont motivé différents travaux de recherches pour rendre viables des sources photovoltaïques. Dans ces domaines, de nombreux progrès effectués sur les matériaux et les cellules au cours de ces dernières années sont à noter, notamment en termes de réduction de coût. Pour pallier les nombreuses réticences des futurs acquéreurs et répondre aux exigences des nouvelles normes européennes sur les performances escomptées sur les systèmes de conversion associés, il est important de faire un effort également en termes de recherche pour résoudre les nombreux problèmes techniques liés à l'électronique de traitement et amener ce domaine à un degré de maturité suffisant pour en faire des produits industriels à part entière. [1] [2]

Dans ce travail nous allons nous intéresser au principe d'émulation. C'est à dire, réalisation d'un environnement expérimental au laboratoire, nous permettant de reproduire des comportements réels en site de certains dispositifs. Pour notre part, le dispositif en question est une installation photovoltaïque, l'intérêt de posséder des émulateurs est primordial, car cela nous permet une réalisation d'un dispositif industriel efficace et optimal. Ceci s'inscrit évidemment dans le cadre du développement durable et une économie d'énergie certaine.

Ainsi nous avons débuter notre travail avec une introduction générale, puis dans le premier chapitre, nous avons parler de l'état de l'art des émulateurs photovoltaïques ainsi que les différents circuits d'émulateurs qui existent .

Le second chapitre est consacré à la modélisation et à la simulation des cellules photovoltaïques dans une première partie

Dans le troisième chapitre, nous avons étudié et simulé en boucle ouverte le hacheur qui servira d'émulateur, le convertisseur choisi sera de nature indirecte, c'est le hacheur à accumulation inductive. L'intérêt réside dans sa caractéristique de sortie. En effet ce

Introduction générale

convertisseur tout en fonctionnant que dans le deuxième quadrant a un double comportement il est en même temps élévateur et abaisseur.

Enfin le quatrième et dernier chapitre est consacré à la simulation de l'ensemble des éléments constituant l'émulateur, à savoir le modèle des cellules, le hacheur à accumulation inductive et une boucle de régulation.

Nous avons fini notre travail par une conclusion générale .

Chapitre I

Etat de l'art des émulateurs photovoltaïques

I.1 Introduction

L'industrie photovoltaïque (PV) est en croissance exponentielle et la disponibilité d'équipement spécialisé pour les tests de laboratoire devient cruciale, surtout pour les fabricants et laboratoires travaillant dans le domaine de l'électronique de puissance relatif aux installations photovoltaïques. Toutes les personnes concernées par les applications des sources renouvelables ont besoin d'équipement de laboratoire pour effectuer des mesures et des essais. En particulier, dans le domaine des générateurs photovoltaïques, les difficultés sont liées à l'utilisation de charges fortement non linéaires. De nos jours pour des raisons d'économie d'énergie, toutes les charges y compris celles qu'on utilise au quotidien sont munies de convertisseurs statiques très gourmands dans la plus part des cas en énergie réactive. Dans le cas où la source est une installation photovoltaïque, cela va nécessiter une surface extérieure large par conséquent des coûts élevés. De plus, l'énergie produite dépend fortement de conditions météorologiques incontrôlables. Afin d'optimiser le coût d'une installation, des essais seront nécessaires. Par conséquent, une solution alternative à des tests en conditions réelles serait avantageuse.

L'alternative est la configuration d'un émulateur PV, c'est-à-dire, un équipement de laboratoire approprié dans lequel la tension et le courant sont les mêmes que dans une source réelle. L'expérimental d'une telle installation permet de réaliser des mesures et des essais sans les contraintes de conditions environnementales et, surtout, à moindre coût, depuis l'utilisation d'un système PV. Considérant que la tendance de l'industrie photovoltaïque évolue vers une exploitation plus optimale, la mise en place d'émulateurs photovoltaïques efficaces et fiables devient de plus en plus une nécessité. L'émulation d'un générateur PV est réalisée par deux tâches principales ; la première est la connaissance des caractéristiques électriques du générateur. En effet, une introduction détaillée à la modélisation des générateurs PV et leur émulation s'impose au moyen de convertisseurs de l'électronique de puissance. Pour se faire, on va se concentrer sur la définition de modèles de source PV précis, y compris les techniques d'extraction des paramètres. Viens ensuite en deuxième lieu la conception d'un système pour reproduire le comportement d'une source PV en utilisant la caractéristique courant - tension, obtenues par la modélisation, comme une référence pour contrôler convenablement la commutation du convertisseur DC / DC. L'objectif principal est de concevoir et mettre en place un émulateur PV

basé sur des convertisseurs de puissance contrôlés, à partir d'une modélisation de la source PV. [1]

Il est intéressant de considérer que le concept d'émulation globale, en référence aux sources PV, est général; par conséquent, il peut être facilement étendu à d'autres sources électriques, telles que des piles à combustible, des batteries ou des éoliennes ou encore moteur à aimant permanent dans lequel la tension de sortie continue est obtenue par un redresseur.

Ainsi ces émulateurs font appel à des montages à base de convertisseur statique, donc à l'électronique de puissance.

I.2 Emulateurs photovoltaïques

D'une façon générale, les simulateurs solaires qui sont à base de lampes ayant un spectre spécifique, présentent quelques problèmes avec la réalisation d'une distribution uniforme de l'irradiation. Pour toutes ces raisons, et quand des puissances plus élevées sont impliquées, la solution la plus appropriée est l'utilisation d'autres genres de dispositifs souvent dit « émulateur », cela sera référée, ci-après, en tant que des émulateurs de source PV. [1]

I.2.1 Définition

Un émulateur, en général, est prévu comme un système qui reproduit les fonctions d'un équipement à l'aide d'un matériel différent. Un tel système utilise des outils de simulation différents sur ordinateur, de forme qui concerne les modèles abstraits de l'équipement à simuler.

La possibilité pour installer un émulateur d'un générateur PV, de telles sortes que la tension et le courant se comportent comme dans la vraie source, est très avantageux. L'émulateur de source PV devrait montrer les mêmes caractéristiques électriques (puissance, tension, courant) d'une source photovoltaïque, y compris leur dépendance à l'égard des conditions atmosphériques, ombre partielle, et dynamique, permettant à l'utilisateur de contrôler une installation réelle d'une façon virtuelle. Un dispositif expérimental permettrait d'effectuer des mesures et des essais, sans contraintes des conditions environnementales et, surtout, meilleur marché, car l'utilisation d'une rangée réelle de panneau PV est ainsi évitée. Par exemple, le choix sur l'éventail qu'offre le marché, ou la conception optimale du convertisseur de puissance connectant le générateur PV au récepteur, quelque soit sa nature, sera faite tout en considérant les problèmes liés à la

commande du convertisseur et à la nature des charges. Exemple dans la référence [6], Prateek Garg et all ont utilisé un émulateur photovoltaïque pour tester un compensateur statique d'énergie réactive.[3]

La figure (I-1) synthétise, d'une manière perceptuelle, l'idée fondamentale et la portée d'un émulateur de source PV.

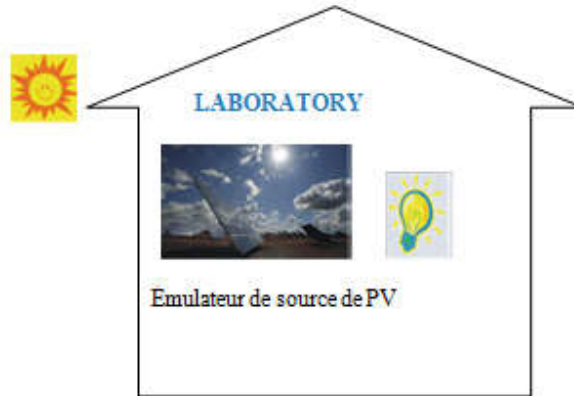


Figure (I. 1) : Illustration de la portée d'un émulateur de source PV [13]

La figure (I.1) représente la portée d'un émulateur ; qui consiste à reproduire des conditions réelles dans un laboratoire .

I.2.2 Émulateurs PV: Concepts et réalisation :

L'émulation d'un générateur PV est constitué de deux parties principales: la première s'occupe de la connaissance des caractéristiques (I,V) du générateur, la deuxième consiste en leur reproduction par les amplificateurs de puissance appropriés, qui définit la puissance maximum produite.

En général, les caractéristiques (I, V) d'une rangée de panneaux PV peuvent être déduites par un modèle de cellules PV, autrement une base de données peut être installée en mesurant des courbes de (I, V) dans différentes conditions environnementales. En ce qui concerne la première tâche, une discussion étendue sur la modélisation de source PV et identification de paramètres sera donnée dans le prochain chapitre.

Quant à la deuxième tâche, une large variété de réalisations est présentée dans la littérature technique pour des émulateurs PV. Parmi les idées fondamentales suggérées dans le passé pour l'installation d'un émulateur de source PV, nous pouvons citer:

- 1- La modification d'une source de tension de sorte que sa résistance interne soit variable selon une loi exponentielle avec le courant;
- 2- L'amplification du courant et de la tension d'une cellule;
- 3- La définition d'un circuit équivalent du générateur PV constitué d'une source de courant constante équivalente et un réseau de résistances et de diodes.

Toutes ces méthodes montrent une flexibilité limitée dans l'impact de l'influence de l'irradiation solaire, de la température, et d'autres paramètres du générateur PV. D'ailleurs, certaines de ces méthodes sont peu judicieuses pour l'émulation des sources PV dans la gamme dépassant le kW. Par exemple, la méthode des trois points exige l'utilisation d'un nombre inacceptable de diodes et des sources de courant de puissance élevée. Pour toutes ces raisons, la recherche dans le domaine des émulateurs PV a été orientée vers l'utilisation des sources d'énergie actives convenables qui conduit aux caractéristiques d'élasticité près de la réalité.

Conceptuellement, les émulateurs modernes de source PV sont des convertisseurs d'électroniques de puissance dont le rendement en tension et en courant sont commandés afin de reproduire le comportement des générateurs PV. C'est à dire l'impédance apparente aux bornes du convertisseur sera variable, est contrôlée de telle sorte à suivre l'impédance réelle de l'ensemble des panneaux constituant l'installation PV. [3]

I.3 Etat de l'art des émulateurs photovoltaïque

I.3.1 L'émulateur à base de lampes

Le problème lié à l'utilisation de tels systèmes est dû à l'alimentation électrique appropriée, et à l'approximation de l'effet de chaleur du soleil ainsi que la distribution non uniforme de l'irradiation. Ainsi, pour obtenir l'irradiante de 1000 W/m^2 sur un panneau PV de 50 W, une énergie électrique d'environ 10 kW est nécessaire; tandis que pour une rangée PV de 2 kW, l'énergie électrique exigée est égale environ 400 kW. L'utilisation des lampes à décharges de Roman laisse obtenir une meilleure efficacité, mais le spectre produit diffère de celui produit par la lumière du soleil. Récemment les chercheurs ont proposé l'utilisation des simulateurs solaires tels que les diodes électro luminescentes (LED), pour imiter le spectre et l'intensité de la lumière du soleil normale; c'est une solution tout à fait bon marché et efficace sur un marché dominé par des dispositifs de puissance très chère. [3]

I.3.2 Circuits d'émulateurs basés sur les amplificateurs opérationnels

Une première classification approximative des émulateurs PV, sur la base de leur structure matériel, peut être faite considérant l'amplificateur de puissance utilisé pour réaliser son opération. Dans les notices techniques des émulateurs à base d'amplificateurs opérationnels, des régulateurs séries et des convertisseurs de commutation, sont proposés. Nous allons présenter quelques exemples typiques. [3]



Figure (I. 2) : émulateur de source PV [3]

A. Emulateur de source PV proposé par Baert

Une des contributions les plus anciennes sur des émulateurs de source PV a été proposée par Baert (1979), il est constitué d'un circuit ayant l'effet d'augmenter pratiquement la surface d'une petite cellule solaire de référence. Ce circuit a été prévu pour des études sur les onduleurs et les systèmes de stockage d'énergie dans des batteries.

Le circuit est basé sur les amplificateurs opérationnels de puissance, comme montré dans la figure (I-3).

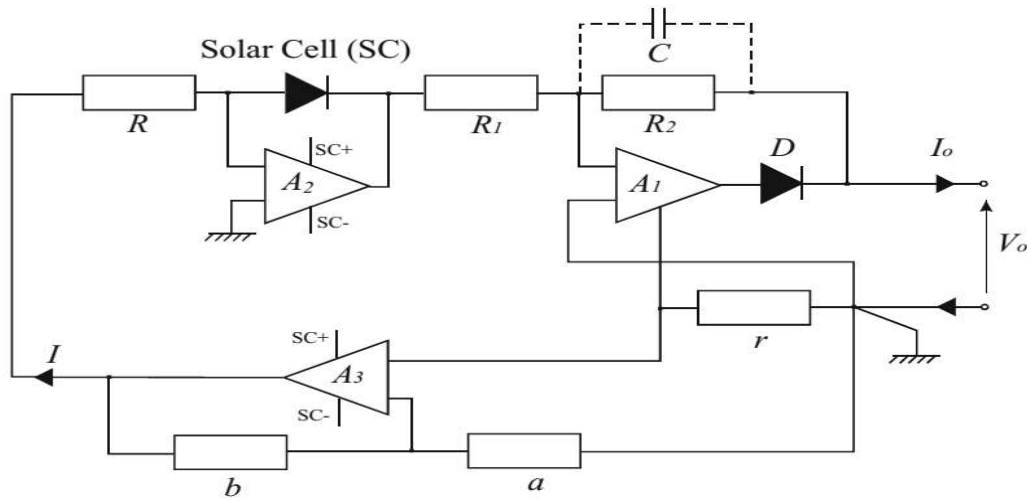


Figure (I. 3) : Schéma de l'émulateur de source PV proposé par Baert [1]

En particulier, l'amplificateur A1 permet de multiplier la tension de la cellule solaire par un facteur $\frac{-R_1}{R_2}$. Le courant de sortie est détecté par une faible résistance r par laquelle il est transformé en une tension, puis il est renvoyé dans la cellule par un autre amplificateur A₃; donc, le nouveau courant de sortie est le courant de cellules de référence multiplié par un facteur $\frac{aR}{br}$.

Le condensateur C est employé comme limiteur de la largeur de bande passante pour supprimer des oscillations à haute fréquence, alors que la diode D est employée pour protéger le dispositif contre le courant et la tension inverse peu désirés. [1]

B. Emulateur de source PV proposé par Nagayoshi

Une approche semblable est suivie par Nagayoshi (2004) qui propose un multi circuit de caractéristique (I, V) dont l'unité élémentaire est basée sur un amplificateur linéaire de courant continu.

Le circuit utilise une petite cellule PV comme générateur de la caractéristique (I, V) et fournit une amplification séparée de la tension et du courant pour réaliser l'opération d'émulateur PV. Le schéma de cet émulateur est illustré dans la figure (I-4).

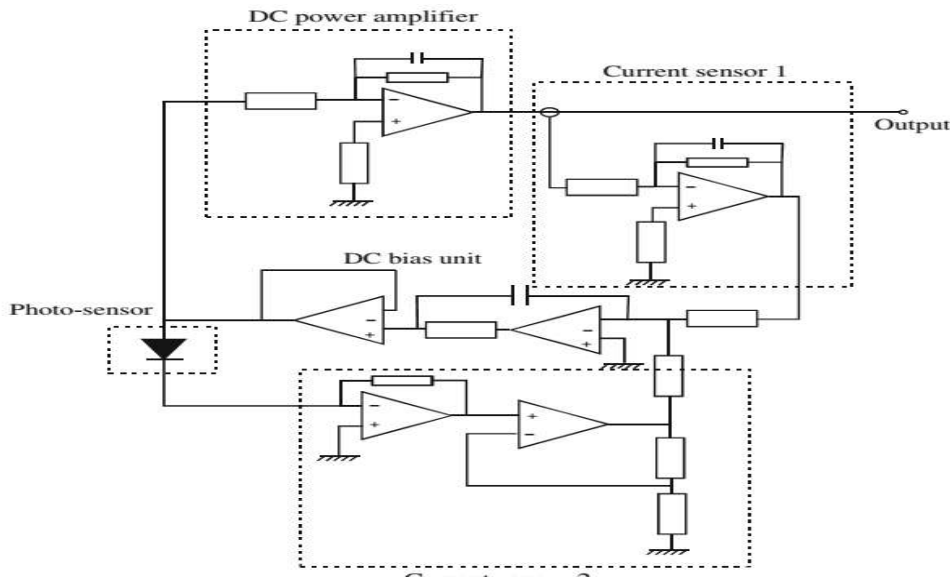


Figure (I. 4) : Emulateur de source de PV proposé par Nagayoshi [1]

Il est possible d'observer qu'un amplificateur d'alimentation à courant continu, augmente la tension de sortie de la petite cellule PV (obtenue par une photo détectrice PN illuminée par une lumière de LED), tandis que le point de fonctionnement est contrôlé par le signal de retour provenant d'un capteur de courant placé à la sortie du simulateur. Pour plus d'explication, le courant de sortie de l'émulateur PV I_{out} et le courant photo-capteur I_{ph} est contrôlé par les capteurs de courant 1 et 2 respectivement. La tension de sortie du capteur de courant 2 est maintenue égale à la sortie en tension du capteur de courant 1 à tout moment par une commande en rétroaction.

Par conséquent le gain en courant est donné par:

$$A_1 = I_{out}/I_{ph} = G_2/G_1 \quad (I.1)$$

Où

$$G_1 = V_{s1}/I_{out} \quad (I.2)$$

$$G_2 = V_{s2}/I_{ph} \quad (I.3)$$

G_1 et G_2 étant les gains des capteurs de courants 1 et 2, respectivement et V_{s1} et V_{s2} les tensions de sorties des capteurs de courants 1 et 2, respectivement. Selon ces équations, il est

possible d'observer que le gain en courant est indépendant du gain en tension, défini par l'amplificateur de puissance.

Dans ce système, la dépendance de la température de la source solaire est mise en application par la commande de température de la photo détectrice.

Plusieurs courbes (I, V) ont été obtenues par l'émulateur PV décrit en utilisant une résistance de puissance variable comme charge.

L'utilisation de l'amplificateur opérationnel permet à la tension et au courant délivré par la source d'être amplifié, leurs valeurs maximum sont limitées seulement par le choix des amplificateurs. D'ailleurs, l'amplificateur opérationnel a une bonne largeur de bande pour reproduire correctement les coupures. D'autre part, les phénomènes parasites, attachés à la capacité de jonction ou l'inductance de fils, peut être reproduite correctement seulement avec référence à la cellule PV utilisée comme échantillon. En effet, le raccordement série (parallèle) des cellules PV diminue (augmente) la valeur de la capacité de jonction et augmente (diminue) l'inductance parasite; par conséquent, une seule multiplication de la tension ou du courant ne peut pas tenir compte de ces effets. [1]

C. Emulateur de source PV proposé par Easwarakhanthan

Afin de surmonter la flexibilité limitée des méthodes d'émulation PV précédemment décrites, pour prendre en compte facilement l'influence des paramètres de la météo sur la source photovoltaïque, Ea-Swarakhanthan (1986) a proposé un émulateur contrôlé par micro-ordinateur basé sur une source de tension continue programmable, un multimètre programmable et un amplificateur de puissance. Dans ce système, les points de fonctionnement sont fournis par un tableur, pour les variations de charge, d'éclairement solaire, de température et de divers paramètres de module / réseau PV selon une technique itérative à interpolation linéaire

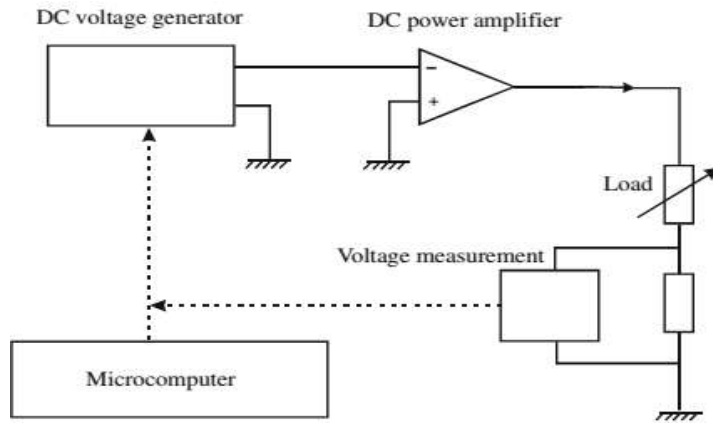


Figure (I. 5) : Principe de l'émulateur de source de PV proposé par Easwarakhanthan [1]

Un ordinateur calcule le courant de sortie et la tension à l'intersection entre la courbe (I, V) de la source PV et une ligne droite entre deux points traités ultérieurement sur la courbe de fonctionnement de la charge. Ensuite, il programme le générateur de tension continue pour appliquer la tension calculée à la charge, acquiert le courant mesuré, par le multimètre, est comparé ainsi, avec celui calculé.

Une boucle de retard est activée lorsque la différence relative entre les courants mesurés et calculés atteint la limite souhaitée. Il convient de noter que le fonctionnement du système décrit nécessite une connaissance de la courbe de fonctionnement de la charge connectée. C'est à dire que la connaissance de l'impédance de récepteur est importante. [1]

I.3.3 Circuits basés sur les régulateurs linéaires

Dans ce genre de circuits, la tension de sortie est obtenue par un dispositif capable de faire varier la tension continue, et la mise en série de résistances variables quantifiant les chutes de tension. Par conséquent, la tension de sortie est toujours inférieure à la tension d'alimentation. Cet effet peut être obtenu par un transistor de puissance polarisé dans la région active, fonctionnant ainsi comme amplificateur de classe A. Cependant, un effet semblable, bien que tout à fait rigoureux, peut être également obtenu avec une série de résistances. [1]

A. Emulateur de source de PV proposé par Mukerjee et Dasgupta

Un circuit à prix réduit utilisé comme émulateur PV pour examiner l'algorithme MPPT est proposé par Mukerjee et Dasgupta (2007). Il est basé sur une alimentation à tension continue variable, cette variation est effectuée approximativement avec une résistance variable. Ce circuit donne un comportement semblable à celui d'un générateur PV. Le principe du système est donné par la figure (I-6).

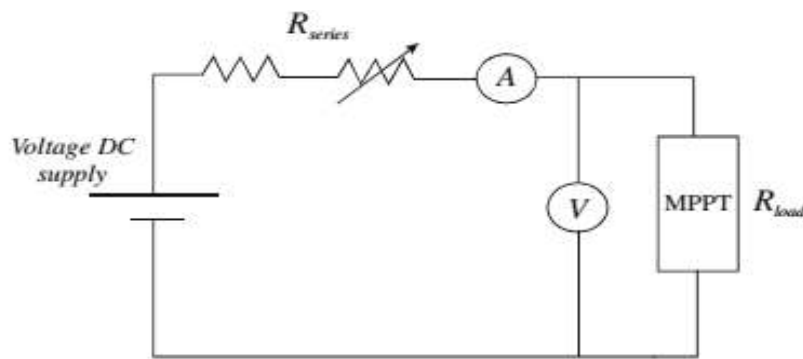


Figure (I. 6) : Emulateur de source PV proposé par Mukerjee et Dasgupta[1]

Si la résistance indiquée comme $R_{\text{série}}$ est fixe, quand la charge R varie de sa valeur minimum à sa valeur maximum, la caractéristique du courant qui la traverse en fonction de la tension à ces bornes est de forme linéaire avec une pente négative.

La puissance absorbée par la charge R atteint son maximum quand la chute de tension aux bornes de la résistance est égale à la moitié de la tension d'alimentation appliquée, correspondant à V_{oc} du générateur PV émulé. Par conséquent, la courbe (I, V) aura un maximum semblable à la courbe de (I, V) produite par une source PV. Le MPPT pistera ce maximum.

Afin de tenir compte des variations de la température, la valeur de la tension d'alimentation est modifiée, quand la température change, la tension en circuit ouvert change de manière significative.

Pour augmenter ou diminuer le courant de court-circuit, la valeur de $R_{\text{série}}$ doit être convenablement modifiée, s'assurant qu'une résistance finie est toujours en série avec la source d'alimentation, pour éviter d'éventuels dommages possibles. [1]

B. Emulateur de source PV proposé par Lloyd

Une solution intéressante proposée par Lloyd (2000), utilisant la combinaison d'un régulateur de classe A et de plusieurs sources de courant continu qui peuvent être reliées au régulateur par des commutateurs à base de diodes. En particulier, une conception modulaire a été adoptée pour installer un émulateur de source PV, dont l'unité de puissance simple est capable de fournir un maximum de puissance de 400 W.

Afin de tenir compte du vrai comportement de la source PV, un réseau de courbes (I, V) pour des valeurs indiquées d'irradiance solaire et des températures a été utilisé. Ces courbes sont chargées dans un EPROM. Les courbes (I, V) ont été calculées sur la base d'un modèle de double diode avec des références de panneaux PV du silicium (a-Si) poly cristallins et amorphes.

Le schéma électrique de ce système est représenté sur la figure (I- 7).

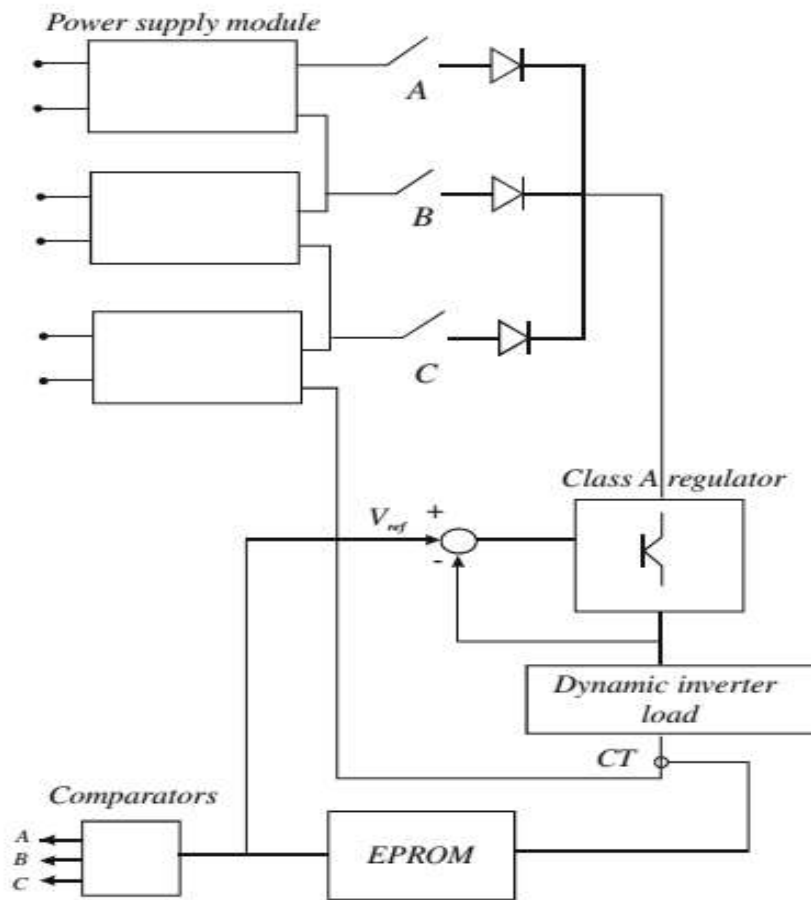


Figure (I. 7) : Emulateur de source PV proposé par Lloyd [1]

Le régulateur de la classe A produit une tension de sortie, selon les caractéristiques (I, V) contenues dans l'EPROM, pour poursuivre le comportement de la source PV, un bloc commande « Dynamic inverter » fournit le signal de contrôle du transistor, qui fonctionne en amplificateur. Le régulateur est équipé d'une commande de courant permettant aux unités de puissance additionnelles d'être reliées en parallèle, pour obtenir un courant de sortie plus élevé.

Les commutateurs de charge statique A, B, et C, sont automatiquement choisis pour faire fonctionner le régulateur. Des modules d'alimentation d'énergie peuvent être reliés en série ou en parallèle pour répondre aux caractéristiques (I, V) de l'onduleur PV mis à l'essai. Ce système d'émulation permet deux modes de fonctionnement:

1. Régulateur de courant: dans ce cas la tension est mesurée et introduite à l'EPROM cela donne une valeur désirée du courant de charge.
2. Régulateur de tension: dans ce cas l'EPROM délivre la tension de référence, $V_{\text{réf}}$.

Dans le premier cas la tension mesurée est employée pour commuter les alimentations d'énergie. [1]

C. Émulateur de cellules PV avec une diode zener

Pour mettre en œuvre la cellule photovoltaïque représentée sur la figure(I-7), en utilisant par exemple une diode de redressement, et d'obtenir une tension considérable en sortie, il faudrait une quantité raisonnable de cellules PV, ce qui est indésirable dans la pratique. Pour surmonter ce problème, il est possible d'utiliser une diode Zener. A cause de la puissance limitée que peut supporter une diode zener, ce dispositif est associé à un transistor bipolaire comme indiqué sur la figure (I-8) [5]

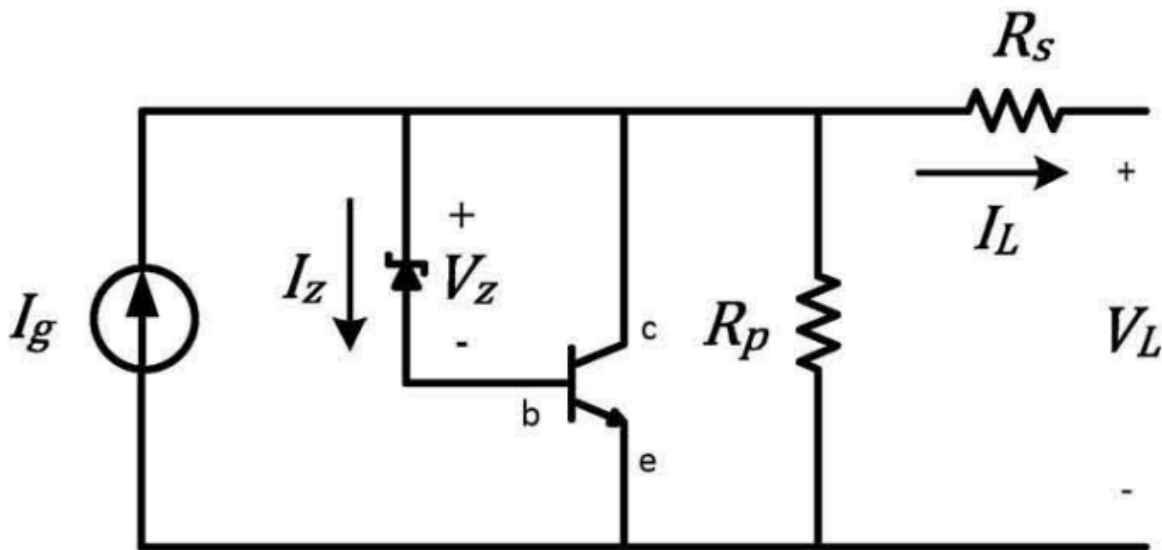


Figure (I. 8) : Modèle de cellule PV proposé. [5]

D. Approximation de modèle de diode basée sur un émulateur de PV

Un nouveau modèle d'approximation à deux diodes a été proposé et testé dans la plateforme MATLAB. Comparant à la réponse lente et l'extraction retardée des paramètres PV dans un circuit analogique basé sur une approche; cette méthode donne une réponse rapide et dynamique pour émuler caractéristiques P-V et I-V exactes. En outre, l'analyse de simulation pour plusieurs conditions d'ombrage partiel a été réalisée pour un grand champ PV. Les auteurs

ont affirmé que l'approximation à double diode a plus de précision par rapport aux techniques d'approximation à diode unique. L'approche itérative a donné de bons résultats en accord avec des valeurs expérimentales. [2]

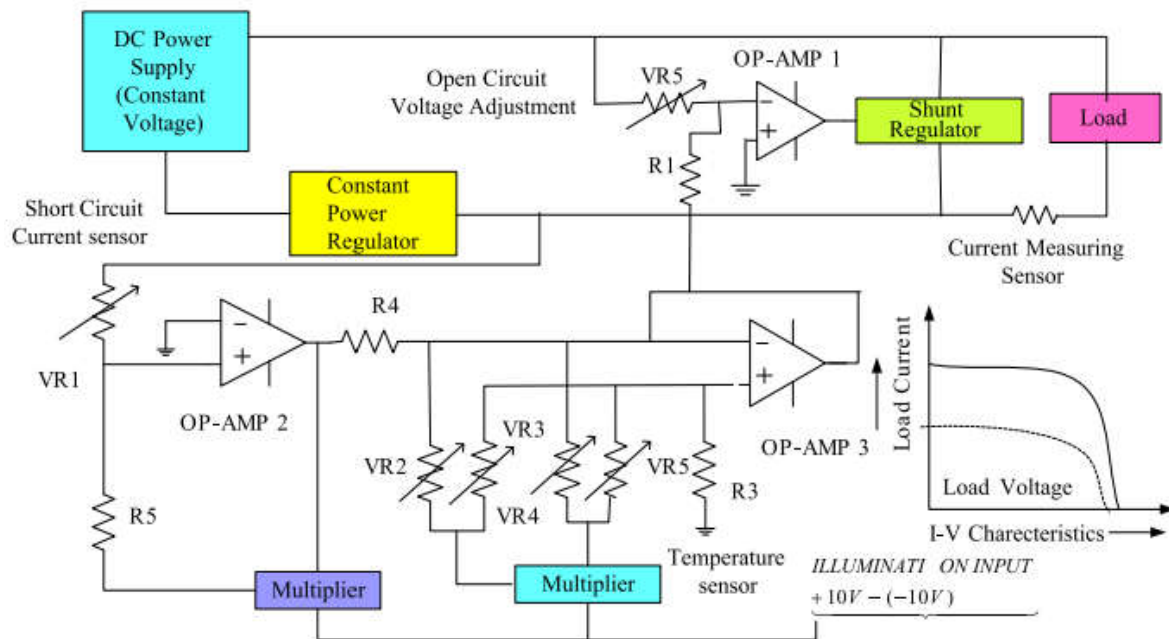


Figure (I. 9) : structure d'un émulateur PV conçu à l'aide d'un amplificateur opérationnel (op_Amp) [2]

E. Emulateur de source PV proposé par Haeberlin et Borgna

Un intéressant émulateur linéaire de source PV de puissance élevée (pour des puissances allant jusqu' aux dizaines de kW) est proposé par Haeberlin et Borgna (2004), pour des tests sur des onduleurs photovoltaïques, en tenant compte de l'efficacité des algorithmes MPPT. Il est basé sur une source de courant linéaire contrôlée, caractérisée par une grande stabilité et sans interaction avec les circuits d'électroniques de puissance testés. Le schéma de principe d'un tel dispositif est représenté sur la Figure (I-10).

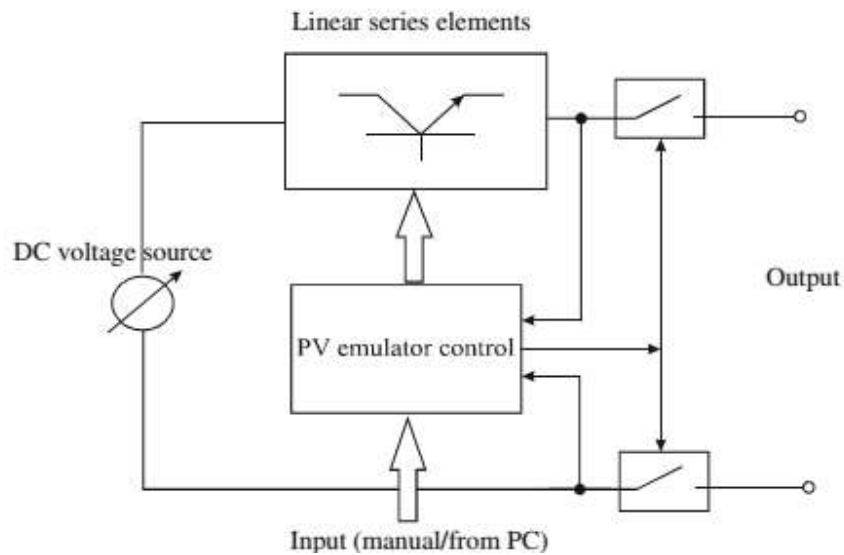


Figure (I. 10) : Schéma descriptif d'émulateur de source PV

Proposé par Haeberlin et Borgna[1]

Dans cet émulateur, la variation de puissance est imposée en changeant le courant de fonctionnement. Ce mode de fonctionnement reproduit la variation d'irradiation solaire par rapport à la température constante.

Il est possible d'observer la présence de deux interrupteurs d'isolement en série, utilisés pour fournir une isolation galvanique à la sortie de l'émulateur PV lorsqu'il ne fonctionne pas.

Le choix d'un design linéaire, dans ce cas, est considéré comme approprié pour deux raisons principales: la meilleure réponse dynamique et l'absence de tensions haute fréquence générées en interne, car aucune commutation PWM ne sera produite, c'est un avantage en ce qui concerne la compatibilité électromagnétique. Concernant la puissance ce type d'émulateur est limité. Ceci s'explique par la conception linéaire qui implique un grave inconvénient; En particulier, si l'émulateur fonctionne à proximité de l'état de court-circuit avec des valeurs élevées de la source de tension, une grande quantité de puissance sera dissipée dans les éléments placés en série fonctionnant en mode linéaire.

Quoi qu'il en soit, cette condition est rare et les pertes de puissance peuvent être réduites par un choix approprié du niveau de tension de la source d'alimentation et par une réduction appropriée du courant à l'approche du court circuit. Ces pertes de puissance, cependant, restent

plus élevées que la puissance perdue dans des convertisseurs statiques, utilisant les transistors en commutation.

D'où la nécessité d'utilisation des semi-conducteurs en commutation (fonctionnement en tout ou rien), si les puissances des systèmes à émuler sont importantes. [1]

I.3.4 Circuits basés sur des convertisseurs d'électronique de puissance :

Les émulateurs de source PV, dont la structure matérielle est basée sur les convertisseurs d'électronique de puissance, sont les plus citées dans la littérature technique, la raison de leur succès dépend des considérations suivantes :

Un amplificateur linéaire a besoin, en général, d'un grand dissipateur de chaleur et ses pertes de puissance de conversion se rapprochent de 100% lorsque l'émulateur PV fournit le courant de court-circuit. Dans un convertisseur DC / DC, les périphériques d'alimentation sont utilisés en considérant seulement deux états fondamentaux: l'état dans lequel la tension de l'interrupteur d'alimentation est nulle et l'état d'arrêt dans lequel, à son tour, le courant est nul. Dans les deux cas, en principe, il n'y a pas de dissipation énergétique. Des pertes ont lieu uniquement pendant les transitions entre les états d'amorçage et de blocage et vice versa, elles sont proportionnelles à la fréquence de commutation.

En conséquence, le rendement global est très élevé, d'où une unité d'émulation de plus petite taille peut être configurée tout en prenant en charge des puissances importantes. [1]

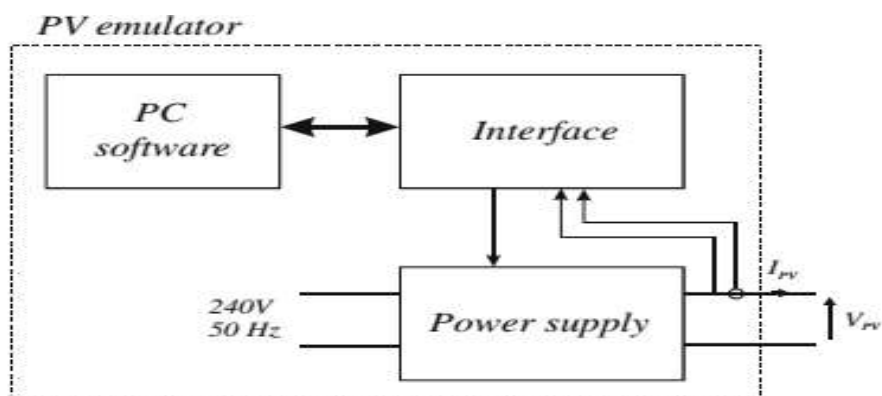


Figure (I. 11) : Principe d'un emulateur basé sur l'électronique de puissance[1]

A. Emulateur de source PV proposé par Khouzam et Hoffma

Une réalisation d'émulateur photovoltaïque basée sur un convertisseur fonctionnant en mode commuté, avec un contrôle numérique, est proposée par Khouzam et Hoffman (1996). Ce système peut imiter un générateur photovoltaïque en temps réel, en tenant compte des caractéristiques de tout le système, de sa taille, ainsi que des conditions spécifiques d'irradiation et de température et le vieillissement photovoltaïque.

Toutes ces données peuvent être introduites dans un ordinateur, afin que la sortie du convertisseur soit contrôlée pour reproduire le point de fonctionnement correspondant.

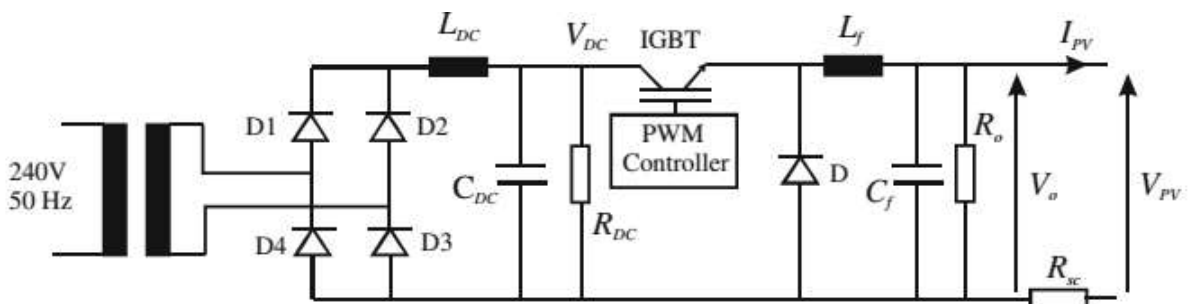


Figure (I. 12) : Détails du bloc d'alimentation d'énergie

(Émulateur de PV proposé par Khouzam et Hoffman) [1]

Le système est composé d'un pré-régulateur, d'un convertisseur de tension DC/DC fonctionnant en mode commutateur produisant plusieurs Watt (alimentation), d'une interface informatique et d'un logiciel de modélisation et de contrôle. La nouveauté de l'approche dans la configuration de cet émulateur est l'utilisation d'une modélisation mathématique pour décrire la caractéristique de sortie de la source PV.

La figure (I-11) montre le schéma synoptique de l'émulateur PV. Les détails des blocs sont indiqués sur la figure (I-12)

La tension d'alimentation est réduite par un transformateur d'isolement, ensuite redressée et filtrée pour créer une tension continue constante et non régulée que l'on appelle, V_{DC} . Cette tension est appliquée à l'entrée du convertisseur de nature DC/ DC, fonctionnant à des fréquences relativement élevées, de l'ordre de 50 kHz, à la sortie de ce dernier on récupère une tension continue régulée allant de 0 à V_{DC} . La résistance de dérivation R_o est utilisée pour permettre un fonctionnement en mode de conduction continue du convertisseur DC / DC (c'est-à-dire une

opération où le courant dans l'inducteur du convertisseur ne s'annule jamais entre les cycles de commutation) même pour un courant I_{PV} égal à zéro. La résistance série R_{sc} est utilisée pour fournir un degré de limitation de courant si la sortie est en court-circuit. En mettant en œuvre les équations du modèle PV dans le logiciel de contrôle, la tension de sortie du convertisseur DC / DC est conduite pour suivre la loi $V_{PV} = f(I_{PV})$. Le courant de sortie du convertisseur est d'abord mesuré, puis la tension théorique correspondante est calculée. Le processus est répété itérativement et en quelques millisecondes jusqu'à ce que la tension et le courant de sortie corrects soient dans une faible tolérance pour une charge donnée et un ensemble spécifié de paramètres PV. En ce qui concerne ces paramètres, ainsi que l'éclairement solaire, la température et les conditions de vieillissement, ils peuvent tous être sélectionnés et modifiés avant et pendant le fonctionnement. En outre, les courbes (I,V) du réseau photovoltaïque peuvent être définies en termes de paramètres sur la base de tableau précédemment acquis ou une interpolation entre les valeurs mesurées d'un tableau réel. [1]

B. Emulateur de source PV proposé par Sanchis (2003)

Une autre topologie intéressante de l'émulateur de source PV a été proposée par Sanchis (2003). Son idée principale est de mesurer l'évolution réelle et dynamique du réseau de courbes caractéristiques (I, V) d'un générateur photovoltaïque à l'extérieur, puis de les reproduire au laboratoire pour les onduleurs et les tests avec les algorithmes MPPT. [1]

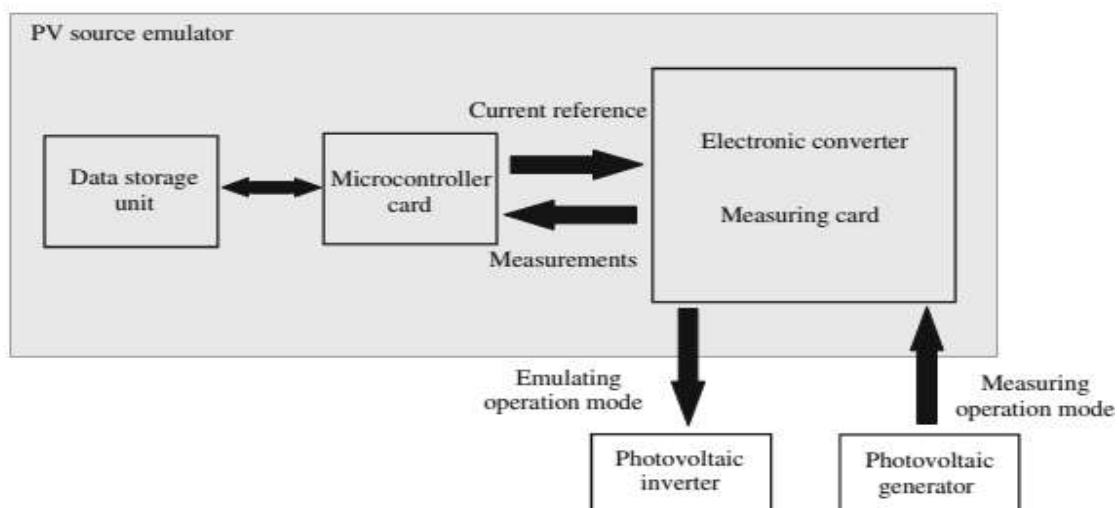


Figure (I. 13) : Description globale de l'émulateur de source PV proposé par Sanchis et autres. [1]

Une description globale du système est donnée à la figure (I-14),

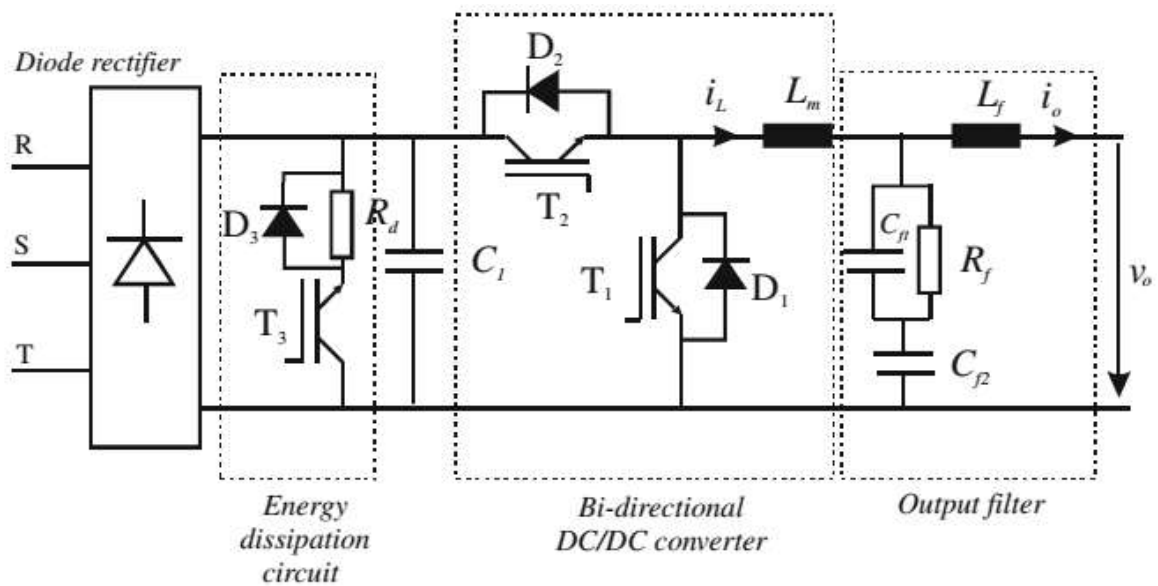


Figure (I. 14) : Circuit de puissance de l'émulateur de source PV proposé par Sanchis [1]

Il est possible d'observer que tout le système se compose d'un convertisseur électronique, d'un microcontrôleur et d'une unité de stockage de données. Une carte de mesure est également incluse dans le convertisseur de puissance dans le but de mesurer, par des capteurs appropriés, les courbes (I, V) d'un réseau photovoltaïque et d'implémenter les boucles de contrôle.

L'émulateur est réalisé par un convertisseur bidirectionnel en courant continu avec des transistors IGBT qui permettent deux modes de fonctionnement différents, c'est-à-dire la mesure et l'émulation, avec l'avantage évident de combiner à la fois les modes de travail prévus avec un seul équipement.

Lorsque le système fonctionne en mode émulation, les convertisseurs de puissance se comportent comme une source d'alimentation; En particulier, il fonctionne comme un convertisseur abaisseur, qui réduit la tension fournie par le réseau électrique via le redresseur à diodes. Au contraire, lorsque le système fonctionne en mode de mesure, le convertisseur se comporte comme une charge variable et il fonctionne comme un convertisseur amplificateur c'est-à-dire élévateur, fourni par un générateur photovoltaïque.

Le prototype du système peut mesurer et imiter le comportement d'un générateur photovoltaïque jusqu'à 15 kW et peut réaliser des acquisitions de données en temps réel toute les trois secondes. [1]

C. Emulateur PV propose par Koutroulis et autres (2007)

Récemment, des émulateurs PV basés sur des convertisseurs DC/ DC contrôlés par Field Pro-Gammable Gate Arrays (FPGA) ont été proposés. Le système développé par Koutroulis (2009) doit être pris en considération. La structure matérielle est basée sur un convertisseur buck simple dont le contrôle est obtenu par une unité basée sur un FPGA, fonctionnant selon le principe de PWM. La figure (I-15) schématise son principe.

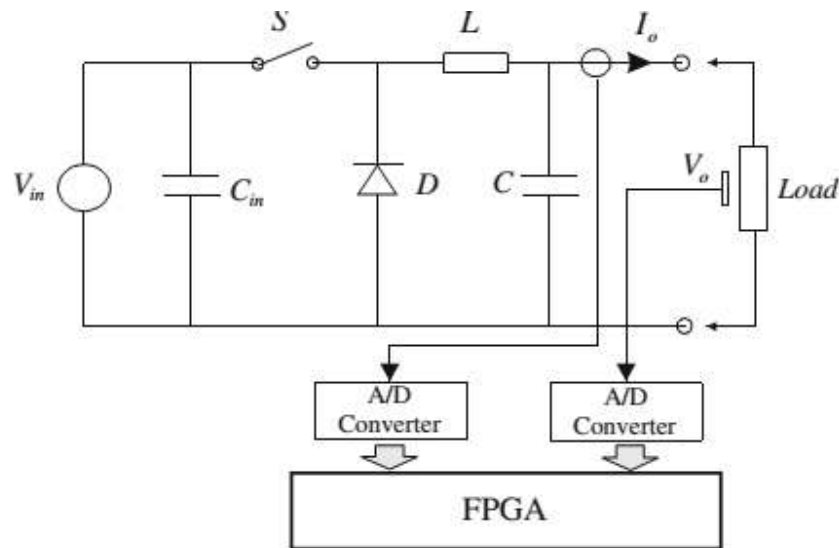


Figure (I. 15) : Arrangement de circuit de PVAE proposé par Koutroulis et autres[1]

Il est composé du convertisseur de commutation DC/ DC et du système de commande comprenant l'unité FPGA, les convertisseurs analogique-numérique (A / D) et les capteurs de tension et de courant.

L'avantage d'un FPGA en termes de flexibilité, en raison de sa capacité de reprogrammation et de sa logique reconfigurable, permet à l'émulateur d'être adapté à toute modification. Par conséquent, une émulation d'un générateur photovoltaïque sous différentes conditions, à savoir :

- Type de matériaux utilisé
- de température
- de l'uminosité
- de pression atmosphérique est possible.

En général, les cartes de contrôle sont caractérisées par des caractéristiques de calcul rapides et rendent possible la mise en œuvre d'une architecture parallèle, ce qui permet d'obtenir une réduction du temps d'exécution de l'algorithme de contrôle.

Par rapport aux implémentations basées sur le processus des émulateurs PV, le système basé sur un FPGA contribue à un prototypage. En outre, les caractéristiques opérationnelles du microcontrôleur doivent permettre une haute fréquence des dispositifs FPGA permettant une architecture d'unité de commande PWM permettant d'implémenter une fréquence de commutation de convertisseur de puissance accrue. Par conséquent, une réduction de la taille du convertisseur (et du coût) est réalisable car elle est principalement liée à la taille du matériau magnétique de l'inductance qui, à son tour, est inversement proportionnelle à la fréquence de commutation du convertisseur.

L'émulateur considéré reproduit la courbe (I, V) d'un générateur photovoltaïque donné fonctionnant sous n'importe quelle condition d'irradiation et de température. Il a la flexibilité d'être opérationnel soit avec des valeurs mesurées en temps réel de la température « T » et de l'irradiation « G », provenant de capteurs de température et d'irradiation solaire, ou avec des valeurs définies par l'utilisateur entrées dans l'émulateur PV dans un format numérique via un port PC. Le prototype développé utilise un MOSFET de puissance évaluée de 60 V et de 50 A et une fréquence de commutation PWM d'environ 50 kHz. [1]

D. Emulateur avec des diodes zener :

Pour vérifier le circuit proposé de la figure (I-16). En pratique, le circuit construit illustré dans la figure (I-17) inclue la diode de dérivation en parallèle avec chaque cellule PV pour émuler la condition d'ombrage partielle. Dans ce cas, le circuit peut être modélisé avec une équation simplifiée de diode pour obtenir le courant. Ensuite, un diviseur de tension simple est placé à la sortie pour limiter le courant et donner le comportement souhaité. [5]

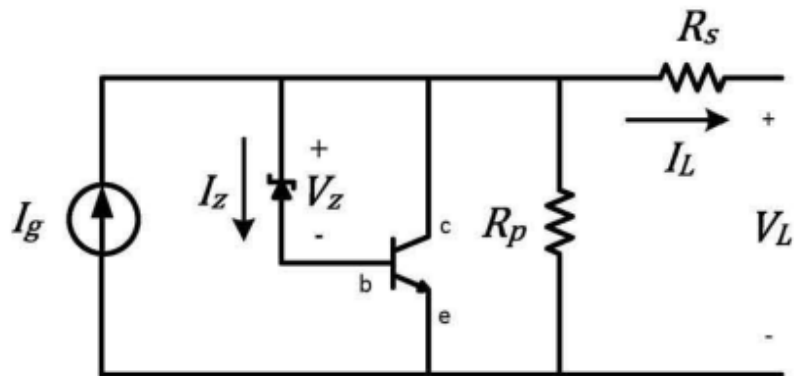


Figure (I. 16) : Modèle de cellule PV proposé [5]

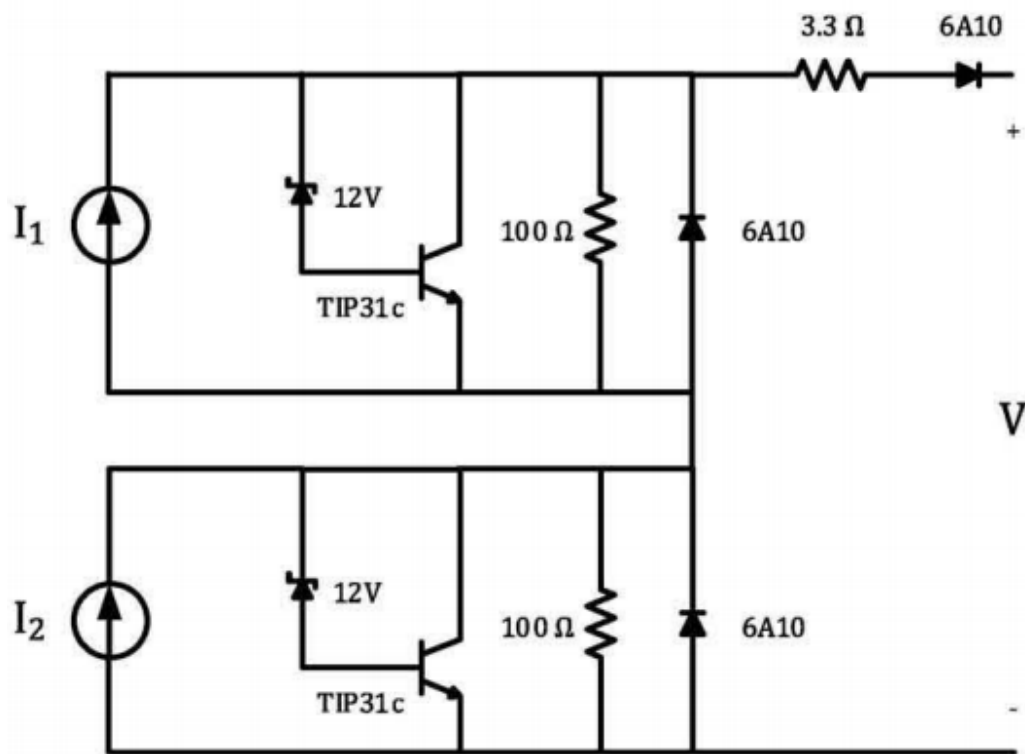


Figure (I. 17) : circuit conçu pour émuler deux cellules PV en série en utilisant des diodes zener [5]

I.3 Conclusion

Dans ce premier chapitre, diverses méthodes adoptées pour réaliser des émulateurs PV solaires sont examinées. Une étude détaillée a été rassemblée en analysant différentes méthodologies sur les émulateurs et leur capacité à reproduire une caractéristiques I-V précise dans des conditions météorologiques bien définis. Différentes méthodologies basées sur le coût de réalisation, la précision, le niveau de complexité, la performance dans des conditions environnementales, et la mise en œuvre du matériel a été également présenté.

En outre, les avantages et les limites de toutes ces méthodes sont clairement énoncés en se basant sur l'analyse effectuée sur les différentes recherches disponibles dans la littérature.

A partir de ce bref aperçu des topologies des émulateurs PV, il est possible de conclure que la solution la plus utilisée repose sur l'utilisation de convertisseurs de commutation DC / DC. En fait, cette solution permet une réalisation simple, une bonne efficacité et une reproduction précise des courbes courant-tension (I, V) à la fois en régime permanent et en conditions dynamiques. Les informations concernant l'installation photovoltaïque constituent un bloc important d'un émulateur, par conséquent le chapitre suivant sera consacré à l'étude et la modélisation d'une cellule photovoltaïque.

Chapitre II

Modélisation des cellules photovoltaïques

II.1 Introduction

Pour faire l'étude d'un émulateur photovoltaïque, la première chose à faire est la bonne connaissance du comportement du site des panneaux photovoltaïques choisis, exigé par le cahier de charge. Ainsi, pour développer un circuit équivalent précis du comportement d'une cellule PV dans un site défini, il est nécessaire de comprendre la configuration physique des éléments de la cellule, aussi bien que les caractéristiques électriques de chaque élément.

La modélisation mathématique des cellules solaires est indispensable pour toute opération d'optimisation du rendement ou de diagnostic du générateur photovoltaïque. Le module photovoltaïque est représenté généralement par un circuit équivalent dont les paramètres sont calculés expérimentalement en utilisant la caractéristique courant-tension, I-V. La détermination précise de ces paramètres reste un challenge pour les chercheurs, ce qui a conduit à une grande diversification dans les modèles électriques, proposés pour représenter la cellule photovoltaïque.

II.2 Rappels sur la cellule photovoltaïque

II.2.1 La cellule PV et sa structure

Une cellule photovoltaïque également dénommée cellule solaire ou encore photopile est le plus petit élément d'une installation photovoltaïque, est un composant électronique qui, exposé à la lumière (photons), produit de l'électricité grâce à l'effet photovoltaïque qui est à l'origine du phénomène. Le courant obtenu est proportionnel à la puissance lumineuse incidente. La cellule photovoltaïque délivre une tension continue.

Les cellules photovoltaïques sont constituées :

- d'une fine couche semi-conductrice (matériau possédant une bande interdite, qui joue le rôle de barrière d'énergie que les électrons ne peuvent franchir sans une excitation extérieure, et dont il est possible de faire varier les propriétés électroniques) tel que le silicium, qui est un matériau présentant une conductivité électrique relativement bonne,
- d'une couche antireflet permettant une pénétration maximale des rayons solaires,
- d'une grille conductrice sur le dessus ou cathode et d'un métal conducteur sur le dessous ou anode,

- les plus récentes possèdent même une nouvelle combinaison de multicouches réfléchissantes, juste en dessous du semi-conducteur, permettant à la lumière de rebondir plus longtemps dans celui-ci pour améliorer le rendement [7] .

II.2.2 L'effet photovoltaïque :

Une cellule photovoltaïque constitue l'élément de base des panneaux solaires photovoltaïques, c'est un dispositif qui permet de transformer l'énergie solaire, porté par les photons, en énergie électrique. Cette transformation est basée sur les trois mécanismes suivants :

- Absorption des photons (dont l'énergie est supérieure au gap) par le matériau constituant le dispositif.
- Conversion de l'énergie du photon en énergie électrique, ce qui correspond à la création de paires électron/trous dans le matériau semi-conducteur.
- Collecte des particules porteuses de charge électrique générées dans le dispositif [8]

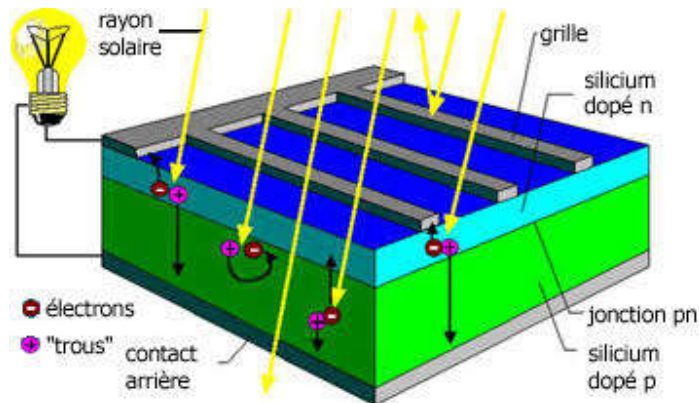


Figure (II. 1) : Cellule photovoltaïque

II.2.3 Caractéristique électrique

II.2.3.1 Propriétés

La cellule photovoltaïque possède une caractéristique $i = f(v)$ non linéaire Figure (II-2). La caractéristique d'une cellule photovoltaïque balaie 3 quadrants le repère (courant, tension) sur les 4 existants.

Dans le quadrant QI et le quadrant QIII la cellule PV fonctionne en récepteur. Le fonctionnement dans ces deux quadrants est à proscrire car un risque de destruction par phénomène d'échauffement local (hot spot) est possible. Dans le quadrant QII, la cellule fonctionne en générateur, c'est le fonctionnement normal, en effet dans ce cas la cellule produit donc de l'énergie. L'objectif est donc de faire travailler la cellule dans le deuxième quadrant [8].

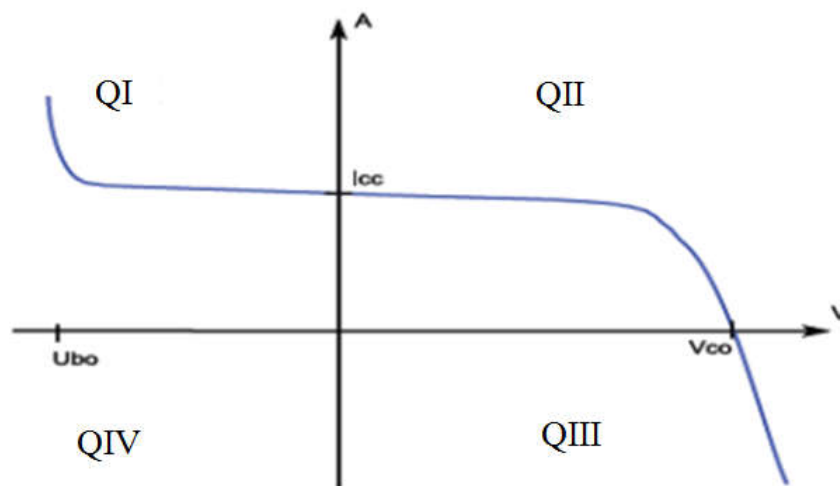


Figure (II. 2) : Caractéristique (I, V) d'une cellule photovoltaïque

II.2.3.2 Caractéristique courant-tension et schéma équivalent

Il est difficile de donner un caractère source de courant ou de tension à un panneau photovoltaïque sur toute l'étendue de la caractéristique courant-tension. Le panneau photovoltaïque est donc à considérer comme une source de puissance continue. On s'aperçoit alors de l'existence d'un point P_m où la puissance est maximale. Il est sans aucun doute intéressant de choisir un récepteur dont l'impédance nous place sur ce point pour tirer le maximum d'énergie et ainsi exploiter au mieux la puissance crête installée. Certains régulateurs solaires réalisent donc une adaptation d'impédance pour qu'à chaque instant on se trouve proche de ce point de puissance maximale (Maximum Power Point Tracking (MPPT)). La caractéristique réelle et le schéma équivalent de la cellule sont représentés sur la figure (II-3). Les valeurs respectives des divers éléments du schéma équivalent déterminent les performances de la cellule réelle.[9]

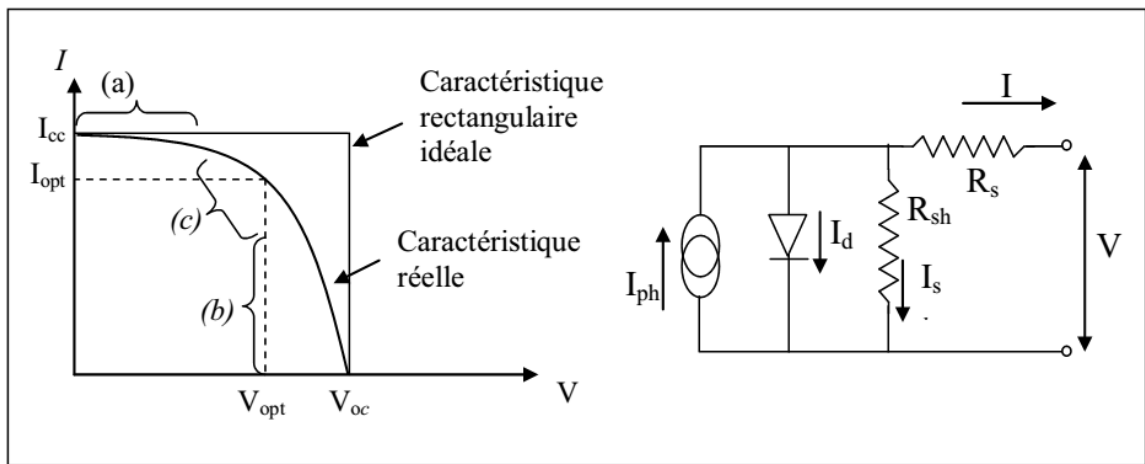


Figure (II. 3) : Caractéristique et schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque réelle. [9]

La caractéristique d'un générateur PV constitué de plusieurs cellules a une allure générale assimilable à celle d'une cellule élémentaire, sous réserve qu'il n'y ait pas de déséquilibre entre les caractéristiques de chaque cellule (irradiation et température uniformes). Nous pouvons décomposer la caractéristique $I = f(V)$ d'un générateur photovoltaïque en 3 zones :

- Une zone assimilable à un générateur de courant I_{CC} proportionnel à l'irradiation, d'admittance interne pouvant être modélisée par $1/R_{sh}$ (Zone a),
- Une zone assimilable à un générateur de tension V_{co} d'impédance interne équivalente à la résistance série R_s (Zone b),
- Une zone où l'impédance interne du générateur varie très fortement de R_s à R_{sh} (zone c). C'est dans la zone c qu'est situé le point de fonctionnement pour lequel la puissance fournie par le générateur est maximale. Ce point est appelé point de puissance optimale, caractérisé par le couple (I_{max}, V_{max}) , et seule une charge dont la caractéristique passe par ce point, permet d'extraire la puissance maximale disponible dans les conditions considérées. [9]

II.2.4 Paramètres d'un panneau photovoltaïque

Il existe de nombreux paramètres qui permettent de caractériser un panneau solaire. Ces paramètres sont appelés paramètres photovoltaïques et sont déduits de la caractéristique (I, V) . La figure (II-4) représente une caractéristique courant-tension (I, V) dans le noir et sous illumination typique d'une cellule photovoltaïque à jonction PN. Le tracé de cette courbe permet d'accéder à un bon nombre de paramètres physiques caractérisant le composant. Les premiers paramètres qui apparaissent sur la caractéristique courant-tension d'un panneau photovoltaïque sont le courant de court-circuit (I_{cc}), la tension à circuit ouvert (V_{co}) et le facteur de forme (FF) du composant. [8]

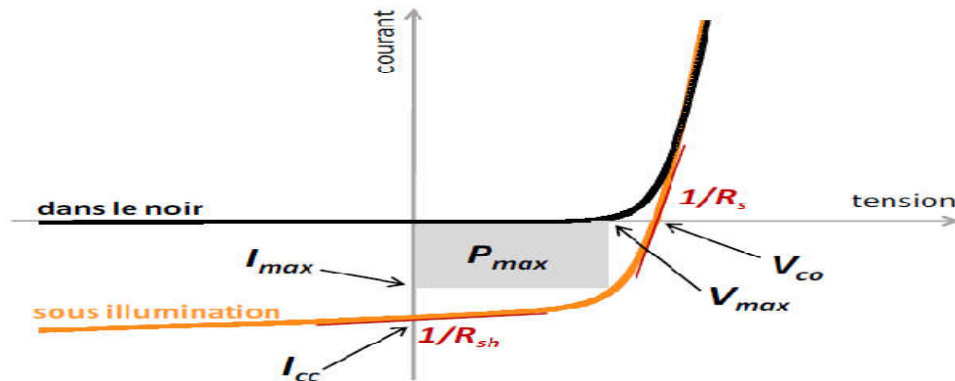


Figure (II. 4): Caractéristique courant-tension et paramètres physiques d'une cellule photovoltaïque. [8]

II.2.4.1 Courant de court-circuit, I_{CC}

Il s'agit du courant obtenu en court-circuitant les bornes de la cellule (en prenant $V=0$ dans le schéma équivalent). Il croît linéairement avec l'intensité d'illumination de la cellule et dépend de la surface éclairée, de la longueur d'onde du rayonnement, de la mobilité des porteurs et de la température. [8]

II.2.4.2 Tension à circuit ouvert, V_{CO}

La tension à circuit ouvert est obtenue quand le courant qui traverse la cellule est nul. Elle dépend de la barrière d'énergie et de la résistance shunt. Elle décroît avec la température et varie peu avec l'intensité lumineuse. [8]

$$V_{co} = \frac{KT_c}{q} \log \left(\frac{I_{ph}}{I_s} + 1 \right) \quad (\text{II-1})$$

Avec :

$\frac{KT_c}{q}$: représente le potentiel thermodynamique

T_c : la température

q : la constante de charge d'électron, $1.602 \cdot 10^{-19} C$

K : la constante de Boltzmann, $1.38 \cdot 10^{-23} J/k$

I_{ph} : le courant photonique

I_s : le courant de saturation

II.2.4.3 Point de fonctionnement optimum Pmax (Vmax , Imax)

Lorsque la puissance atteint la crête, elle est maximale, cela se produit en plein soleil, pour un maximum de radiation. [8]

$$P_{max} = V_{max} * I_{max} = V_{co} * I_{cc} \quad (\text{II-2})$$

II.2.4.4 Facteur de forme FF

Un paramètre important est souvent déduit à partir de la caractéristique (I, V) pour qualifier la qualité d'une cellule ou d'un générateur PV : c'est le facteur de remplissage ou *fill factor* (FF). Ce coefficient représente le rapport entre la puissance maximale que peut délivrer la cellule notée P_{max} et la puissance formée par le rectangle de la caractéristique idéale $I_{cc} \cdot V_{oc}$. Plus la valeur de ce facteur tend vers l'unité, plus la puissance exploitable tend vers la puissance maximale idéale. Les meilleures cellules sont celles qui font l'objet de compromis technologiques de tel sorte à approximer au mieux la caractéristique idéale. Ce facteur est défini par la relation suivante [8]:

$$FF = \frac{P_{max}}{V_{co} \cdot I_{cc}} \quad (\text{II-3})$$

II.2.4.5 Le rendement

Le rendement, η des cellules PV désigne le rendement de conversion en énergie. Il est défini comme étant le rapport entre la puissance maximale délivrée par la cellule et la puissance lumineuse incidente, P_{in} .

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{in}} = \frac{FF \cdot I_{cc} \cdot V_{co}}{P_{in}} \quad (\text{II-4})$$

Ce rendement peut être amélioré en augmentant le facteur de forme, le courant de court-circuit et la tension à circuit ouvert. Le rendement de conversion est un paramètre essentiel. En effet, la seule connaissance de sa valeur permet d'évaluer les performances de la cellule [8].

II.2.5 Association des cellules photovoltaïques

II.2.5.1 Association en série

Dans un groupement en série, les cellules sont traversées par le même courant et la caractéristique résultante du groupement en série est obtenue par addition des tensions à courant donné. [10]

$$V_{co} = n_s \cdot V_{co} \quad (\text{II-5})$$

La figure (II-5) montre la caractéristique résultante obtenue en associant en série n_s cellules identiques.

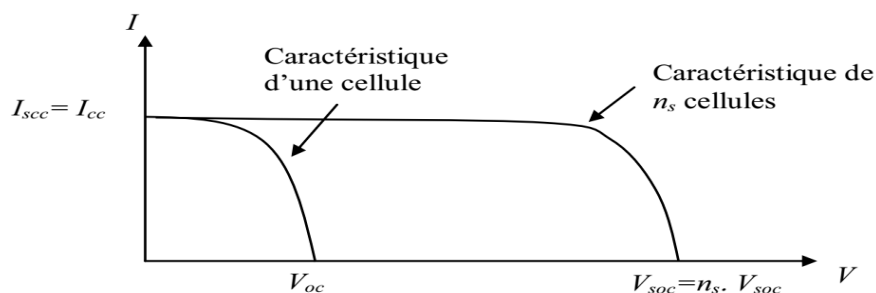


Figure (II. 5) : Caractéristique résultante d'un groupement en série de n_s cellules identiques[10]

II.2.5.2 Association en parallèle

Les propriétés du groupement en parallèle des cellules sont duales de celles du groupement en série. Ainsi, dans un groupement de cellules connectées en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et la caractéristique résultante de groupement est obtenue par addition des courants à tension donnée. [10]

$$I_{cc} = n_p \cdot I_{cc} \quad (\text{II-6})$$

La figure (II-6), montre la caractéristique résultante obtenue en associant en parallèles n_p cellules identiques.

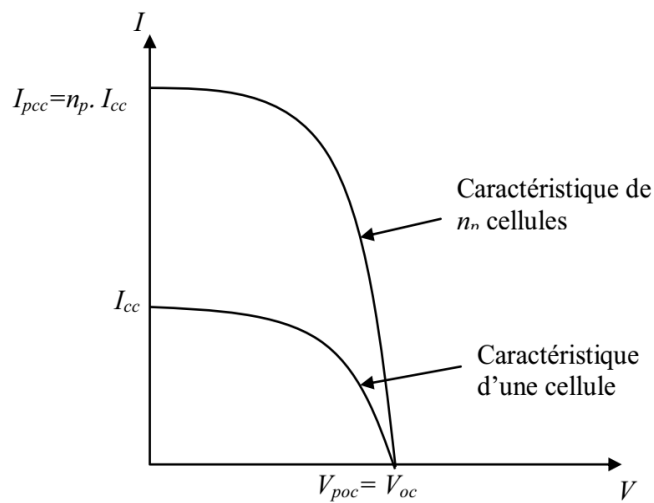


Figure (II. 6) : Caractéristique résultante d'un groupement en parallèle de n_p cellules identiques[10]

II.3 Modélisation de la cellule photovoltaïque

II.3.1 Modèles électriques de la cellule PV

La modélisation d'une cellule photovoltaïque peut être effectuée selon différents niveaux de complexité. Il s'agit d'obtenir un circuit électrique équivalent de la cellule photovoltaïque. Il en existe plusieurs :

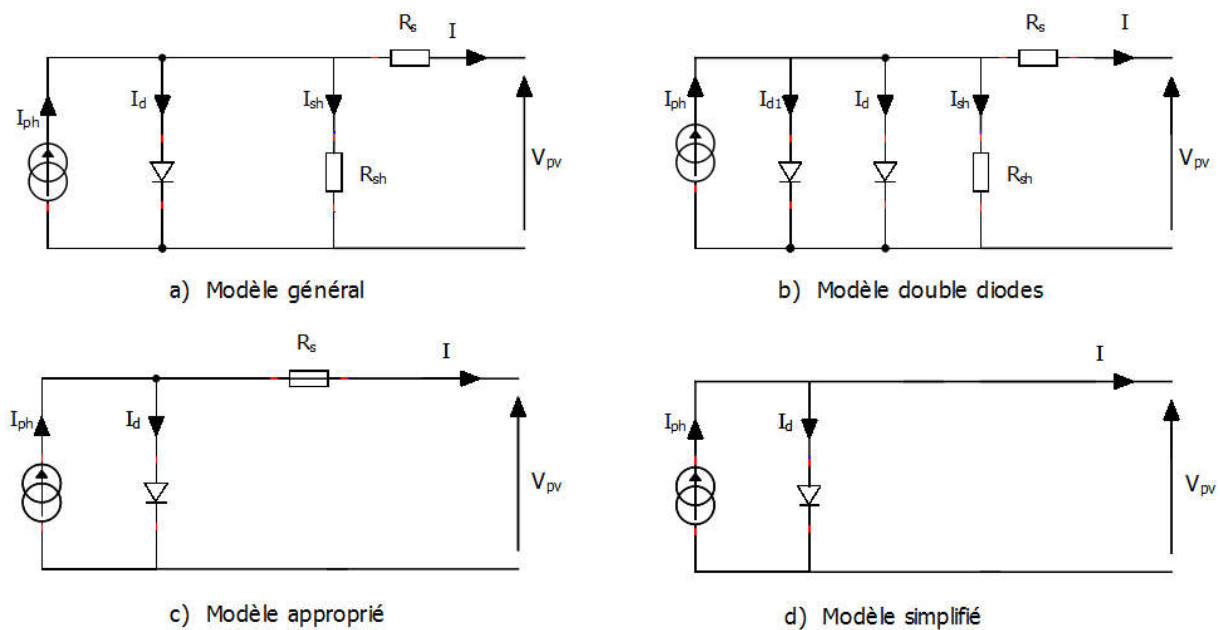


Figure (II. 7) : Modèles électriques de la cellule PV

II.3.2 Modèles mathématique de la cellule PV

Le schéma équivalent de la cellule photovoltaïque idéale comprend un générateur de courant qui modélise l'éclairement et une diode en parallèle qui modélise la jonction PN, Figure(II-8).

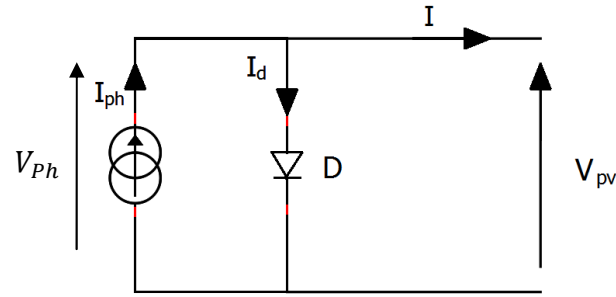


Figure (II. 8) : Schéma équivalent simple d'une cellule photovoltaïque

L'application de la loi de Kirchhoff et de l'expression du courant de la diode mène à l'expression mathématique de ce modèle (II-6)

$$I_{pv} = I_{ph} - I_d \quad (\text{II-7})$$

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

$$I_d = I_s \left(\exp\left(\frac{V_d}{V_t}\right) - 1 \right) \quad (\text{II-8})$$

Le courant débité équivaut à :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_s \left(\exp\left(\frac{V_{pv}}{V_t \cdot n}\right) - 1 \right) \quad (\text{II-9})$$

Le courant de saturation de la diode est supposé variable avec la température selon l'expression (II-7):

$$I_s = I_{s_ref} \cdot \left(\frac{T_c}{T_{c_ref}}\right)^3 \exp\left(\left(\frac{q \cdot E_{gap}}{n \cdot K}\right) \cdot \left(\frac{1}{T_{c_ref}}\right) - \left(\frac{1}{T_c}\right)\right) \quad (\text{II-10})$$

Avec :

I_{pv} : courant fourni par la cellule PV

I_{ph} : courant photo-généré

I_d : courant traversant la diode

I_s : courant de saturation de la diode dépendant de la température

V_{PV} : tension de sortie

V_{ph} : tension délivrée par la cellule PV

T : température de la cellule en K

k : constante de Boltzmann ($k=1.38.10^{-23}j/K$)

q : la constante de charge élémentaire ($q = 1.6.10^{-19} C$)

I_{ph_ref} : le courant photonique sous condition de référence

T_c, T_{c_ref} : la température de cellule, réelle et à la condition de référence

En polarisant électriquement une jonction PN classique à base de Si (Silicium), on obtient les caractéristiques électriques d'une diode. Figure (II.9) La particularité du (Si) est que : lorsque la jonction PN est éclairée, un courant proportionnel à l'éclairement apparaît. C'est cette particularité qui est employée dans les générateurs solaires photovoltaïques. [10]

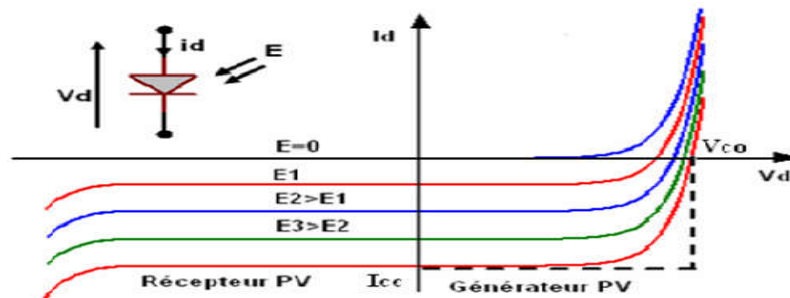


Figure (II. 9) : Caractéristique (I, V) d'une cellule PV sous différents éclairements E_i [10]

Comme nous pouvons le remarquer sur la caractéristique de la Figure (II-9)

- Si $V < 0$, la jonction se comporte en photorécepteur.
- Si $V_{co} > V > 0$, elle fonctionne comme un générateur avec un courant de court-circuit I_{CC} proportionnel à l'éclairement.

Les deux modèles mathématiques les plus utilisés sont le modèle à une diode et le modèle à deux diodes, parmi lesquels nous avons choisi celui d'une seule diode.

II.3.3 Etude du modèle à une seule diode (5 paramètres L5P)

Le modèle fait intervenir les cinq paramètres inconnus suivants: n , I_{ph} , R_s , R_{sh} et I_s . Il est connu sous le nom L5P (Lumped, 1 Mechanism, Parameters).

Ce modèle est désigné aussi par Rp-Model. Il tient compte non seulement des pertes en tension exprimée par la résistance série R_s mais aussi des fuites de courants exprimées par une résistance parallèle R_{sh} . C'est le modèle sur lequel s'appuient les constructeurs en donnant les caractéristiques techniques de leurs cellules solaires (data sheet). Il est aussi considéré satisfaisant et même une référence pour les constructeurs pour cataloguer typiquement les modules solaires[11].

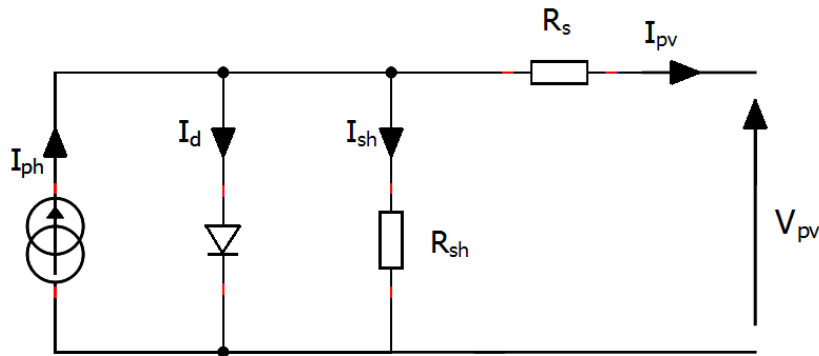


Figure (II. 10) : Schéma équivalent d'un modèle à une diode (L5p) de la cellule

L'équation caractéristique est déduite d'une manière directe à partir de la loi de Kirchhoff:

$$I_{pv} = I_{ph} - I_d - I_{sh} \quad (\text{II-11})$$

L'expression résultante correspondant à une caractéristique courant-tension pour une température et un éclairement donné s'exprime comme suit :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_s \left(\exp\left(\frac{V_{pv} + I_{pv} \cdot R_s}{V_t \cdot n}\right) - 1 \right) - \left(\frac{V_{pv} + I_{pv} \cdot R_s}{R_{sh}} \right) \quad (\text{II-12})$$

Avec ;

R_{sh} : Résistance parallèle (shunt)

R_s : $R_{V_t} = \frac{KT_c}{q}$: Résistance série représentant le potentiel thermodynamique

T_c : la température absolue

II.4 Simulation du modèle choisi(L5P)

Une fois le modèle mathématique établi, un programme sous Matlab/Simulink a été réalisé pour simuler notre panneau photovoltaïque. La figure (II.11) illustre le modèle de simulation.

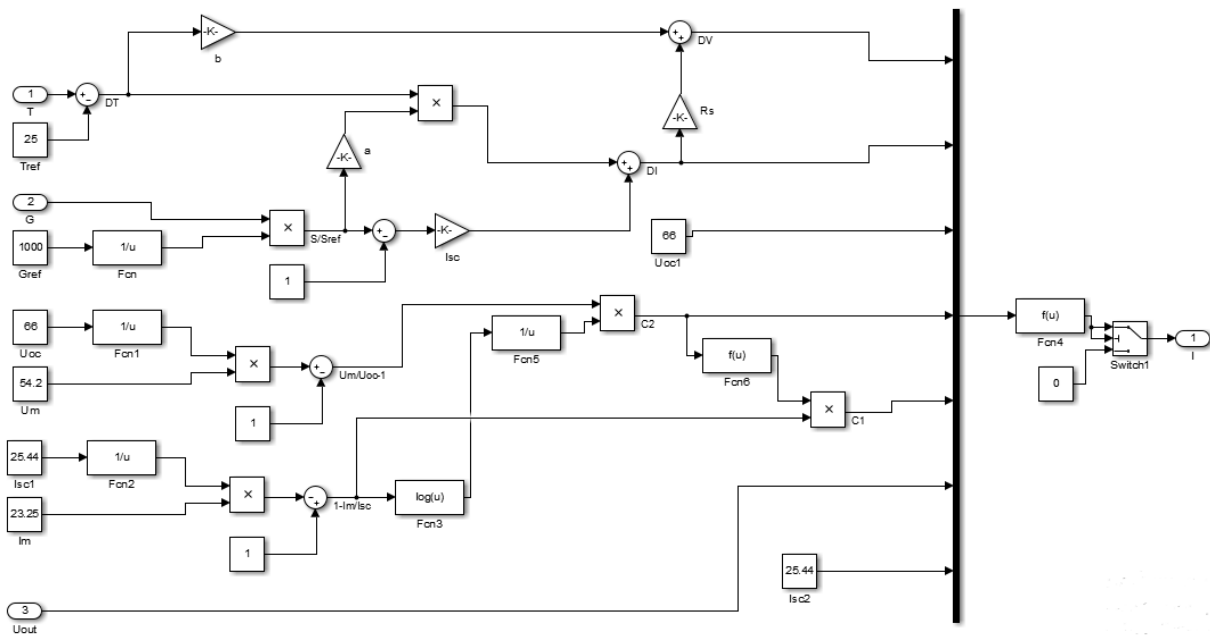


Figure (II. 11) : Schéma de générateur PV en MATLAB-SIMULINK

Les caractéristiques électriques de ce module photovoltaïque sont données dans le tableau suivant :

| | |
|---|----------------------|
| éclairage standard, G | 1000W/m ² |
| Température standard, T | 25°C |
| Puissance maximale P_{max} | 60W |
| Tension à P_{max} ou tension optimale (V_{opt}) | 17.1 V |
| Courant à P_{max} ou courant optimal (I_{opt}) | 3.5 A |
| Courant de court-circuit I_{sc} | 3.8A |
| Tension à circuit ouvert V_{CO} | 21.1 V |
| Nombre des cellules en séries | 36 |
| Energie de la bande interdite | 1.12ev |
| Coefficient de température de I_{sc} | 65 mA/ °C |
| Coefficient de température de V_{CO} | -80mV/ °C |
| Coefficient de température de puissance | (0.5±0.05)% /°C |
| Courant de saturation I_{sat} | 20 nA |

Tableau (II-1) : caractéristiques électriques du module photovoltaïque panneau MSX60
Dans les conditions standards «CST». [9]

Dans ce cas, on a choisi un modèle simple ne nécessitant que les paramètres donnés par le fabricant. [9]

II.4.1 Résultat de Simulation

La figure (II-12) représente la caractéristique courant-tension $I(V)$ et puissance-tension $P(V)$

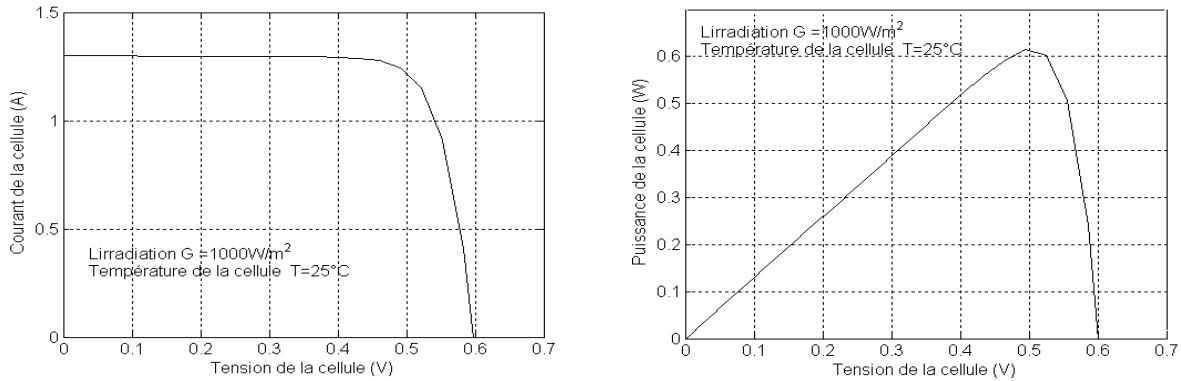


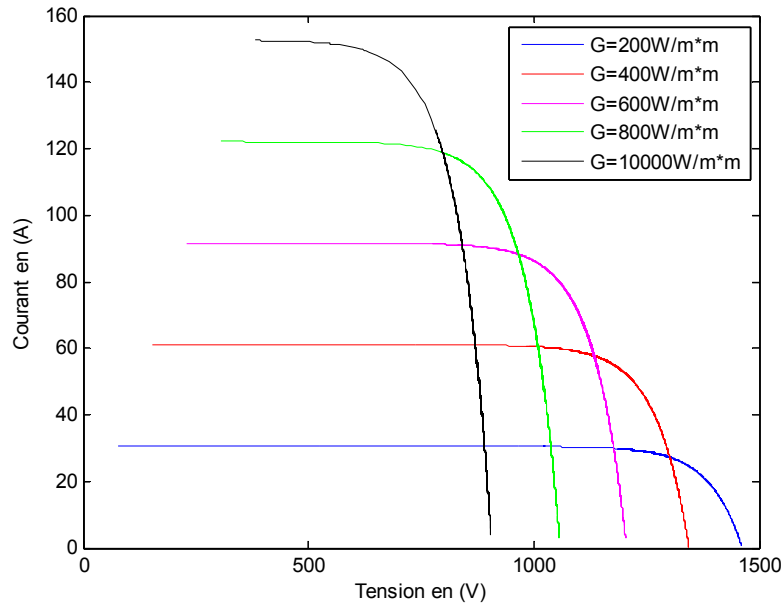
Figure (II. 12) : Caractéristique $I(V)$ et $P(V)$ d'une cellule photovoltaïque, L5P.

II. 4.1.1 Influence de l'éclairement et la température sur les courbes $I=f(V)$ et $P=f(V)$

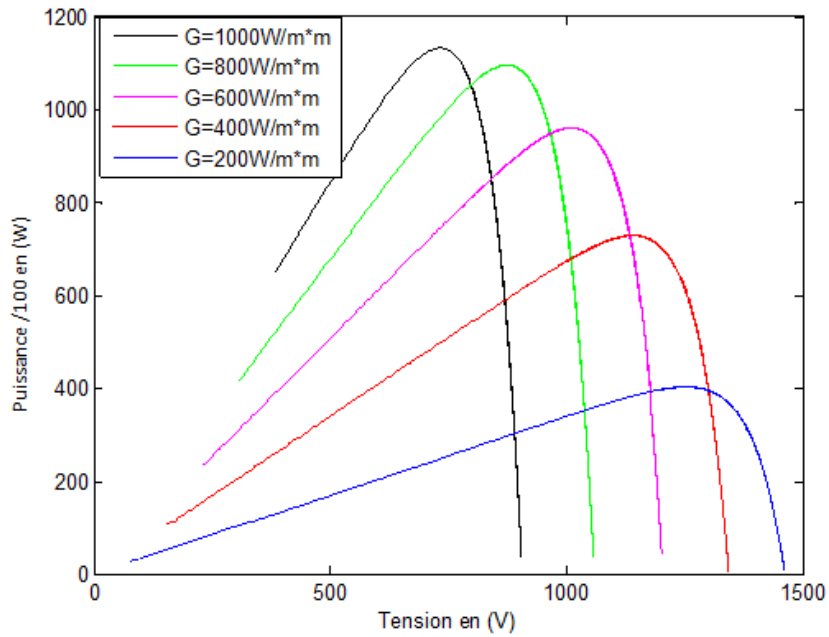
La figure (II.13-a), montre l'influence de l'éclairement sur la caractéristique $I=f(V)$. A une température constante, on constate que le courant subit une variation importante, mais par contre la tension varie légèrement. Car le courant de court-circuit est une fonction linéaire de l'éclairement alors que la tension de circuit ouvert est une fonction logarithmique

La figure (II.13-b), illustre la variation de la puissance délivrée par le générateur en fonction de la tension pour différentes valeurs d'éclairement, ce qui nous permet de déduire l'influence de l'éclairement sur la caractéristique $P(V)$.

Pour alimenter un laboratoire tel que celui d' électronique de puissance en alimentation autonome , 90 panneaux sont nécessaires disposés en matrice de [15X6] , [12].



(a)



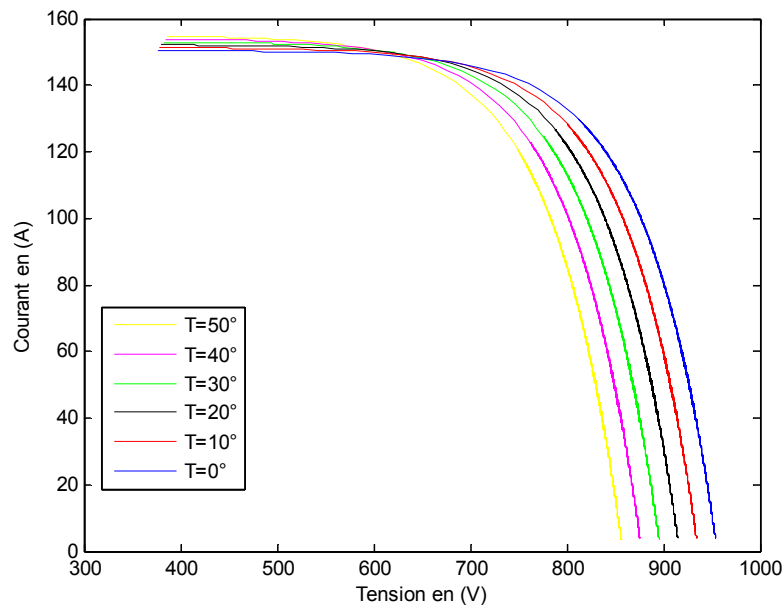
(b)

Figure (II. 13) : L'influence de l'éclairement sur les caractéristiques

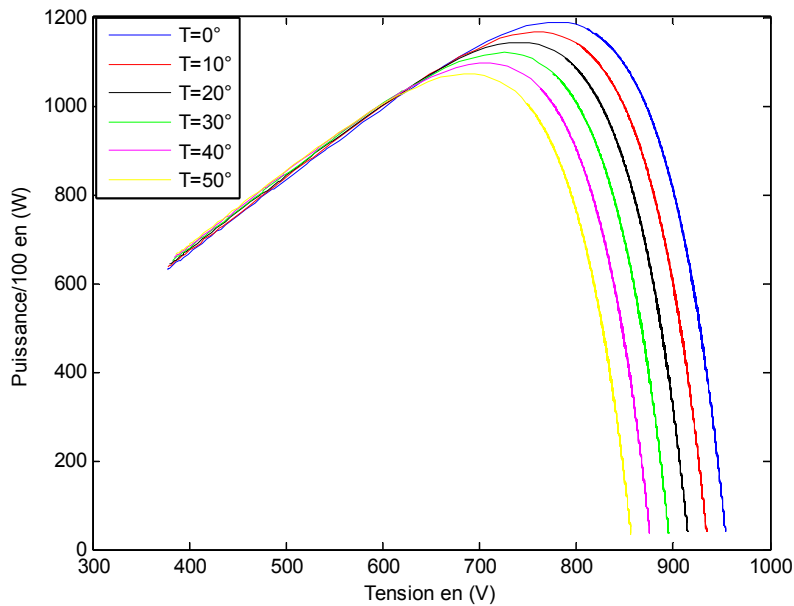
$I=f(V)$ (a) et $P=f(V)$ (b)

La figure (II-14-a), montre l'influence de la température sur la caractéristique $I=f(V)$. Il est essentiel de comprendre l'effet de changement de la température d'une cellule solaire sur la caractéristique $I=f(V)$. Le courant dépend de la température puisque le courant augmente légèrement à mesure que la température augmente, mais la température influe négativement sur la tension de circuit ouvert. Quand la température augmente la tension de circuit ouvert diminue. Par conséquent la puissance maximale du générateur subit une diminution.

La figure (II.14-b) illustre la variation de la puissance délivrée par le générateur en fonction de la tension pour différentes valeurs de la température, ce qui nous permet de déduire l'influence de la température sur la caractéristique $P=f(V)$.



(a)



(b)

Figure (II. 14) : L'influence de la température sur les caractéristiques

$I=f(V)$ (a) et $P=f(V)$ (b)

II.5 Générateur photovoltaïque

La cellule PV fait à peu près 150 cm^2 , produit 2,3 Watt-crête (Wc) sous approximativement 0,5V. Cette faible puissance est généralement insuffisante pour la majorité des applications PV domestiques ou industrielles. Afin de fournir au récepteur extérieur une tension et une puissance adéquate, plusieurs cellules PV doivent être connectées entre elles en série, pour former ce qu'on appelle : « un module ». Les modules peuvent être assemblés en série et/ou en parallèle pour former des panneaux (Générateur), eux-mêmes interconnectés pour former un champ PV [10].

II.6 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté des caractéristiques électriques fondamentales d'une cellule photovoltaïque (module photovoltaïque) et les circuits équivalents ont été décrits. Ainsi nous avons présenté les différents modèles électriques caractérisant les cellules photovoltaïques, comme tous les systèmes physiques, la modélisation d'un système photovoltaïque conduit à l'établissement des équations mathématiques régissant la dynamique de ce dernier, d'où un modèle est la représentation mathématique d'une entité réelle et de son fonctionnement : quand on dispose d'un modèle, on peut simuler le comportement de cette entité. L'objectif de ce chapitre consiste donc à obtenir par simulation, les caractéristiques électriques et le comportement d'un système photovoltaïque en utilisant l'environnement de simulation Matlab .

Chapitre III

Etude et simulation du hacheur Buck/Boost

III.1 Introduction :

Dans le chapitre précédent, nous avons observé que les caractéristiques d'un module solaire montrent que la puissance maximale générée dépend fortement de l'intensité des radiations solaires ainsi que de la température. En plus de ces dépendances, le module solaire ne peut générer sa puissance maximale que pour une valeur de la tension et du courant de fonctionnement, la position de ce point de fonctionnement dépendant à son tour de l'ensoleillement, de la température ainsi de la charge.

Un panneau photovoltaïque est une source d'énergie, en fonction de sa zone de fonctionnement dans le plan (V-I) il peut se comporter soit comme une source de tension soit comme une source de courant. Et il fonctionne dans le quadrant deux (QII) donc comme générateur non réversible en courant et en tension.

Afin de prévoir le comportement d'une station photovoltaïque dans de vraies conditions de fonctionnement, une solution rentable peut être envisagée, cette dernière consiste en l'utilisation d'un émulateur PV au lieu d'un vrai panneau solaire. Dans la suite de ce chapitre nous allons modéliser et simuler un hacheur à accumulation inductive qui va compléter ensuite avec le modèle du panneau, servira comme émulateur d'une station. [13]

III.2 Convertisseur statique :

En fonction des caractéristiques des sources et charges, un convertisseur statique peut prendre plusieurs configurations.

Si les sources entre lesquels il est inséré sont de natures différentes, on parle de liaison directe, par contre si elles sont de même natures, il faut impérativement passer par une liaison indirecte.

Dans le cas d'un émulateur photovoltaïque la sortie doit être continue, donc comme la source ne peut être autre chose que le réseau, la première solution qui vient à notre esprit, est un montage redresseur. Toutefois les régulations pour suivre le fonctionnement d'un panneau sera problématique à cause des éléments passifs que cette structure utilisera.

La seconde solution sera l'utilisation des convertisseurs de type DC-DC car cela nous permet un hachage à haute fréquence, donc une réduction du volume des éléments passifs à utiliser, par conséquent un coût plus abordable, et une meilleure gestion du suivi de référence.

Parmi les solutions envisageables, et à cause de la caractéristique d'un panneau photovoltaïque, les cas les plus classiques de hacheur pouvant être utilisé comme émulateur sont les hacheurs à un quadrant qu'il soit à liaison directe ou indirecte. Parmi lesquels on peut citer :

- Hacheur série dit buck ou abaisseur
- Hacheur parallèle dit boost ou élévateur

Se sont les structures les plus utilisées dans la littérature comme émulateur photovoltaïque.

La solution qui nous semble intéressante pour différentes raisons, réside dans l'utilisation du hacheur à accumulation inductive.

III.3 Hacheur non réversible à liaison indirecte :

III.3.1 Généralités :

Les alimentations à découpage indirect ne sont guères utilisées en moyenne et en forte puissance. Leur domaine d'application quasi exclusif est celui des alimentations à découpage de faible puissance fonctionnant à des fréquences ultrasonores. Par conséquent, nous nous limiterons à l'étude de l'alimentation à découpage à stockage inductif [14].

III.3.2 Hacheur à stockage inductif :

Un hacheur à stockage inductif est un convertisseur statique d'énergie unidirectionnelle fonctionnant dans le quadrant QI, il contrôle le transfert d'énergie entre deux sources de même nature (tension-tension), comme deux sources de même nature ne doivent jamais être mise bornes à bornes, un élément de stockage intermédiaire est nécessaire. Ainsi, la nécessité d'une inductance.

La principale contrainte concernant la fréquence de commutation est liée à l'ondulation du courant dans l'inductance de stockage L. Cette alimentation (Buck-Boost converter ou step-down/up converter) [13].

Le schéma de principe du hacheur à accumulation inductive est le suivant :

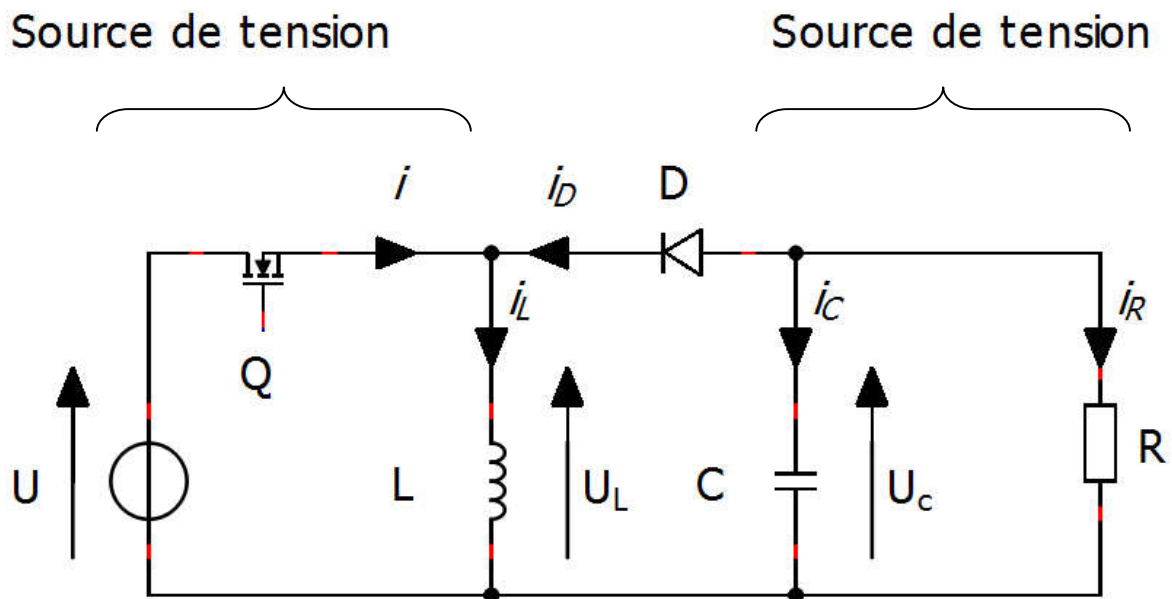


Figure (III. 1) : Représentation schématique d'une alimentation à stockage inductif

III.3.2 .1 Principe de fonctionnement :

Le principe de transfert d'énergie a lieu comme le montre la figure (III-2). C'est à dire que dans un premier temps on récupère l'énergie nécessaire pour la charge, et on la stocke dans l'inductance, ensuite dans un second temps on la restitue pour la transmettre au récepteur.

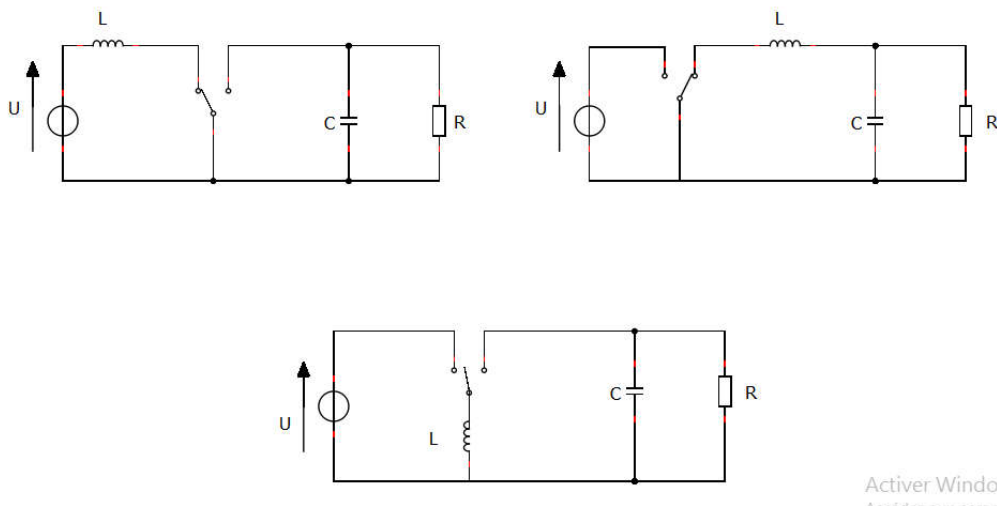


Figure (III. 2) : Combinaison des alimentations [14]

Les interrupteurs sont ouverts et fermés alternativement avec une fréquence de commutation modulée de telles sortes à ce que la tension de sortie est capable de suivre n'importe quel profil de référence. Tant que le transistor est amorcé, la diode est éteinte, la tension d'entrée, est directement appliquée aux bornes de l'inductance L , ainsi le courant dans l'inductance est de forme linéaire avec une pente positive. Dans cette phase, la charge reçoit son énergie du condensateur. Lorsque le transistor est éteint, la charge est alimentée par le filtre LC via la diode. La sortie qui en résulte est une tension régulée de grandeur inférieure ou supérieure à la tension d'entrée, en fonction de la valeur du rapport cyclique α , mais avec une polarité inverse. Le convertisseur sera analysé en fonction de l'état *ON* ou *OFF* des interrupteurs [13].

III.3.3 Modélisation d'un convertisseur DC/DC (Hacheur buck-Boost) :

III.3.3.1 Structure :

Si la fréquence est suffisamment élevée, l'ondulation de la tension aux bornes du condensateur sera faible, donc la tension à ces bornes peut être assimilée à une f.e.m E' .

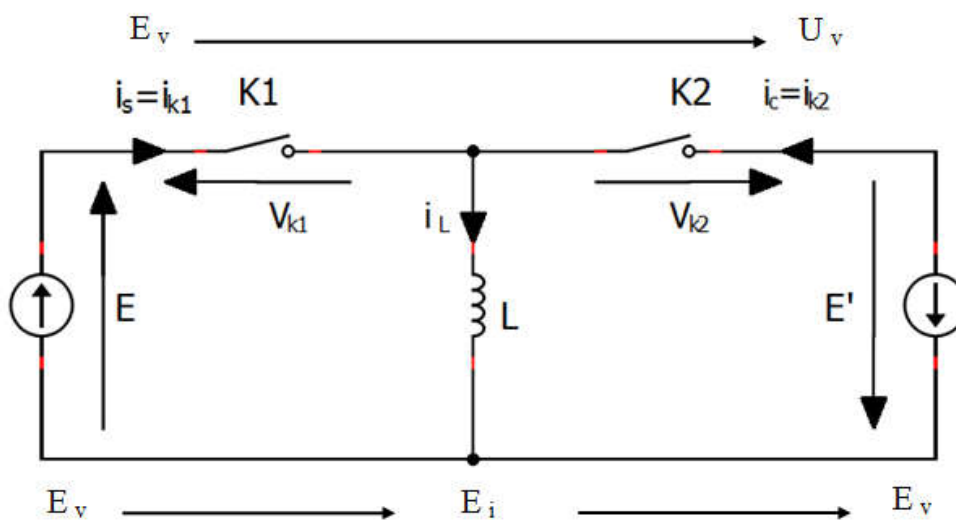


Figure (III. 3) : Structure d'un hacheur à accumulation inductive

| K ₁ fermé et K ₂ ouvert | K ₂ fermé et K ₁ ouvert |
|--|--|
| $\begin{cases} V_{k1} = 0 \\ i_{k1} = i_L \end{cases} \quad \text{(III-2)}$ | $\begin{cases} V_{k1} = + (E + E') \\ i_{k1} = 0 \end{cases} \quad \text{(III-4)}$ |
| $\begin{cases} V_{k2} = - (E + E') \\ i_{k2} = 0 \end{cases} \quad \text{(III-3)}$ | $\begin{cases} V_{k2} = 0 \\ i_{k2} = i_L \end{cases} \quad \text{(III-5)}$ |

Il faut que K₂ soit une diode « D » et K₁ un semi-conducteur à fermeture et ouverture commandées « H ».

On arrive ainsi au schéma et aux formes d'ondes de la figure (III.3). Ces dernières ont été tracées en tenant compte d'une valeur donnée de l'inductance L.

| Pour $0 < t < \alpha T$, H conduit, D bloqué | Pour $\alpha T < t < T$, D conduit, H bloqué |
|---|---|
| $\begin{cases} i_s = i_H = i_L \\ i_c = 0 \\ V_D = - (E + E') \end{cases} \quad \text{(III-6)}$ | $\begin{cases} i_L = i_c = i_D \\ i_s = 0 \\ V_H = + (E + E') \end{cases} \quad \text{(III-7)}$ |

En régime établi, le courant « i_L » a la même valeur moyenne « I_L » pendant les deux intervalles. D'où les valeurs moyennes « I_s » et « I_c » des courants d'entrée et de sortie:

$$I_s = \alpha I_L, I_c = (1 - \alpha) I_L \quad \text{(III-8)}$$

Puisque « E.I_s = E'.I_c », la relation liant les grandeurs de sortie et d'entrée est :

$$\frac{E'}{E} = \frac{I_s}{I_c} = \frac{\alpha}{(1 - \alpha)} \quad \text{(III-9)}$$

9)

En faisant varier α de zéro à 1; on peut théoriquement faire varier ces rapports de zéro à l'infini.

Si le rapport cyclique $\alpha < 0,5$: *abaisseur*

Si le rapport cyclique $\alpha > 0,5$: *élévateur*

La Figure (III-4) donne les formes d'ondes des principales grandeurs dans les conditions normales de fonctionnement, c'est-à-dire quand le courant I_L diffère de zéro tout au long de la période de hachage ou quand on est en conduction continue.

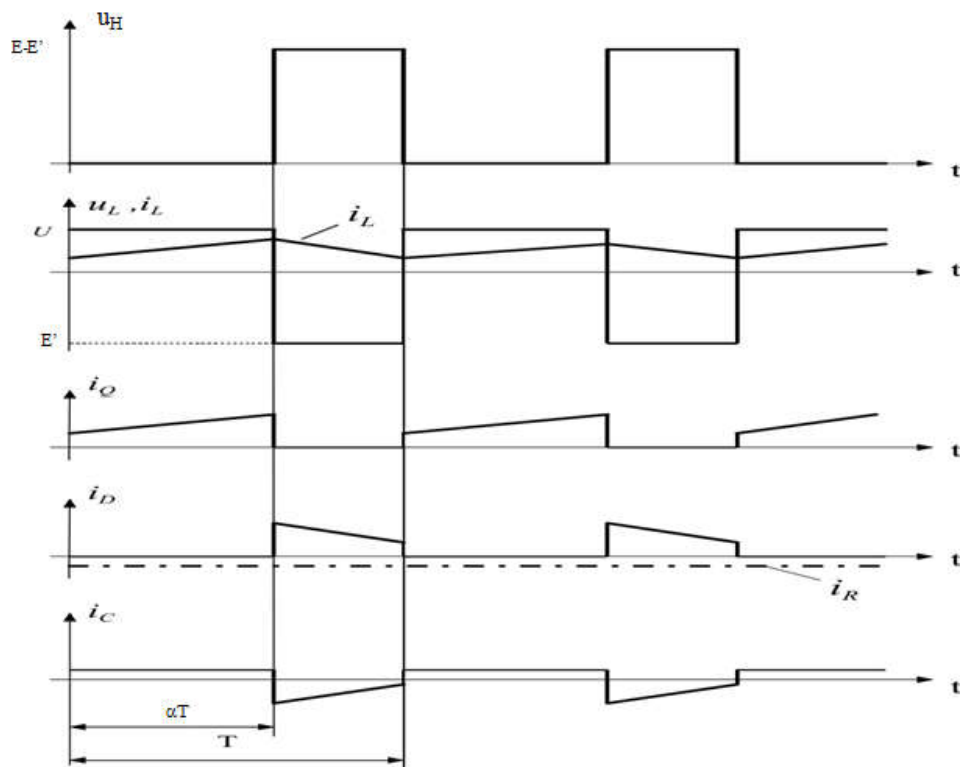


Figure (III. 4) : Forme d'onde aux bornes des différents éléments du hacheur [13]

Puisque $V_{L\text{moy}}=0$

$$\alpha TE = (1 - \alpha)T.E' \quad \Rightarrow \quad E' = \frac{\alpha}{1 - \alpha} E \quad (\text{III-10})$$

Tous les résultats importants sont résumés sur le tableau suivant :

Relations générales en conduction continue [13]

| Etat ON $0 < t \leq \alpha T$; (Q conduit, D ouvert): | Etat OFF $\alpha T < t \leq T$; (Q ouvert, D conduit): |
|--|--|
| <i>Tension aux bornes de l'inductance</i> | |
| $U_L = U = L \cdot \frac{\Delta i_L}{\alpha T}$ | $U_L = U_C = L \cdot \frac{\Delta i_L}{T}$ |
| <i>Courant moyen dans le condensateur</i> | |
| $I_C = -I_R = -\frac{U_C}{R}$ | $I_C = -I_R - I_L = -\frac{U_C}{R} - I_L$ |
| <i>Courant moyen fourni par l'alimentation (courant moyen dans le transistor Q)</i> | |
| $I = I_L$ | $I = 0$ |
| <i>Courant moyen dans la diode</i> | |
| $I_{D=0}$ | $I_D = I_L$ |
| <i>Ondulation de courant parcourant l'inductance</i> | |
| $\Delta i_L^{[\alpha T]} = \frac{U_L^{[\alpha T]}}{L} \cdot \alpha T = \frac{U}{L} \cdot \alpha T$ | $\Delta i_L^{[(1-\alpha)T]} = \frac{U_L^{[(1-\alpha)T]}}{L} \cdot (1-\alpha)T = \frac{U_C}{L} \cdot (1-\alpha)T$ |
| <i>Valeurs moyennes pondérées</i> | |
| $\alpha \cdot U_L^{[\alpha T]} + (1-\alpha) \cdot U_L^{[(1-\alpha)T]} = \alpha \cdot (U) + (1-\alpha) \cdot U_C = 0$ | $U_C = -\frac{\alpha}{1-\alpha} \cdot U$ |
| $\alpha \cdot I_C^{[\alpha T]} + (1-\alpha) \cdot I_C^{[(1-\alpha)T]} = \alpha \cdot (-I_R) + (1-\alpha) \cdot (-I_R - I_L) = 0$ | $I_R = -(1-\alpha) \cdot I_L$ |
| $I = \alpha \cdot I^{[\alpha T]} + (1-\alpha) \cdot I^{[(1-\alpha)T]} = \alpha I_L$ | $I = \alpha \cdot I_L$ |
| $I_D = \alpha I_D^{\alpha T} + (1-\alpha) \cdot I_D^{[\alpha T]} = (1-\alpha) \cdot I_L$ | $I_D = (1-\alpha) \cdot I_L$ |

III.3.4 Ondulation du courant i_L et de la tension U_C (Choix de L et de C) :

III.3.4.1 Ondulation du courant i_L et choix de L :

La relation (III-11) donne l'ondulation de courant dans l'inductance en conduction continue et en fonction du rapport cyclique α [14]:

$$\Delta I_L = i_{LMAX} - i_{LMIN} = \frac{U \cdot T_p}{L} \cdot \alpha \quad (\text{III-11})$$

Sachant que l'ondulation de courant est maximale pour $\alpha=1$, on peut écrire pour un courant d'ondulations maximum désirées [14]:

$$L \geq \frac{T_p \cdot U}{\Delta I_{Lmax}} \quad (\text{III-12})$$

III.3.4.2 Ondulation de la tension u_C et Choix de C :

L'ondulation de la tension de sortie (tension aux bornes du condensateur) peut être calculée en considérant que le courant I_R dans la charge est constant et égal au courant moyen dans la diode I_D . Il est donc possible de tracer la forme du courant i_C circulant dans le condensateur. La forme du courant circulant dans le condensateur et de la tension à ses bornes sont illustrés à la Figure (III-5).

En régime permanent, l'ondulation de tension aux bornes du condensateur vaut [14]:

$$\Delta U_C = \frac{\Delta Q}{C} = -\frac{I_R \cdot \alpha T}{C} = -\frac{U_C}{R} \cdot \frac{\alpha \cdot T_p}{C} \quad (\text{III-13})$$

L'ondulation relative découle directement de la relation précédente

$$\frac{\Delta U_C}{U_C} = -\frac{\alpha T_p}{R \cdot C} \quad (\text{III-14})$$

La situation est identique à celle de l'alimentation élévatrice de tension.

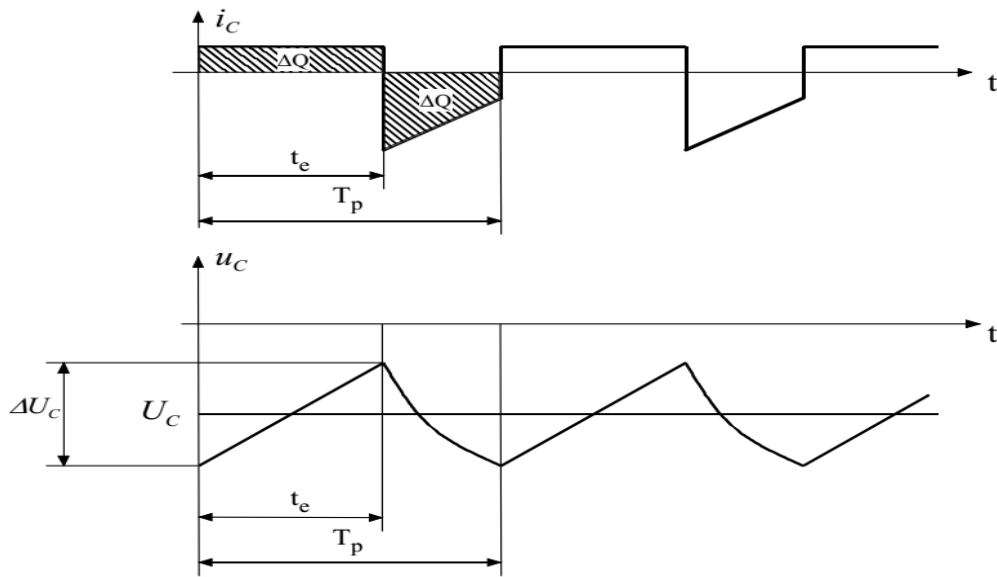


Figure (III. 5) : Ondulation de la tension de sortie [14]

III.3.5 Frontière entre le mode continu et intermittent :

Lorsque le courant moyen I_L dans l'inductance L est égal à la moitié de l'ondulation ΔI_L , on atteint la limite de la conduction continue. Le courant moyen limite dans l'inductance vaut

$$I_{L\ LIM} = \frac{1}{2} \cdot \Delta I_L = -\frac{1}{2} \cdot \frac{U_C \cdot T_p}{L} \cdot (1 - \alpha) \quad (\text{III-15})$$

De l'expression donnant la relation entre le courant moyen dans l'inductance et le courant de sortie (dans la charge), il est possible de calculer la valeur du courant moyen de sortie I_R à la limite de la conduction continue, soit [14] :

$$I_{R\ LIM} = -I_{L\ LIM} \cdot (1 - \alpha) = \frac{1}{2} \cdot \frac{U_C \cdot T_p}{L} \cdot (1 - \alpha)^2 \quad (\text{III-16})$$

III.3.6 Conduction discontinue :

La conduction est dite discontinue lorsque le courant s'annule dans l'inductance pendant le laps de temps où le transistor Q est ouvert [14].

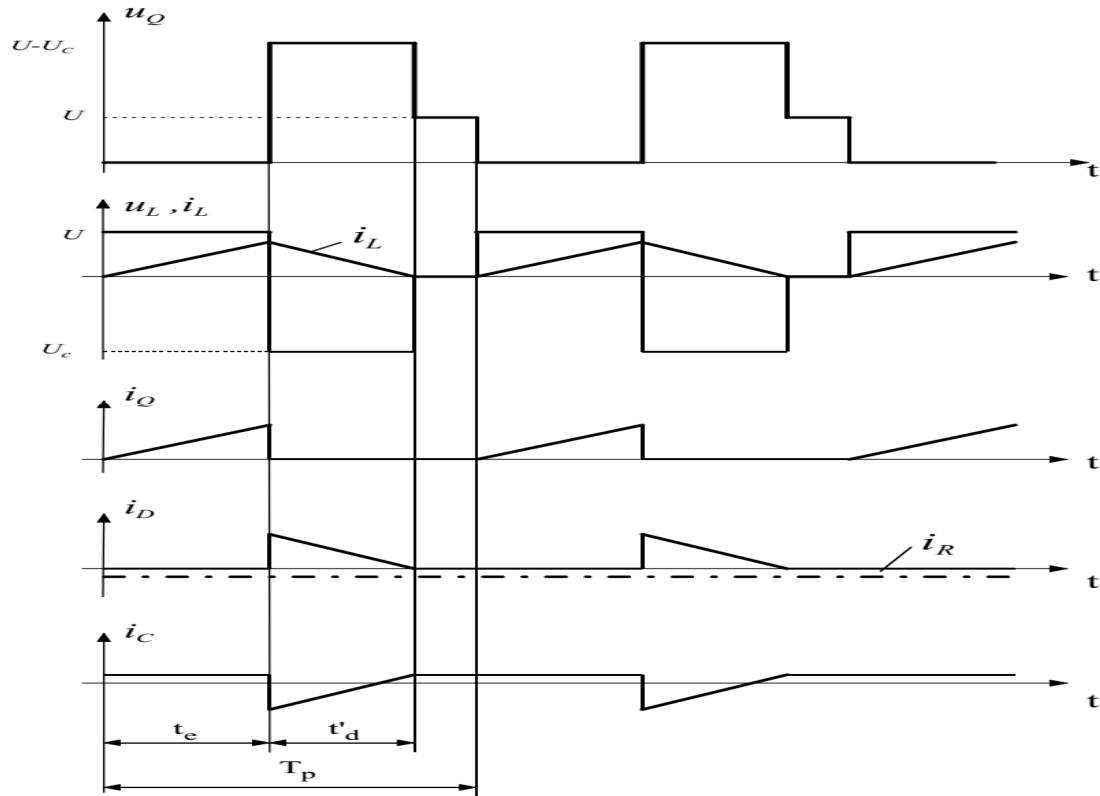


Figure (III. 6) : Conduction discontinue [14]

Comme pour le cas de la conduction continue, en régime permanent la tension moyenne aux bornes de l'inductance U_L est nulle [14]

$$U_L = U \cdot \frac{t_e}{T_P} + U_C \cdot \frac{t'_d}{T_P} = 0 \quad (\text{III-17})$$

et donc on obtient pour le temps d'extinction

$$t'_d = -\frac{U}{U_C} \cdot t_e \quad (\text{III-18})$$

Le courant moyen dans la charge peut être exprimé à l'aide de la relation suivante

$$I_R = -\frac{1}{T_P} \cdot \int_{t_e}^{T_P} i_L(t) \cdot dt = -\frac{1}{2} \cdot i_{L\text{MAX}} \cdot \frac{t_d}{T_P} \quad (\text{III-19})$$

Avec

$$i_{L\text{MAX}} = \frac{U}{L} \cdot t_e \quad (\text{III-20})$$

Et finalement [14]

$$I_R = -\frac{U}{2.L} \cdot \frac{t_d \cdot t_e}{T_P} = \frac{U_C \cdot T_P}{2.L} \cdot \alpha^2 \cdot \left[\frac{U}{U_C} \right]^2 \quad (\text{III-21})$$

III.3.6.1 Caractéristiques statiques avec tension de sortie :

Le courant moyen maximum dans l'inductance et à la sortie en fonction de U_C est obtenu lorsque $\alpha = 0$

$$I_{L\text{LIM}(\text{MAX})} = -I_{R\text{LIM}(\text{MAX})} = -\frac{U_C \cdot T_P}{2L} \quad (\text{III-22})$$

En terme de leur maximum, les courants à la limite de la condition continue s'expriment par les relations suivantes :

$$I_{L\text{LIM}} = (1 - \alpha) \cdot I_{L\text{LIM}(\text{MAX})} \quad (\text{III-23})$$

$$I_{R\text{LIM}} = (1 - \alpha)^2 \cdot I_{R\text{LIM}(\text{MAX})} \quad (\text{III-24})$$

Dans la plupart des applications utilisant des alimentations élévatrices de tension, la tension de U_C est maintenue constante . Par conséquent, avec U_C constante, on peut tracer les constantes I_{LLIM} et I_{RLIM} en fonction du rapport cyclique. La variation du rapport cyclique est en relation directe avec les variations de la tension d'entrée U . La Figure (III-7) montre donc les courants moyens correspondant à la limite de la conduction continue. Les courants moyens supérieurs aux courbes respectives de I_{LLIM} et I_{RLIM} pour I_L et I_R entraîne un fonctionnement en conduction continue alors que des valeurs inférieures correspondent à une conduction discontinue[14].

De la relation (III-13) on peut écrire :

$$I_R = I_{RLIM(MAX)} \cdot \left[\frac{U}{U_C} \right]^2 \cdot \alpha^2 \quad (\text{III-25})$$

Puis

$$\alpha = \frac{-U_C}{U} \cdot \sqrt{\frac{I_R}{I_{RLIM(MAX)}}} \quad (\text{III-26})$$

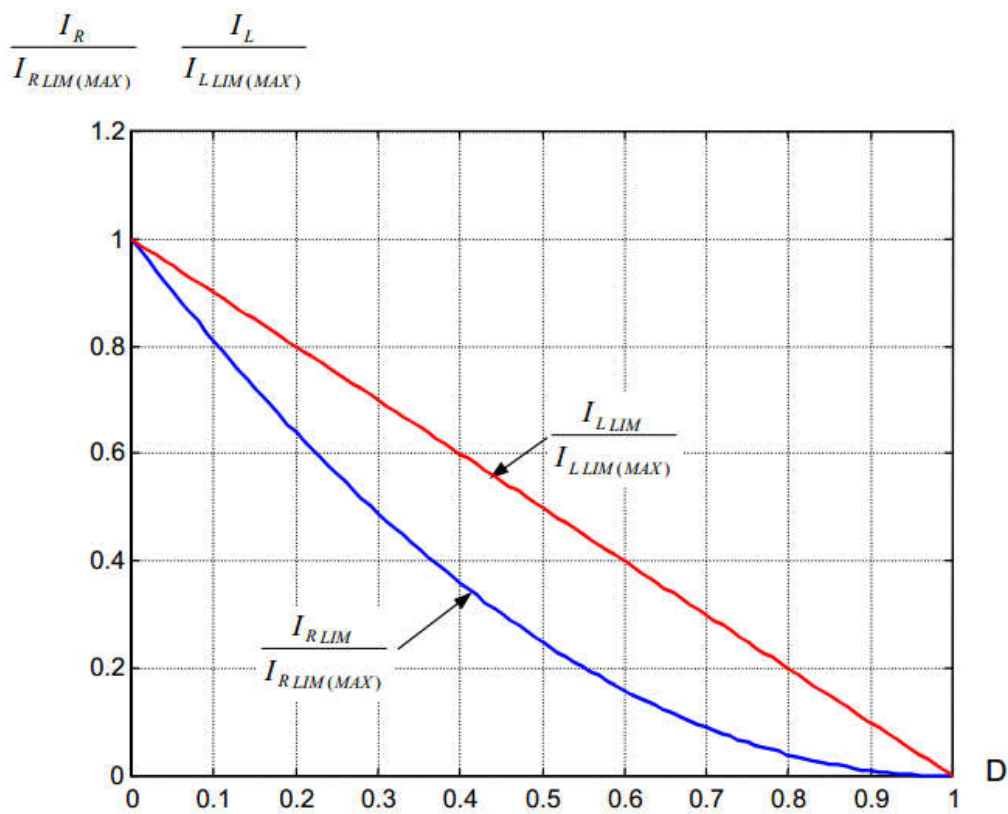


Figure (III. 7) : Courant moyen dans l'inductance et dans la charge correspondant à la limite de la conduction continue pour $U_C=Cte$ [14]

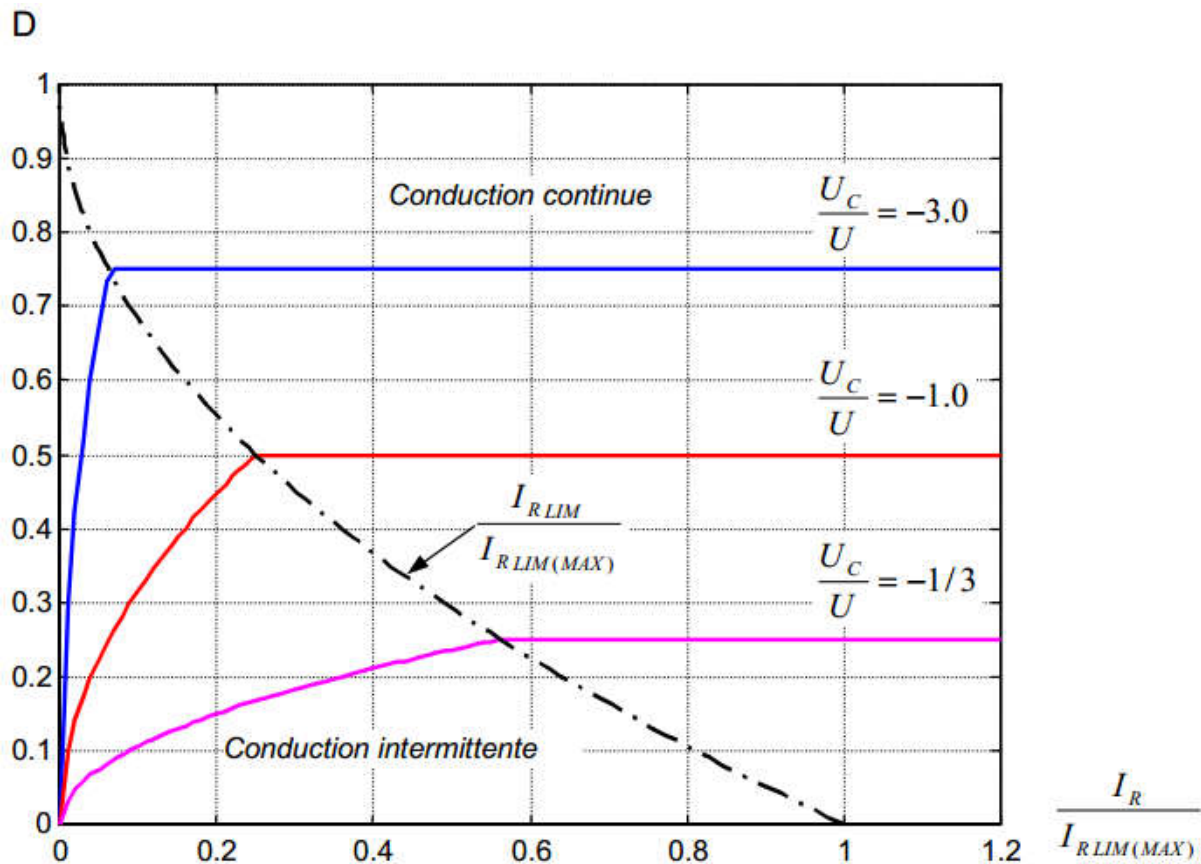


Figure (III. 8) : Caractéristiques statiques à tension d'entrée constante $U_c=Cte$ [14]

Comme pour les alimentations abaisseur et élévateur de tension, la tension de sortie est fortement dépendante de la charge pour un rapport cyclique α . Dans ce cas, c'est la boucle de réglage qui doit intervenir de manière efficace pour corriger le rapport cyclique [14].

III.3.7 Application d'une commande en boucle ouverte :

Cette commande appliquée sur le convertisseur a pour but de visualiser la tension de sortie du convertisseur lors de la variation du rapport cyclique α .

Le schéma de simulation du convertisseur sous environnement Matlab/Simulink du convertisseur Buck-Boost est comme suit :

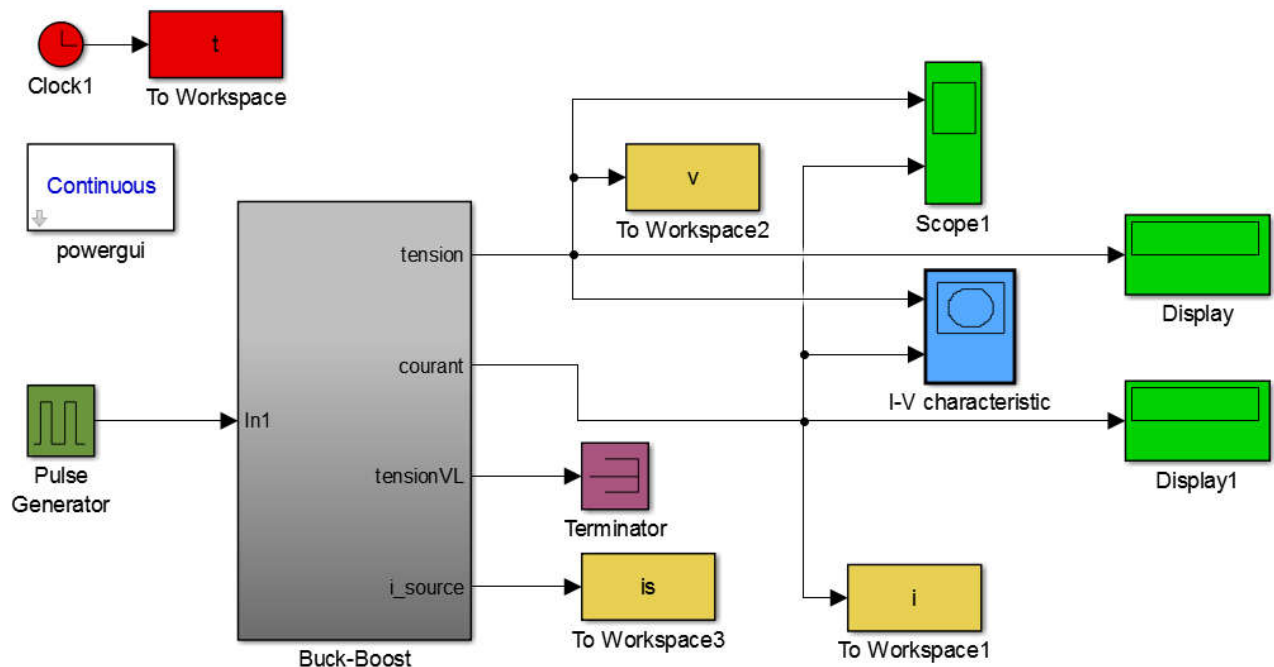


Figure (III. 9) : Schéma synoptique du Buck-Boost avec une commande en boucle ouverte

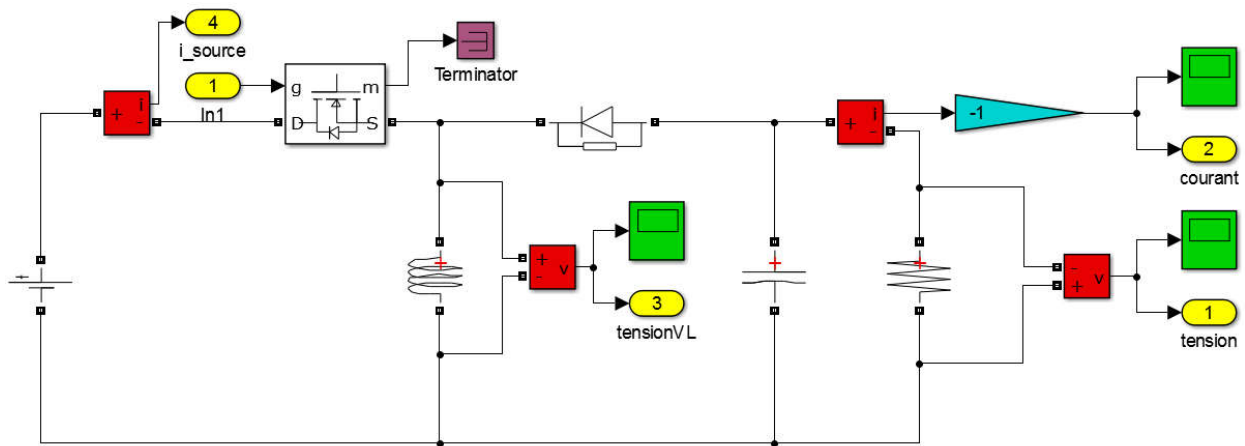


Figure (III. 10) : Schéma bloc du convertisseur Buck-Boost.

Les courbes de la figure (III.11) montre que la tension de sortie V_s varie en fonction de la valeur du rapport cyclique α .

Pour une tension d'entrée $V_{in}=500V$, $R = 10 \text{ Ohms}$, $L = 0.5 \text{ H}$ et $C = 0.0015 \text{ F}$ la tension de sortie sera comme suit :

Elle suit la loi de variation :

$$U_c = V_R = \frac{\alpha}{1 - \alpha} U$$

La fréquence de découpage dans cette application est de : 1 kHz

| A | 0.1 | 0.2 | 0.3 | 0.4 | 0.5 | 0.6 | 0.7 | 0.8 | 0.9 |
|-----------|-------|-----|--------|--------|-----|-----|---------|------|------|
| V_s (V) | 55,55 | 125 | 214,28 | 333,33 | 500 | 750 | 1166,66 | 2000 | 4500 |

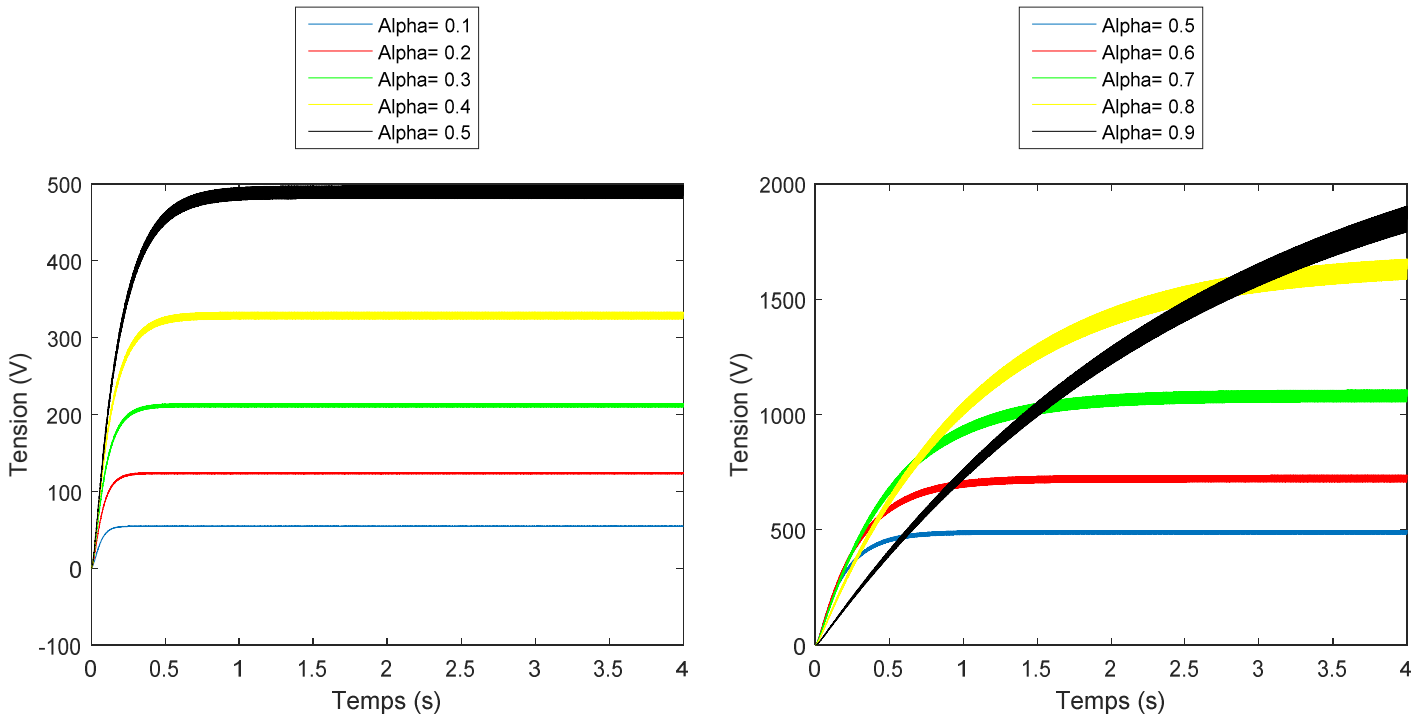


Figure (III. 11) : Résultat de simulation de la tension V_s .

Les courbes de la figure (III.12) montre que le courant de sortie I_s varie en fonction de la valeur du rapport cyclique α .

Pour une tension d'entrée $V_{in}=500V$ le courant de sortie sera comme suit :

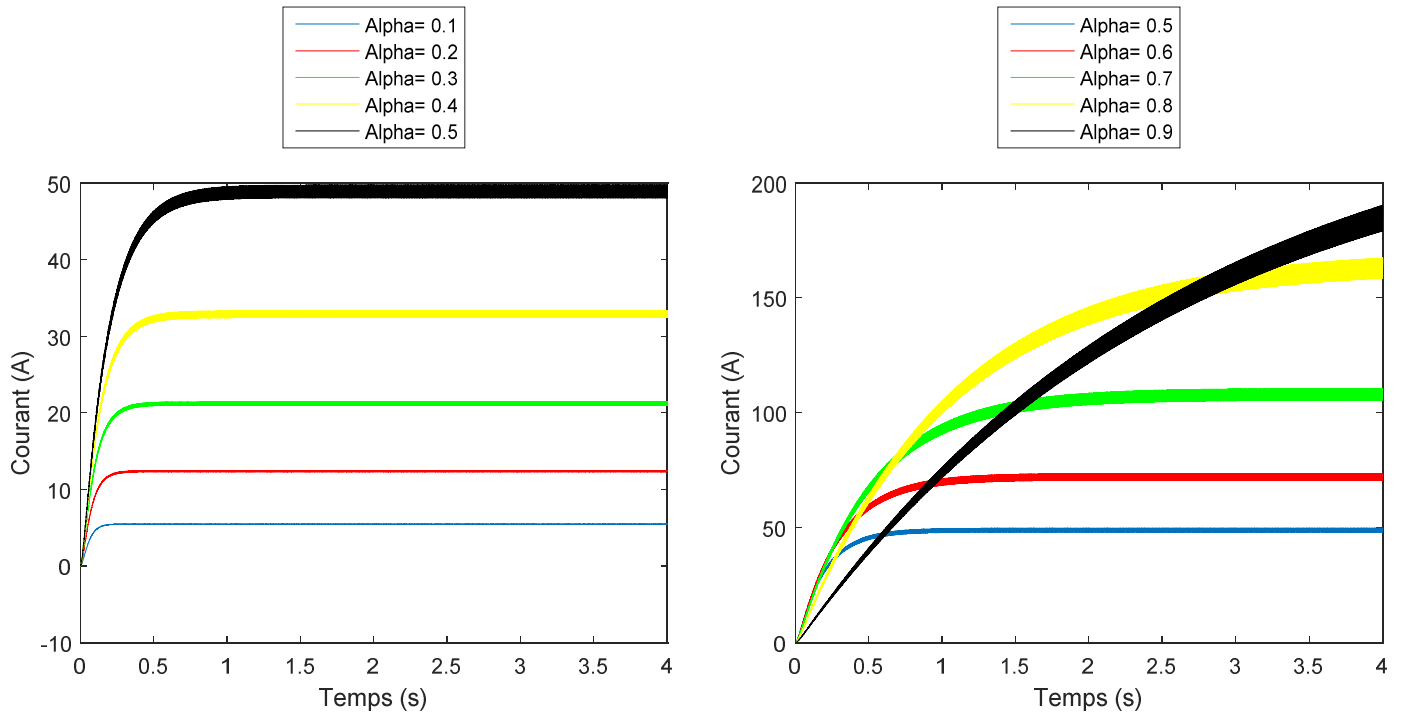
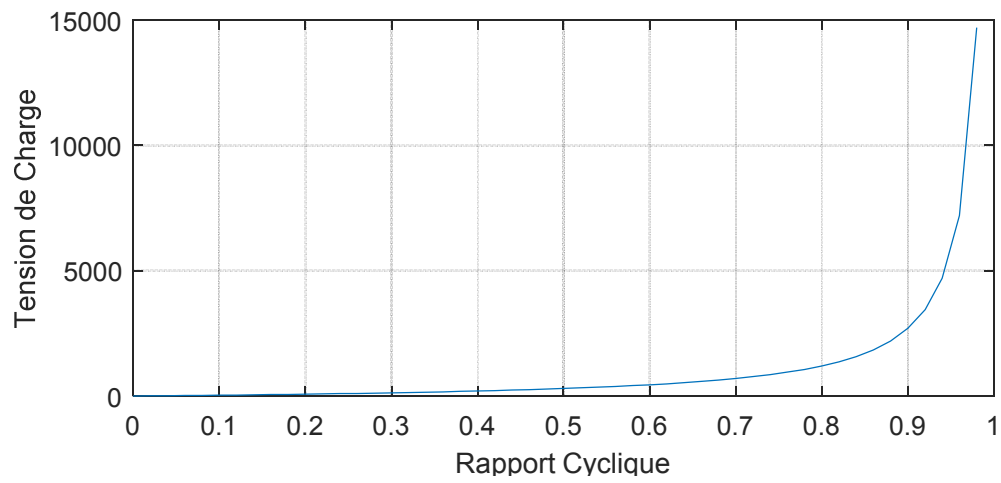


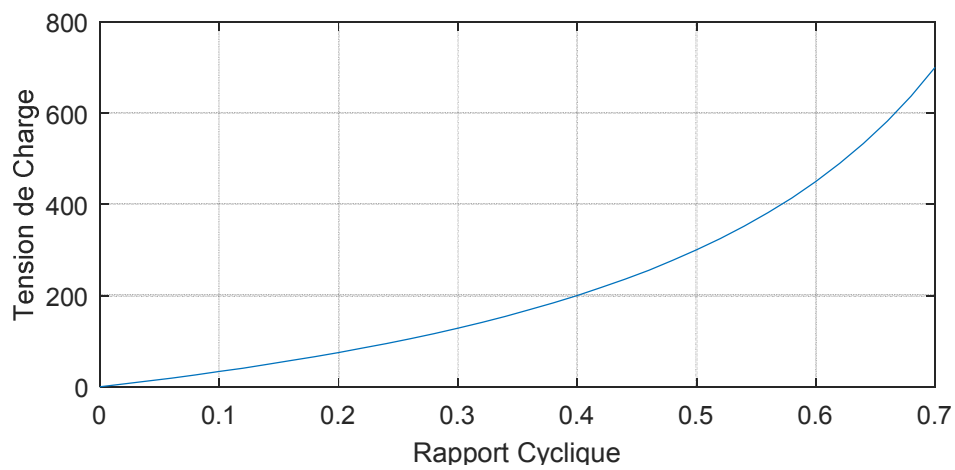
Figure (III. 12) : Résultat de simulation du courant I_s

Les résultats de simulation représentés sur les figures (III-11) et figure (III-12) montrent le test de performance concernant la variation de la tension et du courant lorsque le rapport cyclique α varie, où la charge est purement résistive. Pour des valeurs de $\alpha > 0.5$ le convertisseur est élévateur et contrairement pour $\alpha < 0.5$ le convertisseur est abaisseur.

L'évolution de la tension moyenne en fonction du rapport cyclique est schématisée sur la figure (III-13), on constate en effet que les résultats des figures (III-11) et (III-12), sont confirmés.



(a)



(b)

Figure (III. 13) : Tension de charge en fonction du rapport cyclique α

III.3.8 Régulation du Buck-Boost à l'aide d'un correcteur PI :

III.3.8.1 Introduction :

L'objectif principal de la commande est de maîtriser l'évolution d'une ou plusieurs grandeurs physiques à partir d'une ou plusieurs variables de contrôle, et ceci dans un environnement perturbé. Ces perturbations sont de nature externe (perturbation sur la mesure, perturbation sur la commande...) ou interne au système (erreur du modèle, incertitude paramétrique) et généralement non mesurable. La commande du processus se fait par l'introduction dans la chaîne de commande d'un algorithme de contrôle ayant des performances satisfaisantes pour s'affranchir des perturbations. Cet algorithme de contrôle est appelé un correcteur ou parfois un régulateur. Les algorithmes de contrôle pour synthétiser un correcteur sont nombreux. Les algorithmes de contrôle Proportionnel Intégral (PI), par hystérésis, par mode glissant de plusieurs ordres et par la méthode de Lyapunov [15]. Dans ce chapitre, nous avons utilisé un régulateur PI pour le contrôle du convertisseur DC-DC.

III.3.8.2 La Commande avec régulateur PI :

Chaque boucle de régulation est dotée d'un régulateur proportionnel intégral *PI* classique, présenté sur la figure (III-14), il comporte une action proportionnelle qui sert à régler la rapidité avec laquelle la régulation doit avoir lieu et une action intégrale qui sert à éliminer l'erreur statique entre la grandeur régulée et sa propre consigne [16].

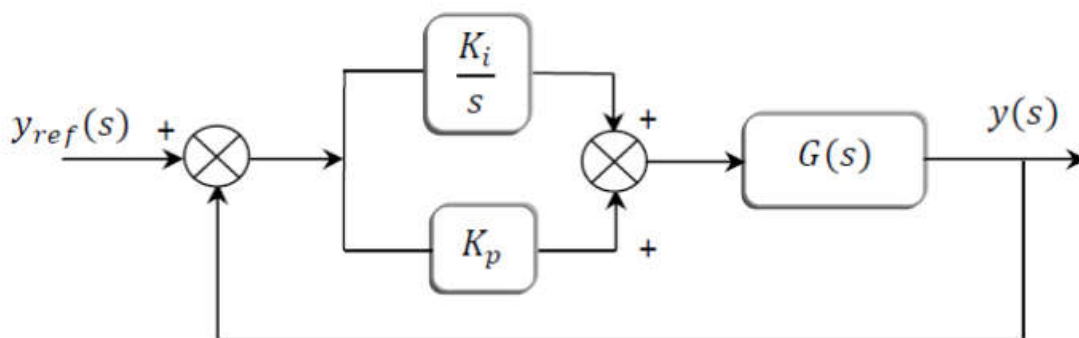


Figure (III. 14) : Schéma de commande utilisant la structure PI [16]

Soit $G(s)$ un système de premier ordre peut être donné par une des fonctions suivant :

$$\left\{ \begin{array}{l} G(s) = \frac{G_1}{s+\tau_1} \\ G(s) = \frac{G_0}{1+\tau s} \end{array} \right. \quad (\text{III-27})$$

Avec : $\tau_1 = \frac{1}{\tau}$

a) Action proportionnelle

- Si K_p est grand, la correction est rapide. Le risque de dépassement et d'oscillation dans la sortie s'accroît.
- Si K_p est petit, la correction est lente, il y a moins de risque d'oscillations.

b) Action intégrale : L'action intégrale réagit lentement à la variation de l'erreur et assure un rattrapage progressif de la consigne.

Tant que l'erreur positive (ou négative) subsiste, l'action $G(t)$ augmente (ou diminue) jusqu'à ce que l'erreur s'annule [16].

Il existe plusieurs méthodes pour déterminer les paramètres K_p et K_i du régulateurs PI dont :

- La méthode d'espace d'état
- La méthode de placement des pôles
- La méthode de compensation des pôles ...etc

Dans notre travail nous avons utilisé la méthode d'espace d'état .

III.3.8.2.1 Etablissement du modèle de la fonction de transfert pour Convertisseur Buck

Boost :

La théorie de la moyenne d'espace d'état appliquée dans le convertisseur de puissance à découpage a été conçue au début 1970 et bien développée au début des années 1980 [18]. Dr.

Robert Middlebrook et son étudiant diplômé Slobodan Cuk ont été crédités avec le concept et techniques associées. Par conséquent, le mode de commutation modèles de convertisseur générés sur la base de la théorie ont souvent été nommés modèles Middlebrook [17].

Mode 1. Alors que l'interrupteur Q est en position ouverte, l'équivalent a été montré comme Figure (III.15). L'application de Kirchoff à loi de tension (KVL), le courant traversant l'inducteur et la tension aux bornes du condensateur condensateur sont mise en équation comme suit (Equation.28): [17].

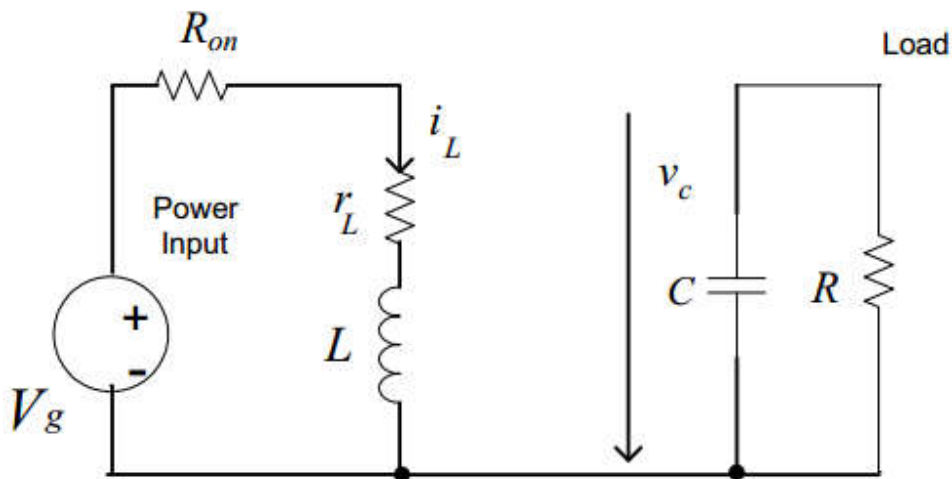


Figure (III. 15) : Le circuit équivalent pour le mode 1 [17]

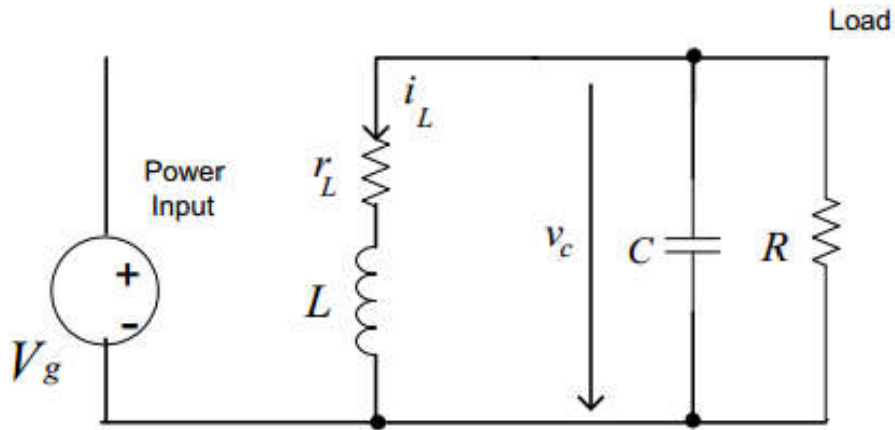


Figure (III. 16) : Le circuit équivalent pour le mode 2 [17]

$$\begin{cases} \frac{di_L}{dt} = -i_L \frac{(R_{on} + r_L)}{L} + \frac{V_{in}}{L} \\ \frac{dv_c}{dt} = -\frac{V_c}{RC} \end{cases} \quad (III-28)$$

Le circuit linéaire est décrit au moyen de la variable d'état le vecteur x constitué du courant inducteur et la tension du condensateur.

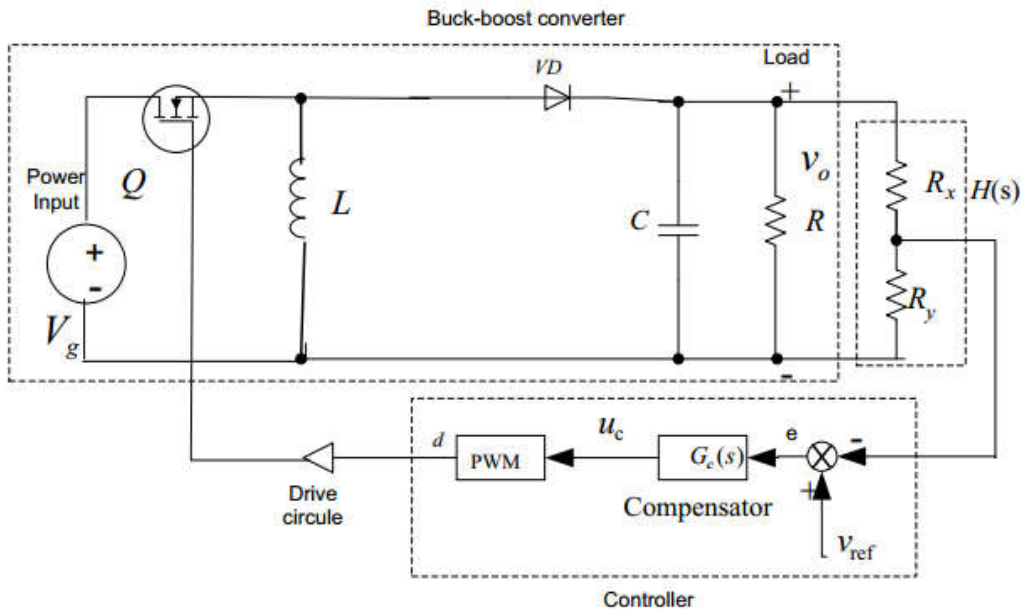


Figure (III. 17): Le diagramme du système en boucle fermée du convertisseur buck-boost[17]

Lorsqu'il est écrit sous forme d'espace d'état, ces équations deviennent [17] :

$$\dot{x} = A_1 + B_1 V_{in}$$

$$y = C_1 x$$

$$A_1 = \begin{bmatrix} -\frac{R_{on}+r_L}{L} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix}, B_1 = \begin{bmatrix} \frac{1}{L} \\ 0 \end{bmatrix}, x = \begin{bmatrix} i_L \\ V_c \end{bmatrix} \quad (\text{III-29})$$

$$C_1 = [0 \quad 1], y = V_0 = V_c$$

Mode 2. Alors que l'interrupteur Q est en position fermée, dans un de la même manière, ces équations deviennent [17] :

$$\dot{x} = A_2 + B_2 V_{in}$$

$$y = C_2 x$$

$$A_2 = \begin{bmatrix} -\frac{r_L}{RC} & -\frac{1}{L} \\ -\frac{1}{C} & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix}, B_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{L} \end{bmatrix}, x = \begin{bmatrix} i_L \\ V_c \end{bmatrix} \quad (\text{III-30})$$

$$C_2 = [0 \quad 1], y = V_0 = V_c$$

La matrice moyennée A est égale à:

$$A = \alpha A_1 + (1-\alpha) A_2$$

$$= \begin{bmatrix} -\frac{\alpha(R_{on}+r_L)}{L} - \frac{(1-\alpha)r_L}{RC} & \frac{(1-\alpha)}{L} \\ -\frac{(1-\alpha)}{C} & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix} \quad (\text{III-31})$$

De la même manière, la matrice moyenne B et C est évaluée, avec les résultats suivant [17]:

$$B = \alpha B_1 + (1-\alpha) B_2 = \alpha B_1 \quad (\text{III-32})$$

$$C = \alpha C_1 + (1-\alpha) C_2 = C_1 = C_2 \quad (\text{III-33})$$

L'état stable (steady state) est décrit par le système d'équation suivant:

$$X = -A^{-1}BV_g = \begin{bmatrix} \frac{\alpha V_{in}}{(1-\alpha)^2 R + \alpha (R_{on} + r_L) + \frac{(1-\alpha)r_L L}{RC}} \\ \frac{\alpha (1-\alpha) V_{in}}{\frac{\alpha (R_{on} + r_L)}{R} + \frac{(1-\alpha)r_L L}{R^2 C} + (1-\alpha)^2} \end{bmatrix} \quad (III-34)$$

La fonction de transfert du contrôleur de l'entrée (rapport α cyclique) vers la sortie (tension aux bornes du condensateur V_c) est exprimée comme suit [17] :

$$G_{vd}(s) = C(sI - A)^{-1}B [(A_1 - A_2) X + (B_1 - B_2) V_{in}] + (C_1 - C_2) X \quad (III-35)$$

Les résistances R_{on} et r_L sont de valeurs infiniment petites donc négligeables, la fonction de transfert devient alors [17] :

$$G_{vd}(s) = \frac{V_{in} [\frac{\alpha L}{R} s - (1-\alpha)^2]}{(1-\alpha)^2 [LCs^2 + \frac{L}{R} s + (1-\alpha)^2]} \quad (III-36)$$

La fonction de transfert de la tension d'entrée V_{in} vers la tension de sortie V_c est illustrée par l'équation (III-37) :

$$G_{vg}(s) = \frac{\alpha(\alpha-1)}{LCs^2 + \frac{L}{R}s + (1-\alpha)^2} \quad (III-37)$$

La fonction de transfert de la largeur d'impulsion du modulateur est illustrée par l'équation (III-38) :

$$G_{dc}(s) = \frac{1}{\Delta V_C} = k_p \quad (III-38)$$

ΔV_C est le maximum de l'ondulation de la tension aux bornes du condensateur, avec une fréquence de modulation bien défini, dans notre cas elle sera fixe à 10Khz pour le fonctionnement en émulateur.

Avec

Les valeurs des paramètres du régulateur PI sont choisis comme suit :

$$K_i = \frac{1}{f_c}$$

f_c : fréquence de hachage .

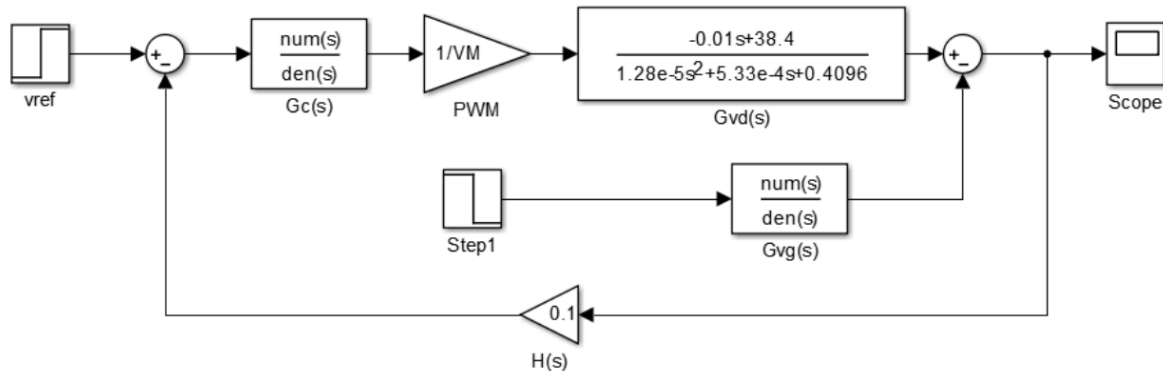


Figure (III. 18) : Simulation du diagramme du convertisseur Buck-Boost [17]

III.3.8.3 Caractéristiques des régulateurs :

a- Stabilité : Un système bouclé doit être stable. Seulement si les réactions du système de régulation soient énergétiques sans être disproportionnées avec l'erreur à corriger. Une correction trop forte ou tardive risque de conduire le système à une instabilité.

b- Précision : En régulation, la précision est obtenue par l'implantation d'intégration dans la boucle.

c- Rapidité : En générale, un système bouclé doit répondre rapidement à la variation de sa consigne (poursuite) et effacer rapidement les perturbations (régulation). Le temps de réaction est, bien entendu, en relation étroite avec l'inertie propre du processus [15].

III.3.8.4 Le schéma de simulation du Buck-Boost avec le régulateur PI :

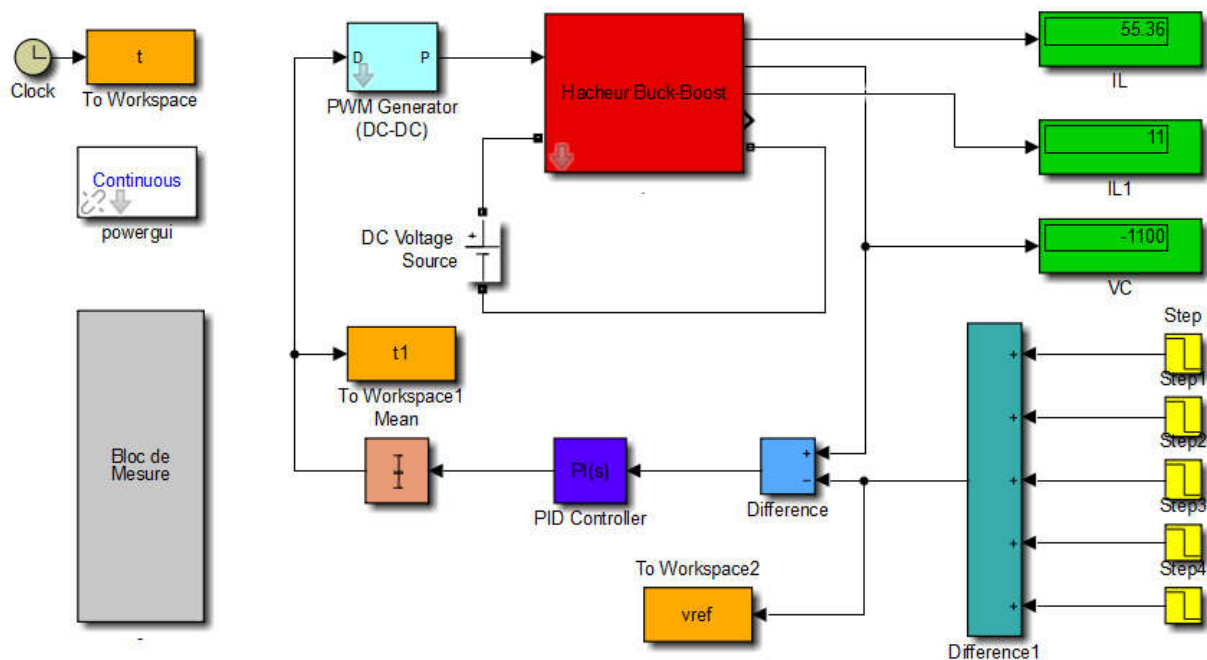


Figure (III. 19) : Schéma de simulation du Hacheur Buck-Boost avec le régulateur PI

III.3.8.5 Les résultats :

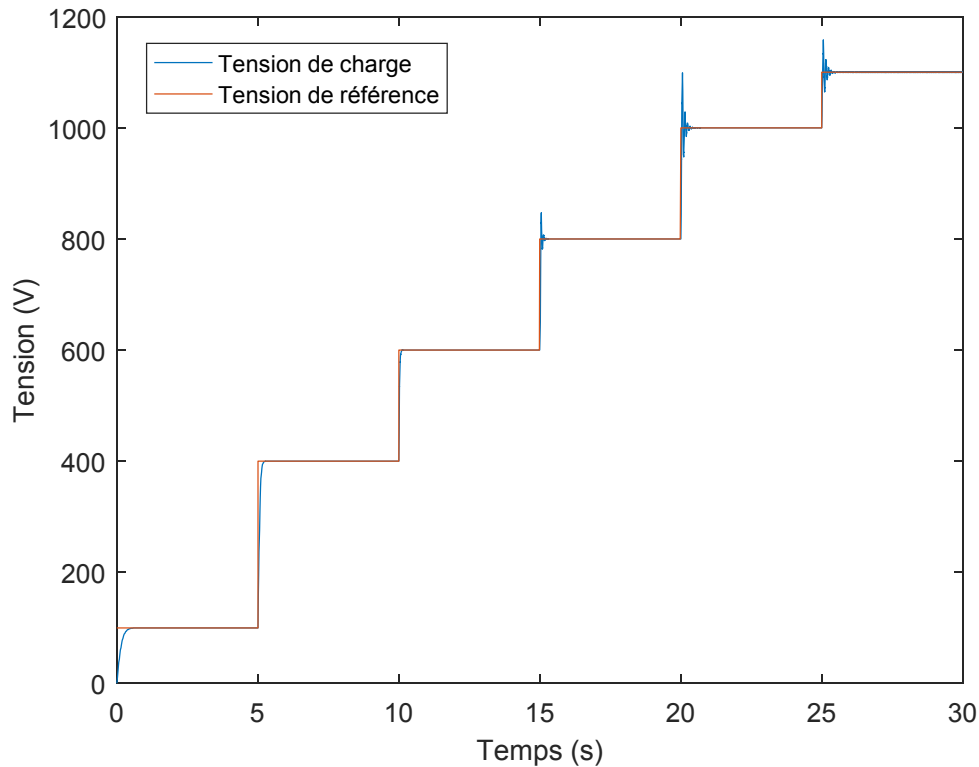


Figure (III. 20) : Tension de charge

Interprétation :

Les résultats de simulation représentés sur la figure (III. 20) montrent effectivement que la tension de sortie du convertisseur (en bleu) suit la le signal de référence (en rouge), toute fois on constate que y'a un retard de suivis en basse tension. Par contre en haute tension le suivis s'avère être plus rapide et précis mais présente des fluctuations. Autrement dit c'est difficile de trouver un bon compromis, pour le choix des paramètres du régulateur, dans les deux cas c'est-à-dire en basse et haute tension de façon parfaite.

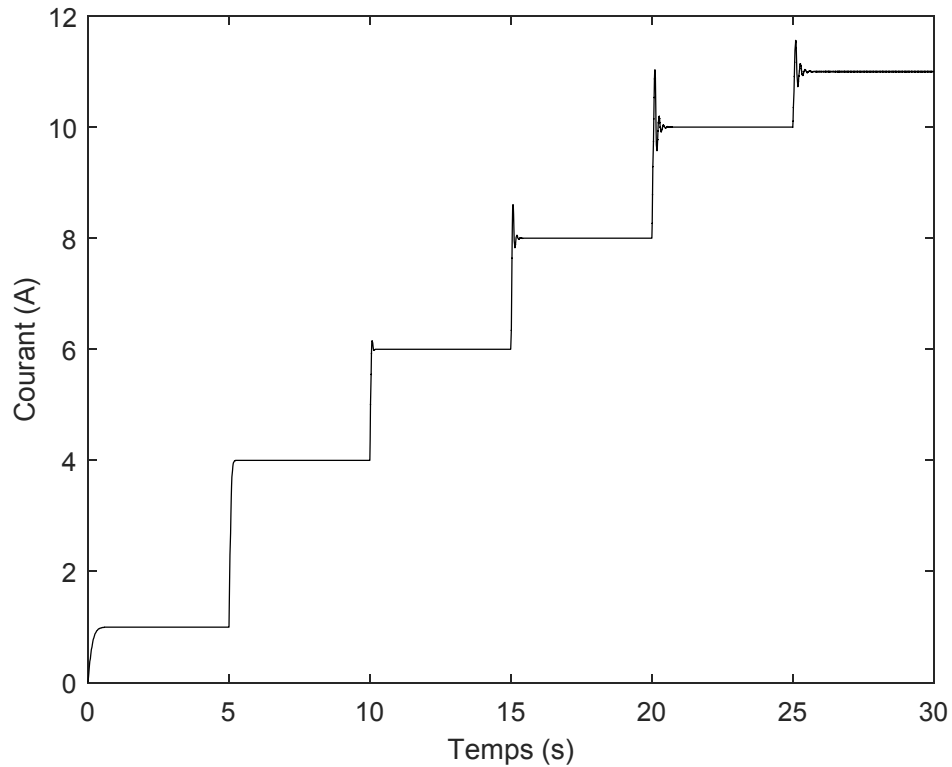
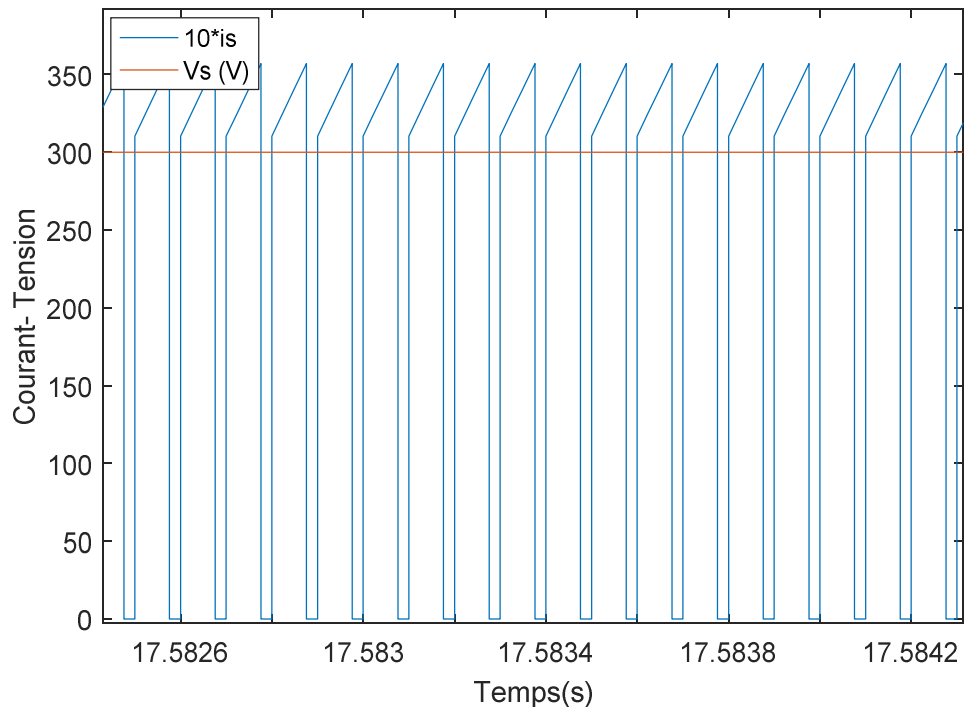


Figure (III. 21) : Courant de charge

Interprétation :

D'après les résultats de simulation représentés sur la figure (III. 21), nous constatons que le courant de charge suit parfaitement la forme de la tension à la valeur de la résistance R près qui vaut $R=100 \Omega$, le choix de cette valeur sera justifié dans le quatrième chapitre.

(a)



(b)

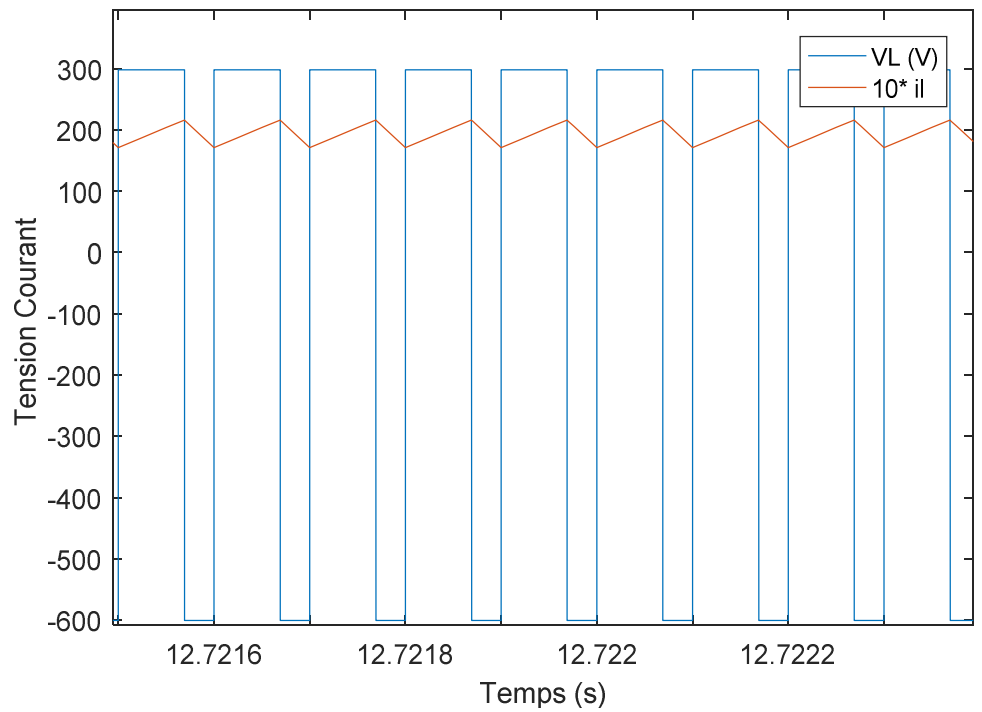


Figure (III. 22) : Courant et tension de source

Interprétation :

Les résultats de simulation représentés sur la figure (a) (III. 22) montrent un zoom de zones de conduction de la tension de source qui est de 300 v. Donc en raisonnant avec les paliers de 5 que nous avons faits, la tension de référence vaut 800v dans l'intervalle [15-20], cela nous permet de calculer le rapport cyclique dans ce cas. Même chose que nous observons entre [10-15], la tension de référence est à 600v.

Contrairement à la figure (b) (III. 22), le zoom de V_L et i_L pour une tension $V_{ch} = 600$ v et une tension d'entrée de 300 v, le rapport cyclique $\alpha = 3/2$. Par conséquent le régulateur fait un bon calcul de α , donc les prévisions théoriques sont confirmées en simulation .

III.4 Influence des paramètres du hacheur :

Les paramètres essentiels définissant le hacheur sont :

- La tension d'alimentation
- La dimension de l'inductance de stockage L
- La dimension de la capacité de filtrage C,
- La valeur de la fréquence de découpage
- La puissance, qui nous permet le choix de la résistance de charge

Tous ces paramètres ont une influence sur la réponse du hacheur en boucle fermée. A titre d'exemple, la figure(III.23) suivante la résistance interne de l'inductance de stockage qui a été négligé dans l'élaboration de la fonction de transfert (Equation III- 37) du convertisseur. Une perspectives a notre travail serait de refaire l'élaboration de la fonction de transfert avec plus de précision , en tenant compte des éléments parasites comme, les caractéristiques de la diode et du transistor et un modèle plus élaboré de l'inductance et de la capacité ceci dans le but d'avoir un modèle plus précis.

En effet, nous pouvons voir sur la figure suivante l'impact de la résistance interne de l'inductance de stockage sur la tension instantanée aux bornes du condensateur de filtrage. Ainsi nous constatons que le fait de la négliger nous conduit à un circuit bouchant (LC) donc oscillant, surtout pour des fortes puissances .

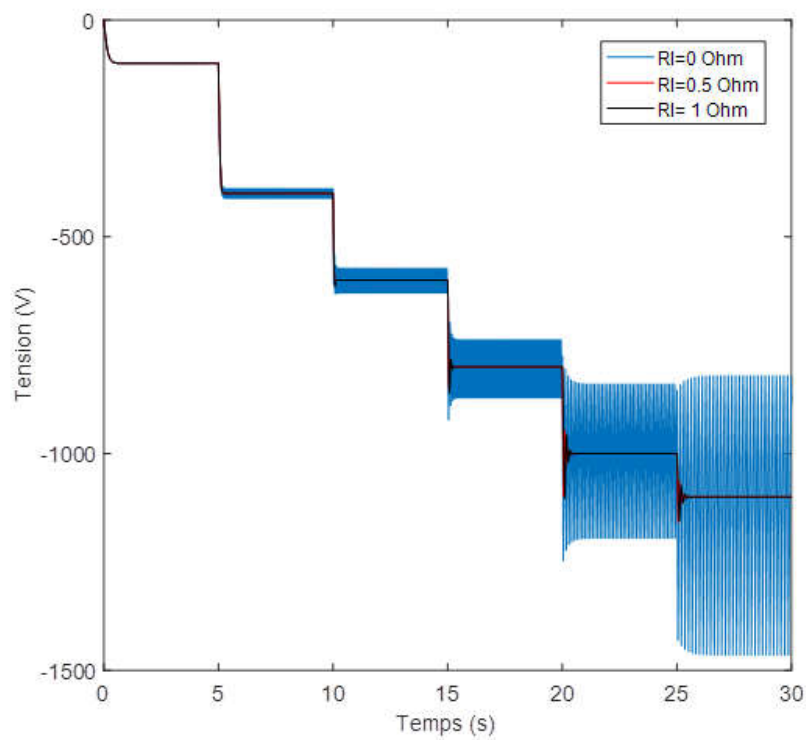


Figure (III. 23) : Influence de la résistance interne d'inductance sur la tension de charge

III.5 Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons modélisé et simulé le hacheur à accumulation inductive, dans le but de valider l'essentiel des résultats. Ce convertisseur a l'avantage de fonctionner dans le quadrant QII tout en étant élévateur et abaisseur au même temps.

Ce modèle sera utilisé comme variateur d'impédance dans l'émulateur afin de poursuivre la caractéristique (V, I) d'une installation photovoltaïque pour différentes conditions climatiques.

Chapitre IV

Simulation de l'émulateur

IV.1 Introduction

De nos jours, l'intérêt de la production de l'énergie électriques à partir de sources énergétiques renouvelables est jour après jour parmi le photovoltaïque est majeur parce qu'il donne le DC électricité sans aucune émission. Les systèmes PV peuvent être installés presque n'importe où sur terre ainsi que dans l'espace aussi. Système PV est la principale source de sorte que les tests de l'équipement est nécessaire. Ici, l'émulateur PV est l'équipement qui reproduit les mêmes P-V et I-V caractéristique sans installation extérieure. Ceci permet conditions reproductibles pour tester l'équipement PV tels que onduleur et fournit un environnement contrôlé pour tester un système PV global [1]. Un émulateur PV serait capable de simuler de nombreux types de panneaux solaires; en dessous de diverses conditions de température et de temps

Le but de ce chapitre est de simuler l'émulateur photovoltaïque, ainsi il nous faut associer les modèles de cellules déjà traités dans le deuxième chapitre et celui du hacheur élaboré dans le troisième chapitre. L'introduction d'une régulation imposera au hacheur un fonctionnement bien défini, de telle sorte à ce que son impédance soit variable et suit la caractéristique réelle en fonction des différents paramètres (température, irradiation) de l'ensemble des cellules formant notre installation photovoltaïque

IV.2 Schéma global de l'émulateur photovoltaïque

Un système d'émulateur de panneau PV est un convertisseur statique où les semi-conducteurs doivent fonctionner en commutation. Toute fois le fonctionnement naturel du système réel suit une courbe caractéristique (I, V) bien définie.

Le but de l'émulateur est de pouvoir remplacer le panneau réel, pour entreprendre une expérience. Le schéma fonctionnel du système d'émulateur PV est montré sur la figure (IV-1). Dans un premier temps il faut prélever des échantillons de circuit de détection, ensuite il faut charger la tension et les valeurs du courant avec la période d'échantillonnage indiquée. Selon le courant de charge la valeur de la tension de référence correspondante est calculée par le bloc de modèle de panneau PV. Ce bloc prend en considération les paramètres suivant

- l'irradiance
- la température

Donc, on arrive à une information donnant V en fonction I , G et T . Ceci signifie que la tension de référence d'une charge peut être obtenue par le courant de charge mesuré, selon l'irradiance, et la température. La différence entre les valeurs de référence et les valeurs mesurées de la tension de charge est appliquée pour obtenir un coefficient d'utilisation approprié. En conclusion, le bloc de génération de PWM fournit le signal de commutation pour conduire le commutateur du convertisseur de DC/DC. [1]

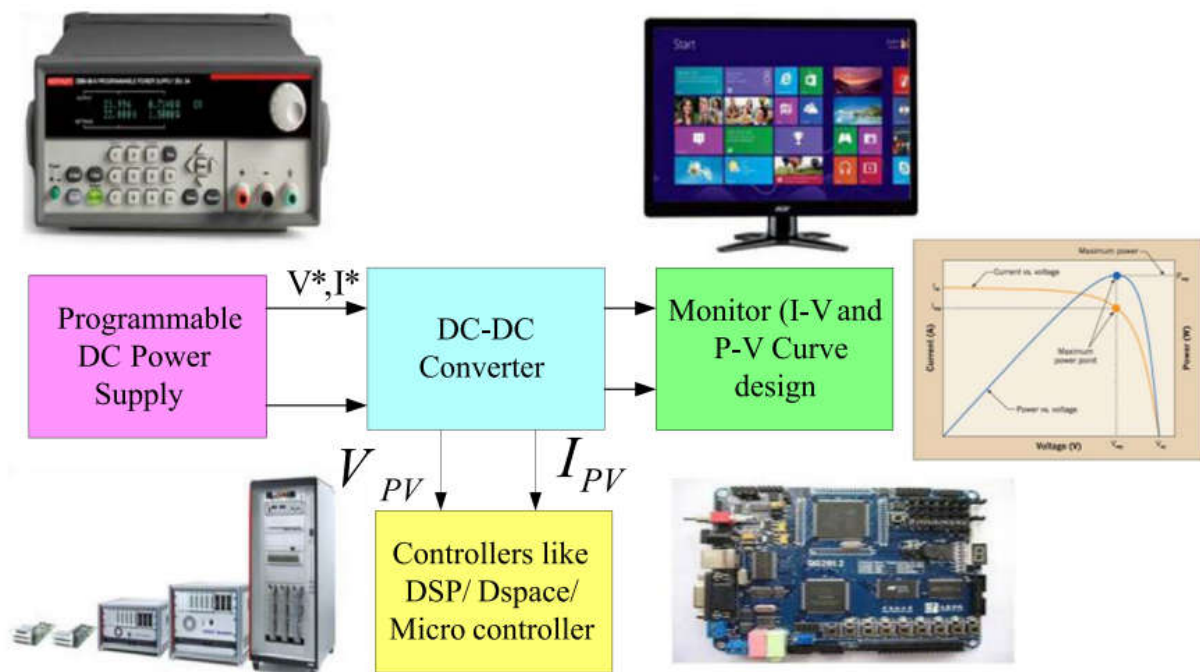


Figure (IV. 1) : représentation d'un émulateur PV basé sur un convertisseur.

IV.3 Principe de fonctionnement de l'émulateur PV

La Figure (IV-2) montre une caractéristique V-I d'un module à émulé et ligne de charge correspondant à une charge purement résistif fixe (R_{load}) sur le même tracé de la caractéristique (I-V). Pour la charge donnée; si le convertisseur opérant au point d'intersection de la caractéristique (I-V) d'un module et de la ligne de charge R_{load} ; le convertisseur est capable de se comporter comme un émulateur [1]. Ça montre que la ligne de charge R_{load} croise la caractéristique (I-V) de module au point «c» et le convertisseur peut agir en tant qu'émulateur si sa tension de sortie en régime permanent et le courant sont V_{pv3} et I_{pv3} respectivement où $V_{pv3}/I_{pv3} = R_{pv3} = R_{load}$. [2]

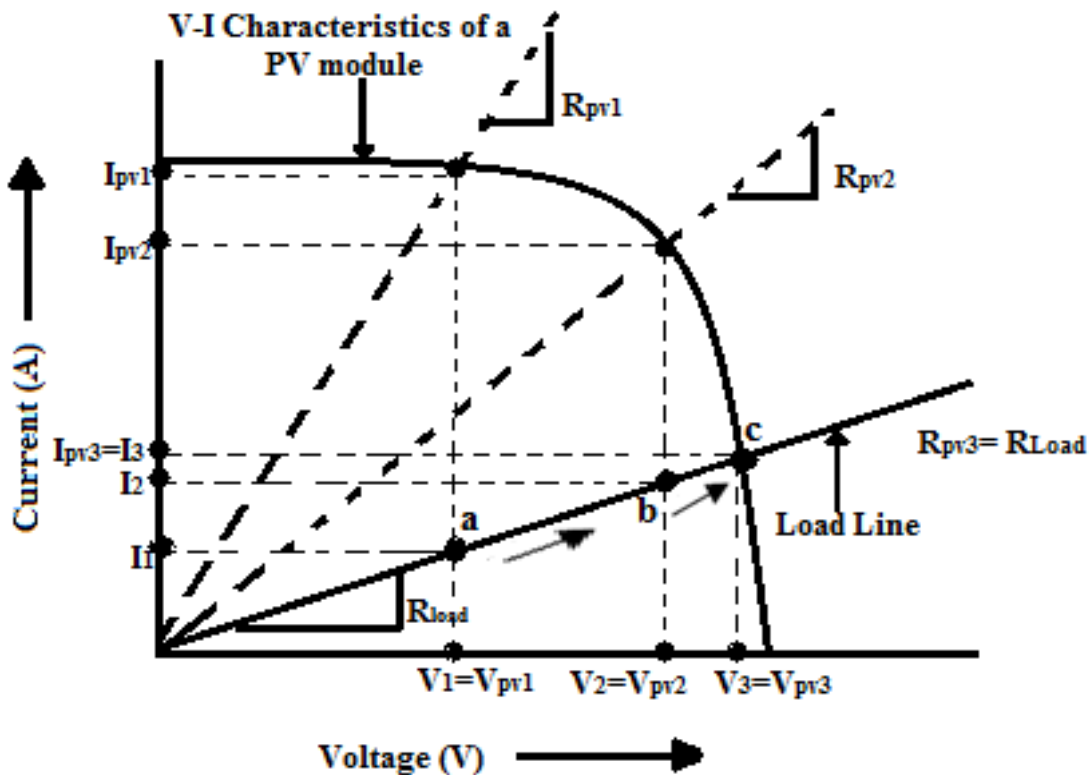


Figure (IV. 2) : Principe de fonctionnement de l'émulateur PV

«a» est le point de fonctionnement auquel la tension et le courant sont respectivement V_1 et I_1 . Le modèle PV génère la tension $V_1 = V_{pv1}$ et le courant I_{pv1} en ce point la résistance de charge est R_{pv1} qui est inférieure à R_{load} . de sorte que le convertisseur soit assez puissant pour agir comme émulateur; ce point «a» déplacé au point 'b'. Au point «b», la tension augmente de V_{pv1} à $V_2 = V_{pv2}$ le courant diminue de I_{pv1} à I_{pv2} . La résistance au point 'b' est R_{pv2} qui est également inférieure à la R_{load} , donc une fois de plus le convertisseur n'est pas assez puissant pour agir comme émulateur. La tension $V_3 = V_{pv3}$ et le courant $I_3 = I_{pv3}$ au point 'c'. La résistance de charge est R_{pv3} au point 'c' égal à R_{load} .

IV.4 Principe de fonctionnement du contrôleur choisi

Pour poursuivre point par point cette courbe il faut que la résistance de charge est des valeurs tel que

$$R_{ch} = \frac{V_{PV}}{I_{pv}} \quad (IV.1)$$

Un convertisseur est un variateur d'impédance, les résultats obtenus au troisième chapitre vont nous permettre de déduire la valeur apparente de la résistance équivalente du hacheur à accumulation inductive vu par sa source d'alimentation.

Soit R_e cette résistance

$$R_e = \frac{U}{I} \quad (IV.2)$$

$$R = \frac{U_c}{I_R} \quad (IV.3)$$

$$U_c = -\frac{\alpha}{1-\alpha} \cdot U \quad (IV.4)$$

$$I_R = -(1-\alpha) \cdot I_L \quad (IV.5)$$

$$I = \alpha \cdot I_L \quad (IV.6)$$

Ce qui nous ramène à la relation entre R et R_e :

$$R_{eq} = \frac{(1-\alpha)^2}{\alpha^2} R \quad (IV.7)$$

IV.5 Procédure à suivre pour réaliser l'émulateurs PV :

Dans le deuxième chapitre le modèle du panneau photovoltaïque ainsi que son programme de simulations ont été élaborés, plusieurs tests en fonction des différents paramètres ont été réalisés.

Au niveau du troisième chapitre le modèle du hacheur à accumulation inductive a été réalisé puis simulé, le fonctionnement était en boucle ouverte cela nous a permis de constater le bon suivi de la tension de sortie selon la fonction de transfert de ce convertisseur. Ensuite nous lui avons associé le bloc PWM et le bloc de contrôle, nous avons utilisé la méthode dite Espace d'Etat pour ce dernier. La sortie du convertisseur Buck_Boost est détectée par le circuit de détection de tension et de courant, respectivement pour contrôler le convertisseur afin de se comporter comme un émulateur PV. Le modèle PV génère le V_{pv} qui dépend de l'irradiation G , température T et la courant de sortie du convertisseur DC-DC (Buck-Boost). La tension de référence, c'est-à-dire V_{ref} , la tension de sortie V_o et la tension d'entrée du convertisseur alimenté à la mise en place du contrôleur PI qui constituent le multiplicateur de gain avant qui va manipuler l'erreur et donner le signal au Générateur PWM. Selon la commutation, le convertisseur se comporte comme Émulateur PV et donne la sortie qui est presque celle d'un Système PV réel.

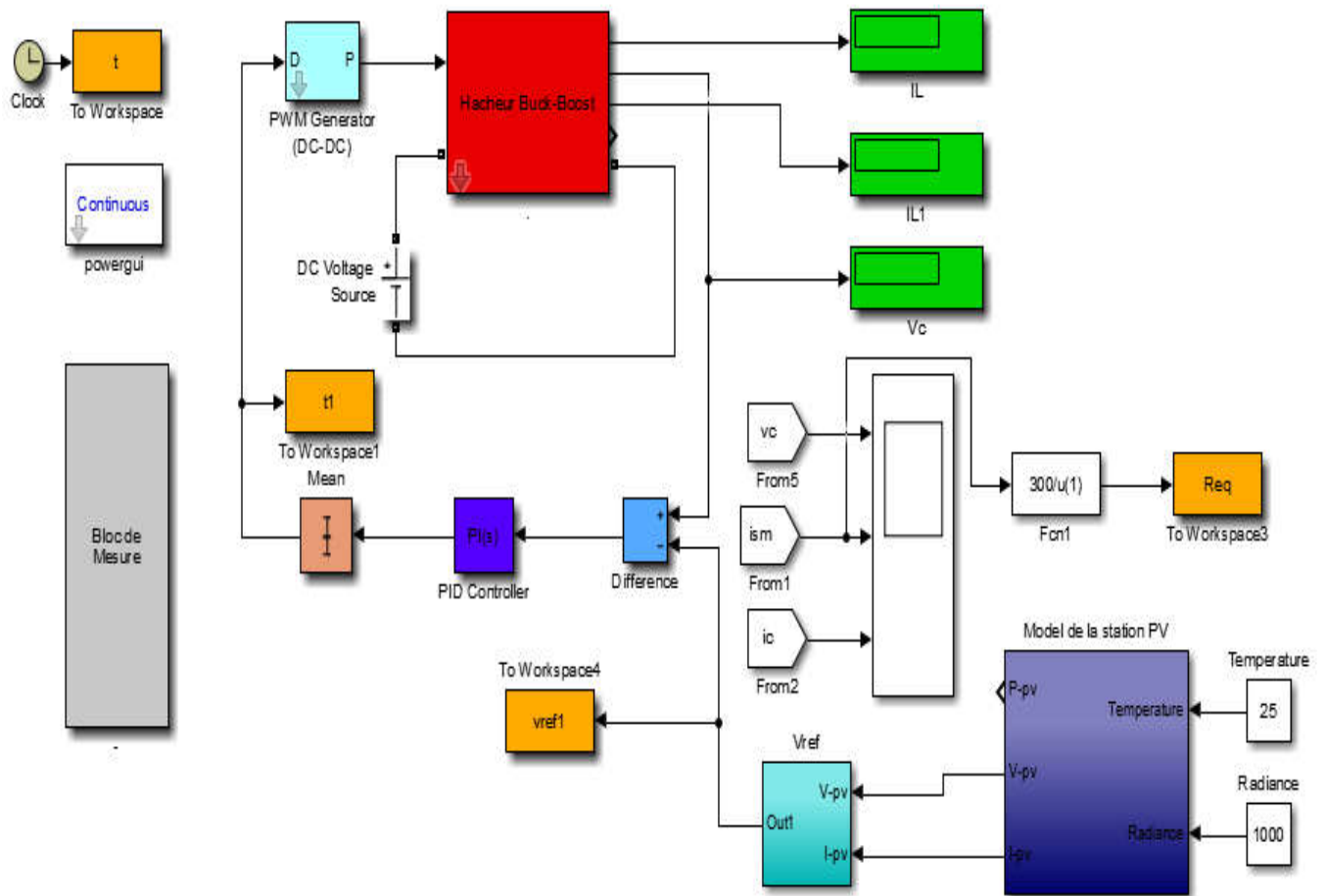


Figure (IV. 3) : Schéma de simulation de l'émulateur PV

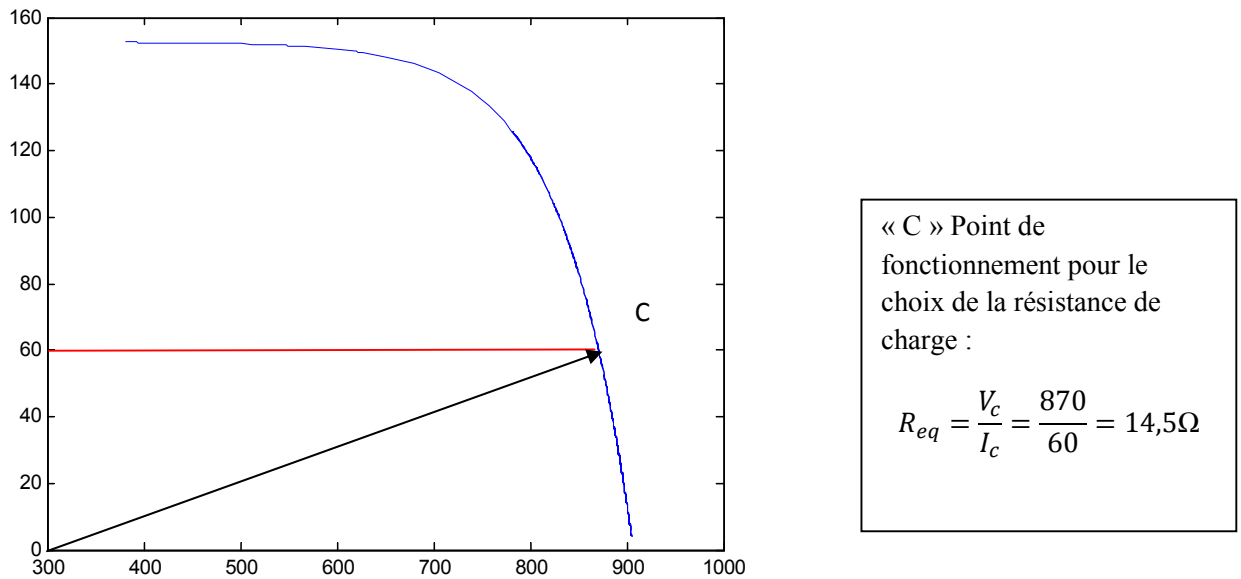


Figure (IV. 4) : Principe de fonctionnement de l'émulateur de tableau PV

Le déplacement du point C pour décrire le profil de la courbe en bleu correspond à une impédance variable $R_{eq} = V_{pv}/I_{pv}$ de tel sorte, pour passer du point du point du court circuit au circuit ouvert, notre impédance sera schématisé d'une par une résistance équivalente dont les valeurs seront schématisé sur la figure suite.

Nous constatons que prendre une résistance de charge maximale de 100 Ohm , nous permet de décrire la quasi-totalité de la caractéristique PV

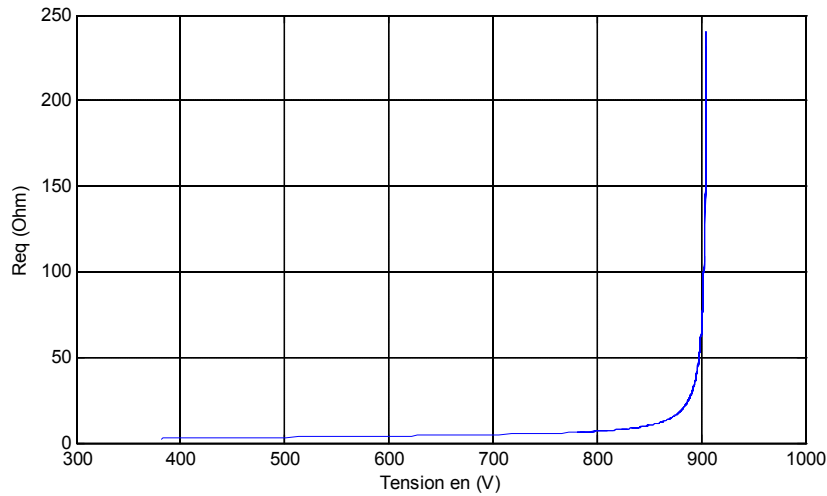


Figure (IV. 5) : résistance équivalente en fonction de la tension de charge

Une fois le choix de résistance de charge effectué, l'équation (IV- 7) nous permet un calcul du rapport cyclique en fonction du point de fonctionnement de la caractéristique (V-I) de la station photovoltaïque. ce qui nous permet le choix de la tension de référence souhaité. une fois tous ces paramètres fixés des simulations seront effectués. Une partie à été effectuée au niveau du chapitre III ce la nous a permis de constater un bon suivis de référence.

D'autres résultats de simulations seront nécessaires afin de finir la simulation de nos émulateurs.

En fonction des conditions métrologique, les caractéristiques (V-I) peuvent être variables.

Ce qui provoque une variation de la puissance fournis par la station. Mais aussi une variation de la résistance de charge.

Deux tests on était effectués, le premier pour voir l'impacte de la variation de la charge, dans le second test une variation paramétrique des deux éléments atmosphériques, qui sont la température et la radiation, ces deux paramètres sont les plus influant sur la production énergétique d'un panneau photovoltaïque, est réalisé. Les résultats ainsi obtenus sont représentés sur les figures suivantes.

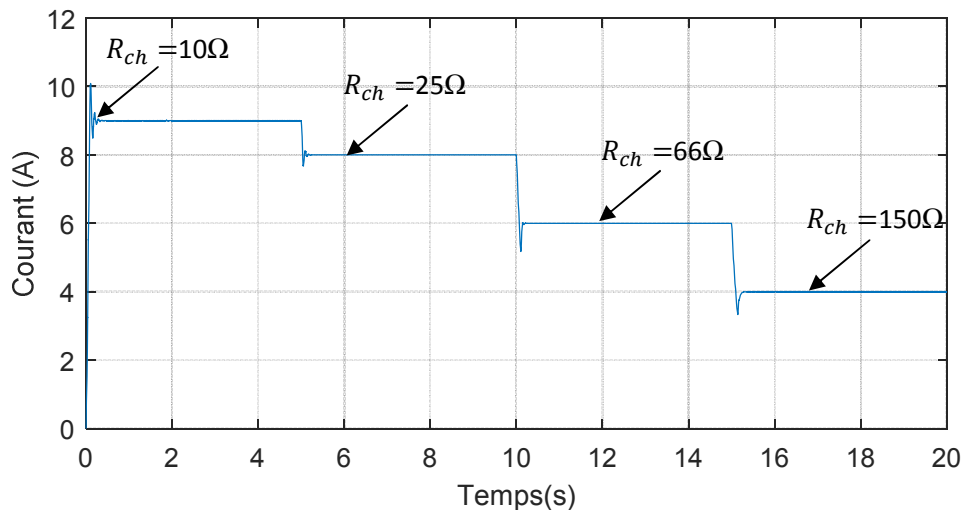


Figure (IV. 6) : Courant de charge en fonction du temps pour différentes valeurs de R_{ch}

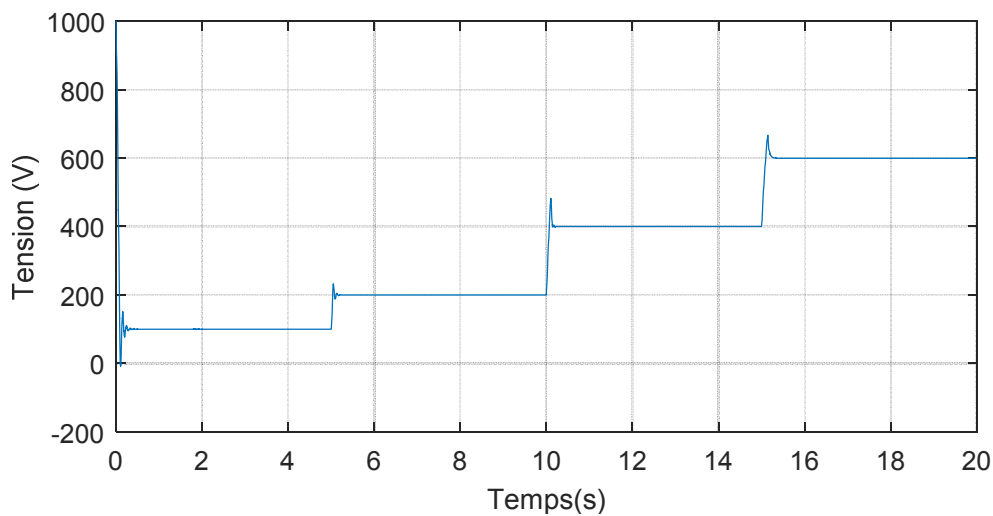


Figure (IV. 7) : Tension de charge en fonction du temps pour différentes valeurs de R_{ch}

Interprétation :

Les performances de l'émulateur PV basé sur le convertisseur à accumulation inductive avec une variation non linéaire de l'impédance apparente a été discutées dans cette section. La simulation a été réalisée sous environnement MATLAB/ Simulink.

A chaque variation de la luminosité et/ou de la radiance, la caractéristique (V-I) change, par conséquent la variation de la l'impédance équivalente en fonction de la tension. Le choix de $100\Omega \propto \varepsilon$ a été fait pour le couple de valeur suivant (25° , $1000\text{W}/\text{mm}^2$)

Pour pouvoir suivre la caractéristique (I-V) à quelque soit la température et l'irradiance, il faut pouvoir faire varier la résistance de charge. Les figures IV.6 et IV.7 représente la variation du courant pour différentes valeurs de la résistance de charge et de la tension fournie par le hacheur.

IV.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté un simulateur qui peut reproduire le comportement de tous les composants, matériel et de logiciel intervenant dans un émulateur, sous l'environnement MATLAB/simulink

La technique d'espace d'état nous a permis de faire le calcul du régulateur et de ce fait le contrôle complet de rétroaction d'état dans lequel le multiplicateur de gain direct utilisé pour manipuler l'erreur.

Voici les performances de l'émulateur PV avec charge non linéaires simulée dans MA TLAB dont le résultat est comparable avec le vrai système PV. La performance de l'émulateur PV est presque au vrai système PV avec une certaine valeur d'ondulation; qui peut être éliminé en variant la taille de l'inducteur et condensateur utilisant dans le filtre.

Conclusion générale

CONCLUSION GENERALE

L'objectif de ce travail était la conception et la réalisation d'un émulateur solaire. Ceci était dans le but de disposer d'un outil de laboratoire performant, permettant d'effectuer des travaux de recherche expérimentaux sans avoir besoin d'un module PV, ni entravé par des conditions climatiques défavorables (absence du soleil).

Nous avons présenté un émulateur photovoltaïque (PV) de matrice basé sur le contrôle du convertisseur DC-DC en même temps abaisseur et élévateur de tension par la technique de d'espace d'état. La structure de notre émulateur est composée principalement du hacheur à accumulation inductive accompagné d'une boucle de régulation à l'aide d'un contrôleur PI, sans oublier le modèle électrique équivalent du panneau photovoltaïque choisis. L'émulateur photovoltaïque a des caractéristiques électriques similaires à un panneau ou module photovoltaïque, aussi il est indépendant de l'état de l'environnement afin qu'il génère et maintienne les mêmes caractéristiques par rapport au système photovoltaïque réel. Ici, la technique d'espace d'état est utilisée pour contrôler la caractéristique tension-courant de l'émulateur photovoltaïque qui est obtenu par le modèle PV. Tout ce système a été évalué sous environnement MATLAB_Simulink avec charges non linéaires. Les résultats de la simulation montrent que l'émulateur de la matrice de panneau PV donne effectivement le comportement similaire à un vrai système PV.

L'usage d'un tel dispositif dans des applications qui concerne l'énergie solaire photovoltaïque comme les algorithmes de recherche du point de puissance maximale permet un gain considérable en temps et en coût.

Avant d'entamer le travail sur l'émulateur un état de l'art a été réalisé. Ensuite Le deuxième chapitre a été consacré aux modules PV : Caractéristiques, modèle et association. Le troisième chapitre est consacré à la présentation du convertisseur utilisé qui un hacheur Buck/boost.

Au dernier chapitre on a présenté les résultats expérimentaux issus des essais effectués sur notre émulateur. Et afin d'approuver la conformité des caractéristiques de ce dernier avec celles d'un vrai module PV, on a appliqué deux techniques de recherche du point de puissance maximale. Les résultats obtenus ont été, aussi, présentés dans ce chapitre.

Conclusion générale

Les résultats des essais effectués sur l'émulateur solaire réalisé montrent ses différentes caractéristiques pour différentes conditions météorologiques :

- Les caractéristiques $I=f(V)$ et $P=f(V)$ pour une température fixe et un éclairement variable.
- La caractéristique $I=f(V)$ et $P=f(V)$ pour un éclairement fixe et une température variable.

Ces résultats nous ont permis de constater que ces caractéristiques sont, dans une large mesure, identiques à celles d'un vrai module photovoltaïque.

Bibliographie

Bibliographie

- [1] Maria Carmela Di Piazza • Gianpaolo Vitale « Photovoltaic Sources Modeling and Emulation » Springer-Verlag London 2013
- [2] Bhargav D.Patel and Ankur Rana « A Pole-placement Approach for Buck Converter based PV Array Emulator » Uka Tarsadia University, Bartoli , Surat , India (ICPEICES-2016)
- [3] J. Prasanth Rama, Himanshu Manghania, Dhanup S. Pillaia, T. Sudhakar Babua, Masafumi Miyatakeb, N. Rajasekar « Analysis on solar PV emulators: A review » journal, Renewable and Sustainable Energy Reviews 81 (2018)
- [4] Yunus Erkaya, Sylvain Marsillac « A PV Module Emulator Based on GaN Devices with Over 99% Peak Efficiency » Virginia Institute of Photovoltaics, Old Dominion University, Norfolk, VA, USA 2017
- [5] Rafael F. Q. Magossi, PHnio G. B. Ferreira, Mateus S. Quinalia, Marina C. Carvalho, Ricardo Q. Machado « PROJECT OF A SOLAR MODULE EMULATOR USING A ZENER DIODE TO ANALYZE THE BEHAVIOR OF MPPT ALGORITHMS » Sao Carlos School of Engineering, EESC-USP, Sao Carlos - SP, Brazil, 2017 IEEE
- [6] Prateek Garg , Priyanshi et G.Bhuvaneshwari , “Power Electronic Circuit Based Implementation of a Solar PV Emulator Using a Power Factor Corrected Buck Converter”, Conference 13-14 March 2018, New Delhi, India .
- [7] Anne Labouret, Michel villosz (Energie solaire photovoltaïque), Paris 3^{ème} edition 2006.
- [8] Helali Kamelia « modélisation de la cellule photovoltaïque » mémoire de magister, Université Mouloud Mammeri de Tizi-ouzou, 2012
- [9] *BENSACI Wafa* « Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque adapté par une commande MPPT » mémoire de master, Université Kasdi Merbah–Ouargla 2012
- [10] Takudzwa B Tapfumane1, H.D.T Mouton2,Arnold J. Rix « Solar Array Emulator »
- [11] Mustapha Elyaqouti & al « Modeling and Simulation of an Emulator of Photovoltaic Generator » *Communications on Applied Electronics , Volume 5 – No.8, August 2016.*
- [12] Belkacem LAOUARI, Hocine SFIHI «Etude d'un système photovoltaïque autonome» Mémoire de Fin d'Etudes , UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI DE TIZI-OUZOU 2015.

Bibliographie

- [13] Benoussad Melhir « Etude et simulation d'un émulateur photovoltaïque » Mémoire de Fin d'Etudes, UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI DE TIZI-OUZOU 2017
- [14] M. Correvon « ALIMENTATIONS À DÉCOUPAGE À INDUCTANCE SIMPLE » cours Systèmes électroniques , Institut d' Automatisation Industrielle de HES.SO (Haute Ecole Spécialisée de Suisse Occidentale)
- [15] HAFIAN Hicham « Etude et conception d'un émulateur d'énergie solaire piloté par dSPACE1103 » MAGISTER EN ELECTROTECHNIQUE, Université Hadj Lakhdar Batna Faculté de technologie Département d'Electrotechnique 2013.
- [16] Ghania Boukerche 2017 , « Etude et Synthèse d'un Contrôleur PI et Application », MEMOIRE DE MASTER DOMAINE : Sciences et Technologies FILIERE : Électrotechnique.
- [17] Xuelian Zhou , Qiang He « Modeling and Simulation of Buck-Boost Converter with Voltage Feedback Control » MATEC Web of Conferences 31,10006 (2015)

Résumé

Résumé : Le travail réalisé dans ce mémoire de fin d'étude est porté sur l'étude et la simulation d'un émulateur photovoltaïque. En premier lieu, on s'est consacré au modèle de la cellule choisie à savoir le modèle L5P dit modèle général sur lequel s'est basé notre station PV. Dans un second lieu, nous avons étudié et simulé le hacheur à accumulation inductive. Cela nous a amené à rassembler les deux parties dans une structure globale qui est l'émulateur.

Mots clés : Emulateur, hacheur à stockage inductif, Buck-Boost, modèle L5P, station PV, caractéristique I-V.