

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

UNIVERSITE MOULOUD MAMMARI 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 : **Electronique**

Spécialité : **Matériaux et dispositifs électroniques et
photovoltaïque**

Présenté par
Benoussad Melkhir

Thème

*Etude et simulation d'un émulateur
photovoltaïque.*

Mémoire soutenu publiquement le 28/09/ 2017 devant le jury composé de :

Mr Salah HADDAD

Professeur, U.M.M.T.O, President

Mr Rachid Zirmi

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

M^{elle} Djedjiga Hatem

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

M^{elle} Rahma Kachenoura

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

Remerciements

Je tiens à exprimer ma profonde reconnaissance et ma gratitude à mon encadreur, M^{elle} R. Kahenoura, Maître de conférences classe B qui a proposé et dirigé ce travail.

Mes vifs remerciements vont aussi au président et aux membres du jury pour avoir accepté d'évaluer ce travail.

Ce travail de mémoire que j'ai effectué doit beaucoup à certaines personnes que je tiens à remercier sincèrement, en particulier ma grande sœur Djedjiga.

Enfin, je remercie tous ceux qui ont contribué, de près ou de loin, à ma formation et à l'élaboration de ce modeste mémoire.

Sommaire

<u>Introduction Générale</u>	1
<u>Chapitre I Etat de l'art des émulateurs photovoltaïques</u>	
I.1 Introduction	6
I.2 Emulateurs photovoltaïques	7
I.2.1 Définition	7
I.2.2 Émulateurs PV: Concepts et réalisation	8
I.3 Etat de l'art des émulateurs photovoltaïques	9
I.3.1 L'émulateur à base de lampes	9
I.3.2 Circuits basés sur les amplificateurs opérationnels	9
A. Emulateur de source PV proposé par Baert	10
B. Emulateur de source de PV proposé par Nagayoshi	11
C. Emulateur de source de PV proposé par Easwarakhanthan	12
I.3.3 Circuits basés sur les régulateurs linéaires	13
A. Emulateur de source de PV proposé par Mukerjee et Dasgupta	14
B. Emulateur de source PV proposé par Lloyd	15
C. Emulateur de source PV proposé par Haeberlin et Borgna	16
I.3.4 Circuits basés sur des convertisseurs d'électronique de puissance	18
A. Emulateur de source PV proposé par Khouzam et Hoffma	18
B. Emulateur de source PV proposé par Sanchis (2003)	20
C. Emulateur PV propose par Koutroulis et autres (2007)	22
I.3 Conclusion	24
<u>Chapitre II Modélisation des cellules photovoltaïques</u>	
II-1 Introduction	26
II .2 Rappels sur la cellule photovoltaïque	26
II.2.1 Définition	26
II.2.2 Caractéristique électrique	27
II.2.2.1 Propriétés	27
II.2.2.2 Caractéristique courant-tension et schéma équivalent	27
II.2.3 Paramètres d'un panneau photovoltaïque	29
II.2.3.1 Courant de court-circuit, I_{CC}	29

II.2.3.2 Tension à circuit ouvert, V_{OC}	29
II.2.3.3 Point de fonctionnement optimum P_{max} (V_{max} , I_{max})	30
II.2.3.4 Facteur de forme FF	30
II.2.3.5 Le rendement	31
II.2.4 Association des cellules photovoltaïques	31
II.2.4.1 Association en série	31
II.2.4.2 Association en parallèle	32
II.3 Modélisation de la cellule photovoltaïque	32
II.3.1 Modèles électriques de la cellule PV	32
II.3.2 Modèles mathématique de la cellule PV	33
II.3.3 Etudes du modèle à une seule diode (5 paramètres L5P)	35
II.4 Simulation du modèle choisi(L5P)	36
II.4.1 Résultat de Simulation	37
II.4.1.1 Influence des résistances série et parallèle sur la cellule PV	38
II. 4.1.2 Influence de l'éclairement et la température sur les courbes $I=f(V)$ et $P=f(V)$	39
II.5 Générateur photovoltaïque	40
II.5 .1 Fonctionnement d'un Générateur PV à sa Puissance Maximale	41
II.5.1 .1 Principe	42
II.5.1.2 Étage d'Adaptation entre un Générateur PV et une Charge	42
II.5.3 Classification des commandes MPPT	44
II.6 Conclusion	46
<u>Chapitre III : Etude et simulation du hacheur Buck/Boost</u>	
III.1 Introduction	48
III.2 Hacheur à stockage inductif	48
III.2 .1 Principe de fonctionnement	49
III.3 Modélisation d'un convertisseur DC/DC (Hacheur buck-Boost)	50
III.3.1 Structure	50
III.2.3 Ondulation du courant i_L et de la tension u_C . (Choix de L et de C)	54
III.2.3.1 Ondulation du courant i_L et choix de L	54
III.2.3.2Ondulation de la tension u_C et Choix de C	54
III.2.4 Frontière entre le mode continu et intermittent	55
III.2.5 Conduction intermittente	55

III.2.5.1 Caractéristiques statique avec tension de sortie	57
III.3 .1 Application d'une commande en boucle ouverte	59
III.4 Conclusion	61
<u>Chapitre IV : Simulation de l'émulateur</u>	
IV.1 Introduction	63
IV.2 Schéma globale de l'émulateur photovoltaïque	63
IV.3 Principe de fonctionnement du contrôleur choisi	64
IV.4 résultats de simulation	66
IV.5 Conclusion	68
<u>Conclusion Générale</u>	70

Introduction Générale

Depuis le début du 21^{ème} siècle, la consommation énergétique mondiale est en très forte croissance dans toutes les régions du monde. Il semble que tendanciellement, les consommations d'énergie vont continuer à augmenter, sous l'effet de croissance économique d'une part, et de l'augmentation de la consommation d'électricité par habitant d'autre part, quels que soient les cas de figures envisagés. De nos jours, une grande partie de la production mondiale est à partir de ressources fossiles. La consommation de ces ressources donne lieu à des émissions de gaz à effet de serre et donc une augmentation de la pollution. Le danger supplémentaire est qu'une consommation excessive du stock de ressources naturelles réduit les réserves de ce type d'énergie de façon dangereuse pour les générations futures.

Pour subvenir aux besoins en énergie de la société actuelle, il est nécessaire de trouver des solutions adaptées et de les diversifier. Actuellement, il y a plusieurs façons d'agir :

- Diminuer la consommation des récepteurs d'énergie ;
- Améliorer et repenser la structure des récepteurs afin d'augmenter leurs rendements
- Augmenter la productivité des centrales énergétiques en améliorant respectivement leurs efficacité ;
- Trouver et développer de nouvelles sources d'énergie : l'utilisation et le développement des énergies renouvelables.

Dans le monde, nous projetons la consommation de d'électricité (TWh) pour le demi-siècle qui vient, sur une base d'une croissance annuelle de 2% par an. La figure 1 montre l'évolution des parts de l'électricité d'origine renouvelables (hydraulique, photovoltaïque, éolienne) pouvant satisfaire jusqu'à 60% de la consommation mondiale en 2050.

Le résultat est surprenant : bien que non mesurable aujourd'hui, la contribution du photovoltaïque devient significative à partir de 2025 en couvrant la totalité des toitures, elle présente 7% (1678 TWh/an) et pourrait atteindre 28% en 2050.

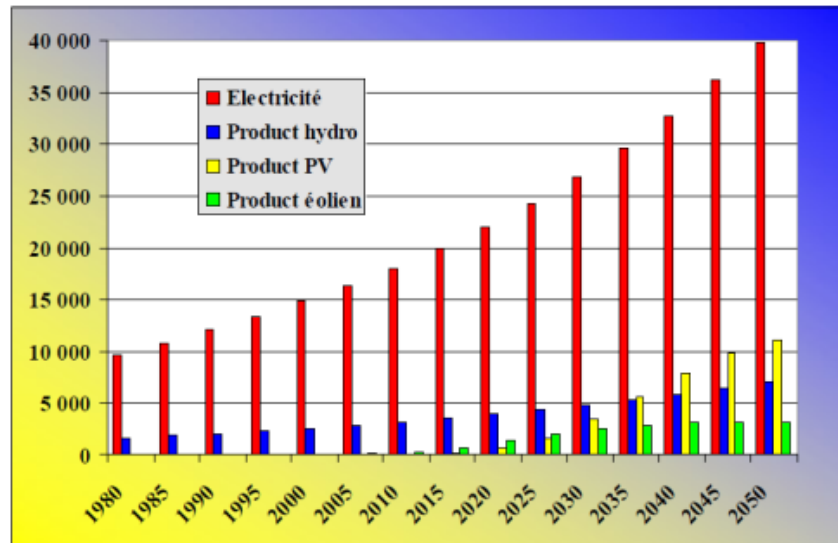


Figure 1 : Evolution des parts de l'électricité d'origine renouvelable

On considère qu'une énergie est renouvelable, toute source d'énergie qui se renouvelle assez rapidement pour être considérée comme inépuisable (d'où son nom). Les énergies renouvelables sont issues de phénomènes naturels réguliers ou constants provoqués principalement par le Soleil (l'énergie solaire mais aussi hydraulique, éolienne et biomasse...), la lune (énergie marémotrice, certains courants : énergie hydrolienne...) et la Terre (géothermique profonde...).

Le rayonnement solaire constitue la ressource énergétique la mieux partagée sur la terre et la plus abondante. La quantité d'énergie libérée par le soleil (captée par la planète terre) pendant une heure pourrait suffire à couvrir les besoins énergétiques mondiaux pendant plusieurs jours

Une partie de ce rayonnement peut être exploitée pour produire directement de la chaleur (solaire thermique) ou de l'électricité : c'est **l'énergie solaire photovoltaïque**. Ce mode de production ne nécessite pas de réseau de distribution. En effet, on peut produire de l'énergie électrique là où on la consomme :

- Villages isolés;
- Relais de communication ;
- Pompage de l'eau ;
- Refuges ;
- Maisons.

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 dans le premier chapitre de ce travail, nous allons présenter brièvement l'intérêt d'un émulateur, suivit d'un état de l'art concernant les dispositifs pouvant émuler des systèmes photovoltaïques.

Le second chapitre est consacré à la modélisation et à la simulation des cellules photovoltaïques dans une première partie. Ensuite à cet ensemble, un dispositif ayant pour rôle une extraction de la puissance maximum que peut fournir la station photovoltaïque est associé, une simulation globale sera réalisée.

Dans le troisième chapitre, nous allons étudier et simuler 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 convertisseur tout en fonctionnant que dans le premier quadrant a un double comportement il est au même temps élévateur et abaisseur.

Enfin le quatrième et dernier chapitre sera 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 finissons notre travail par une conclusion générale

I.1 Introduction

L'énergie solaire d'origine photovoltaïque offre des perspectives intéressantes. Depuis 2005 elle est classée comme la première source énergétique du futur. Elle est la solution la plus appropriée pour une installation en site isolé, ceci pour tous les niveaux de puissances demandés. Pour un bon dimensionnement de telles installations, une étude préalable est nécessaire. Cependant, les résultats obtenus exigent une validation par des expériences appropriées impliquant la source PV associée à leurs charges qui sont de divers genres, telles que les charges résistives, moteurs à C.C, batteries de stockages, et des onduleurs reliés à des récepteurs. Ces installations sont toujours munies d'un onduleur, fonctionnant au point de puissance maximum (MPPT) qui ont un rôle prépondérant, donc à prendre en considération en premier lieu.

L'analyse expérimentale des systèmes PV, particulièrement quand les circuits de conversion d'électronique de puissance sont présents, est un défi pour les chercheurs. En effet, un site alimenté par une centrale photovoltaïque a besoin d'une surface externe étendue, par conséquent des coûts élevés; rajouter à cela le fait que l'énergie produite dépend fortement des conditions atmosphériques qui sont aléatoires, on peut même ajouter le fait que de nos jours, la plupart des charges sont de nature non linéaires. En conclusion l'investissement nécessaire pour construire une plate forme d'essai est très onéreux. Le problème économique est aggravé par l'évolution continue des technologies impliquées. Par conséquent, les solutions de rechange à l'utilisation d'un site réel externe pour mener des tests afin de contrôler les algorithmes de commandes, comme ceux qui induisent des fonctionnements au point de puissance maximale « MPPT », sont nécessaires.

Dans ces cas on fait appel à des dispositifs capables d'émuler le système réel. Pour des sources PV avec une puissance jusqu'aux centaines de Watts, cette difficulté peut être surmontée en créant des conditions environnementales artificielles à l'intérieur du laboratoire. Cette solution peut impliquer l'utilisation des prétendus simulateurs solaires c'est-à-dire, des lampes appropriées ayant un spectre qui reproduit la lumière du soleil normale et peuvent remplacer ainsi le système photovoltaïque pour des essais d'intérieur qu'on peut répéter et préciser les caractéristiques. Toutefois pour des puissances du domaine de l'électrotechnique ces solutions ne sont d'aucun secours. 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.

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 à des mesures et à des essais d'être effectué, 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 optimal 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.

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

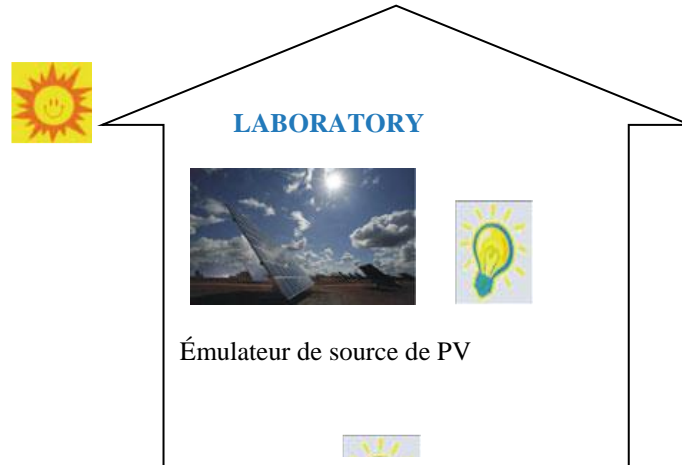


Figure (I- 1) : Illustration de la portée d'un émulateur de source PV

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 pouvant 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 ont montré qu'une flexibilité limitée dans l'impacte 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 commandé 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.

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.

I.3.2 Circuits 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 série et des convertisseurs de commutation, sont proposés. Nous allons présenter quelques exemples typiques.

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 figure (I-2).

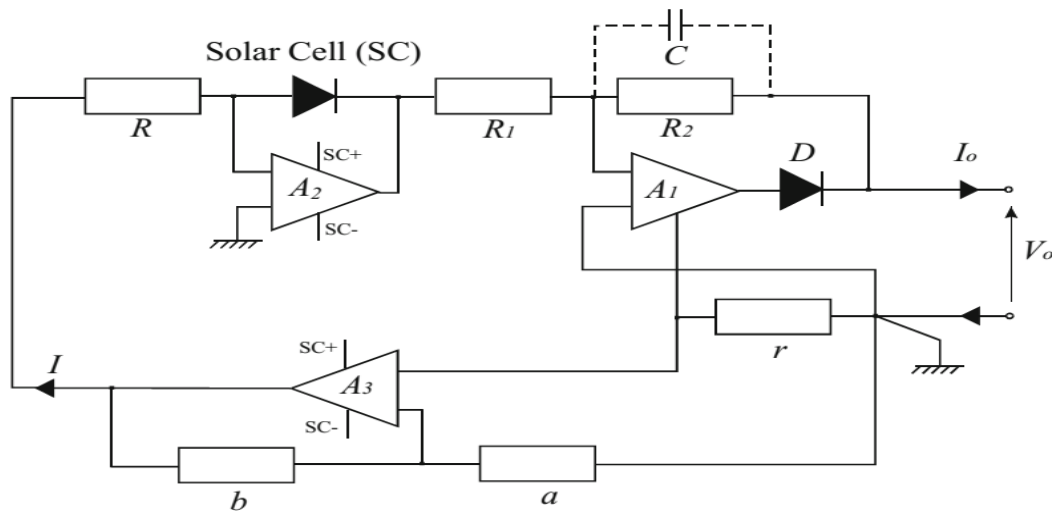


Figure (I- 2) : Schéma de l'émulateur de source PV proposé par Baert

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 désiré.

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 amplifiés, 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.

C. Emulateur de source de 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

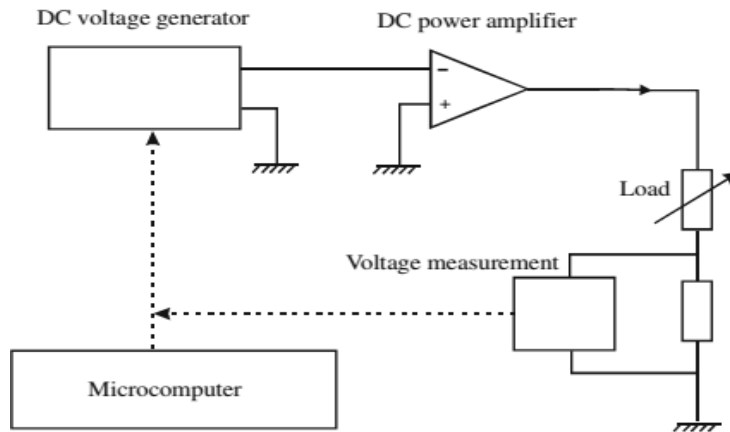


Figure (I- 4) : Principe de l'émulateur de source de PV proposé par Easwarakhanthan

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 à priori de la courbe de fonctionnement de la charge connectée. C'est à dire que la connaissance de l'impédance de récepteur est importante.

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 rugueux, peut être également obtenu avec une série de résistances.

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-5).

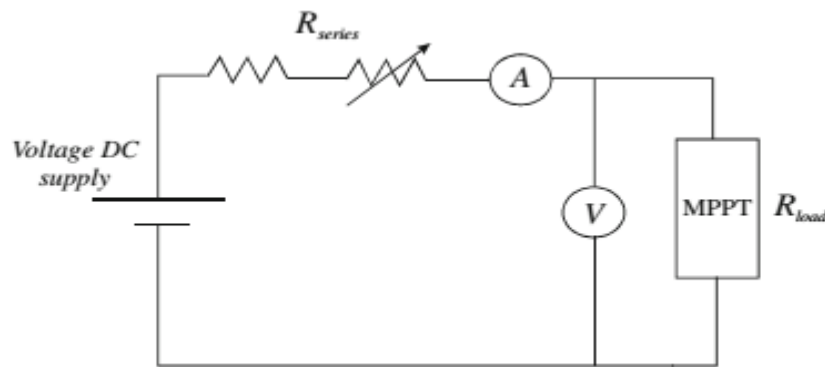


Figure (I- 5) : Emulateur de source de PV proposé par Mukerjee et Dasgupta

Si la résistance indiquée comme $R_{série}$ 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 $R_{série}$ est convenablement modifiée, s'assurant qu'une résistance finie est toujours en série avec la source d'alimentation, pour éviter d'éventuels dommages possibles.

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 reliés 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- 6).

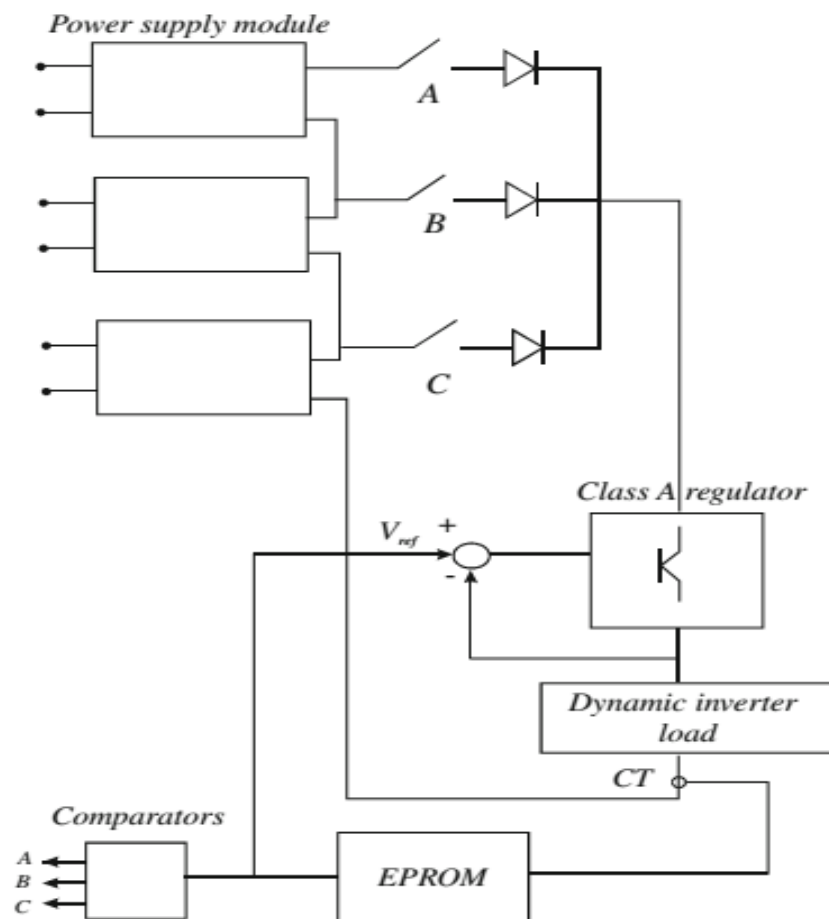


Figure (I- 6) : Emulateur de source PV proposé par Lloyd

Le régulateur de la classe A produit une tension de sortie, selon les caractéristiques (I, V) contenues dans l'EPRROM, 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 reliés 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'EPRROM cela donne une valeur désirée du courant de charge.
2. Régulateur de tension: dans ce cas l'EPRROM délivre la tension de référence, $V_{\text{réf}}$.

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

C. 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-7).

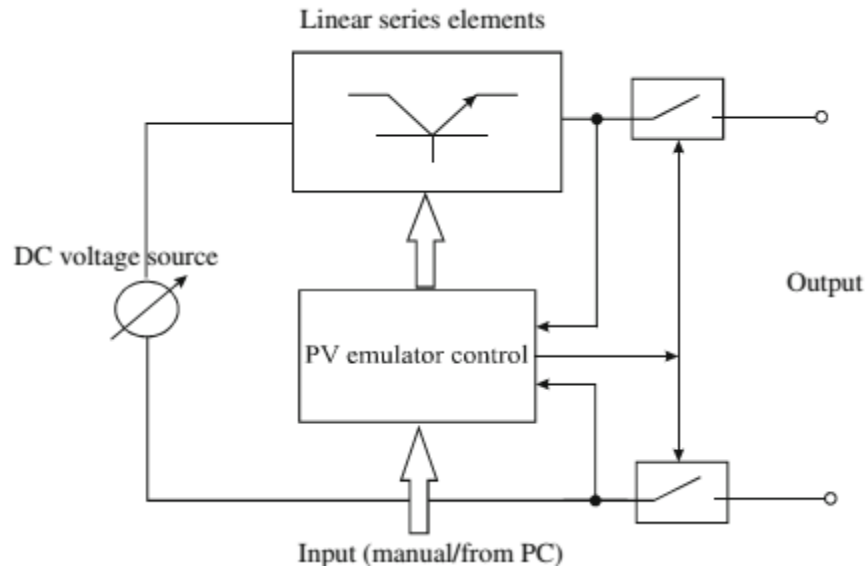


Figure (I- 7) : Schéma descriptif d'émulateur de source PV
Proposé par Haeberlin et Borgna

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'Emulateur est limité. Ce si 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, reste plus élevé 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.

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 en 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.

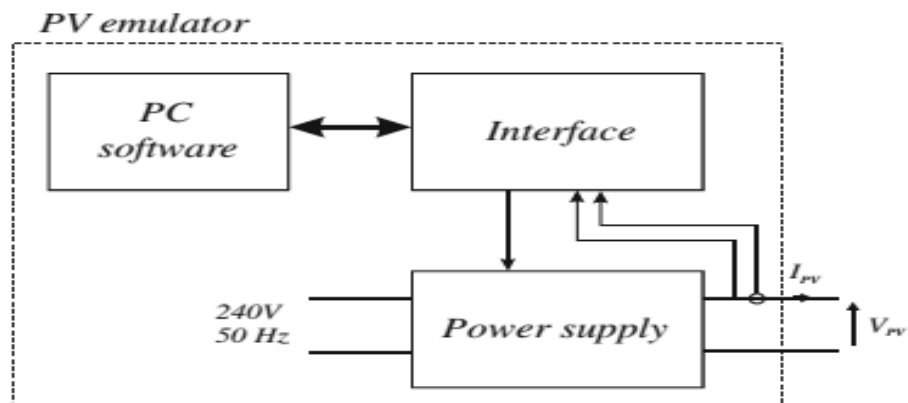


Figure (I- 8) : Principe d'un émulateur basé sur l'électronique de puissance

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.

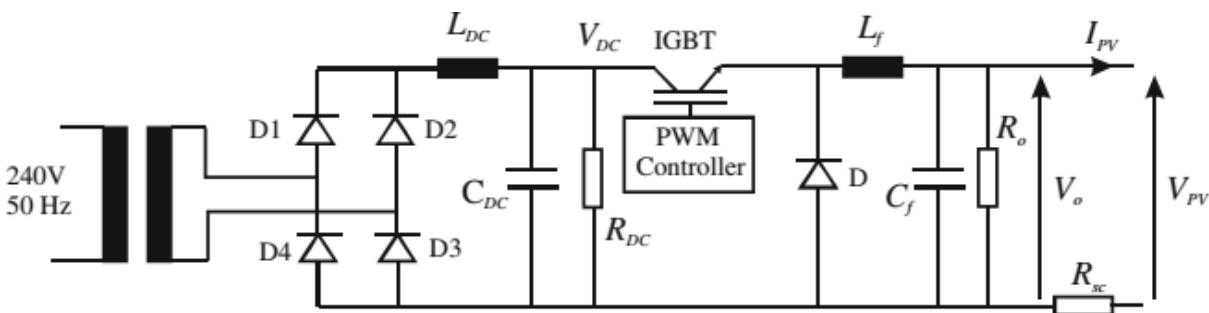


Figure (I- 9) : Détails du bloc d'alimentation d'énergie (émulateur de PV proposé par Khouzam et Hoffman)

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-8) montre le schéma synoptique de l'émulateur PV. Les détails des blocs sont indiqués sur la figure (I-9)

La tension d'alimentation est réduite par un transformateur d'isolement, ensuite redressé et filtré pour créer une tension continue constant 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 descendant 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.

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 courbe 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.

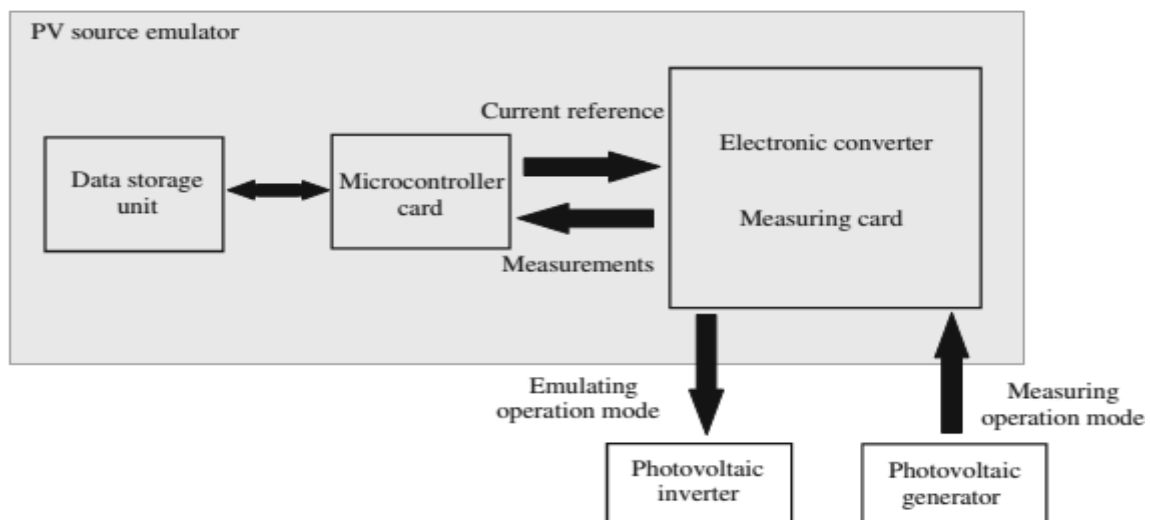


Figure (I-10) : Description globale de l'émulateur de source PV proposé par Sanchis et autres

Une description globale du système est donnée à la figure (I-10),

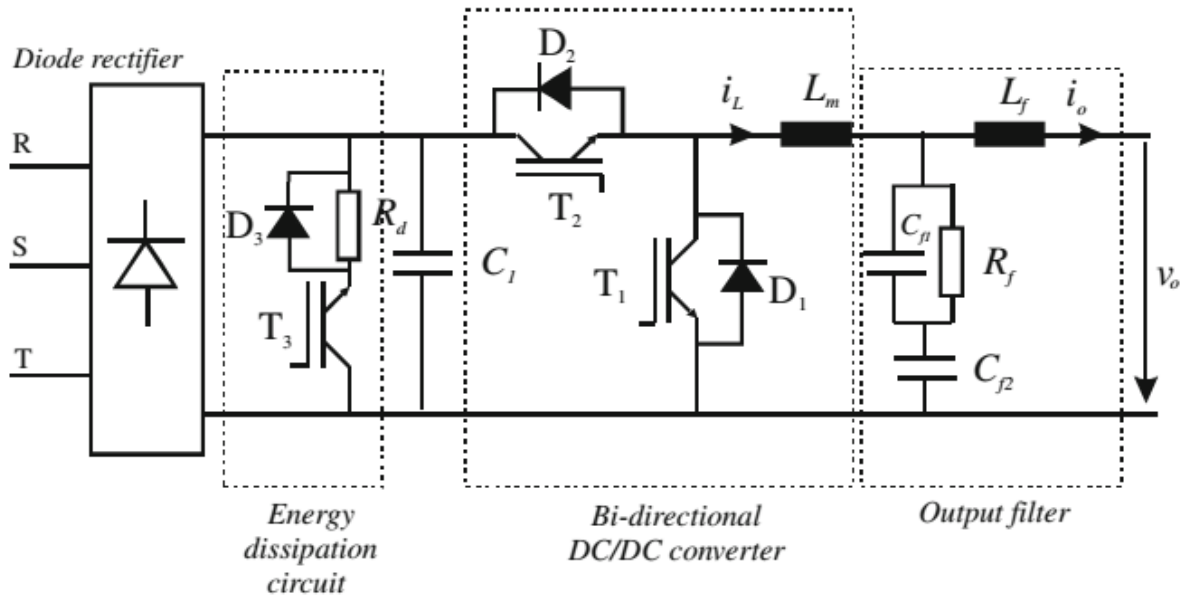


Figure (I- 11) : Circuit de puissance de l'émulateur de source PV proposé par Sanchis

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 fourni 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.

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

Récemment, des émulateurs PV basés sur des convertisseurs DC/ DC contrôlés par Field Pro-Programmable 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-12) schématise son principe.

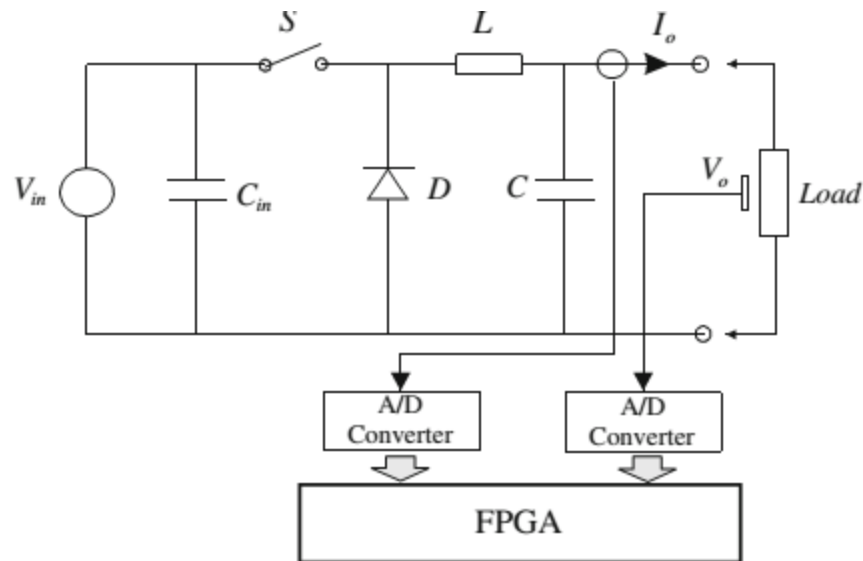


Figure (I- 12) : Arrangement de circuit de PVAE proposé près Koutroulis et autres

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' luminosité
- 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 opérationnelle 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.

I.3 Conclusion

À 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.

II-1 Introduction

Pour faire l'étude d'un émulateur photovoltaïque, la première chose est la bonne connaissance du comportement pour le site choisi des panneaux photovoltaïques, exigés 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. Selon cette philosophie plusieurs modèles électriques ont été proposés pour représenter une cellule photovoltaïque.

II .2 Rappels sur la cellule photovoltaïque

II.2.1 Définition

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.

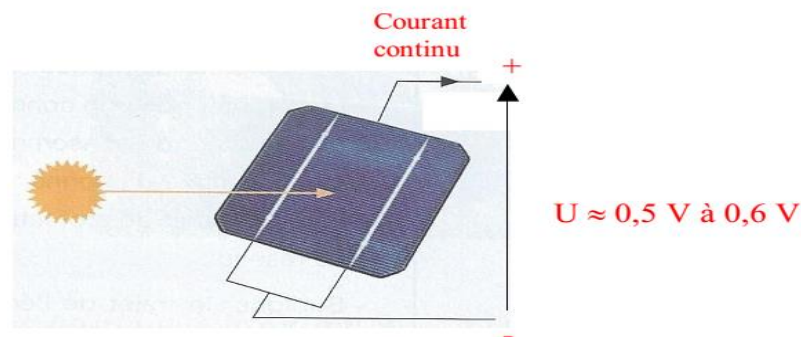


Figure (II.1) : Cellule photovoltaïque

II.2.2 Caractéristique électrique

II.2.2.1 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 QII et le quadrant QIV la cellule PV fonctionnent 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 QI, 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 premier quadrant.

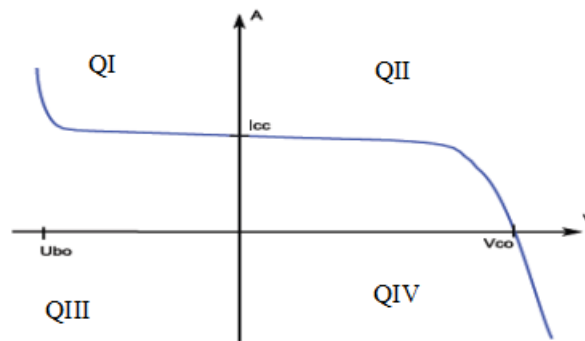


Figure (II-2) : Caractéristique (I, V) d'une cellule photovoltaïque.

II.2.2.2 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 Pm 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.

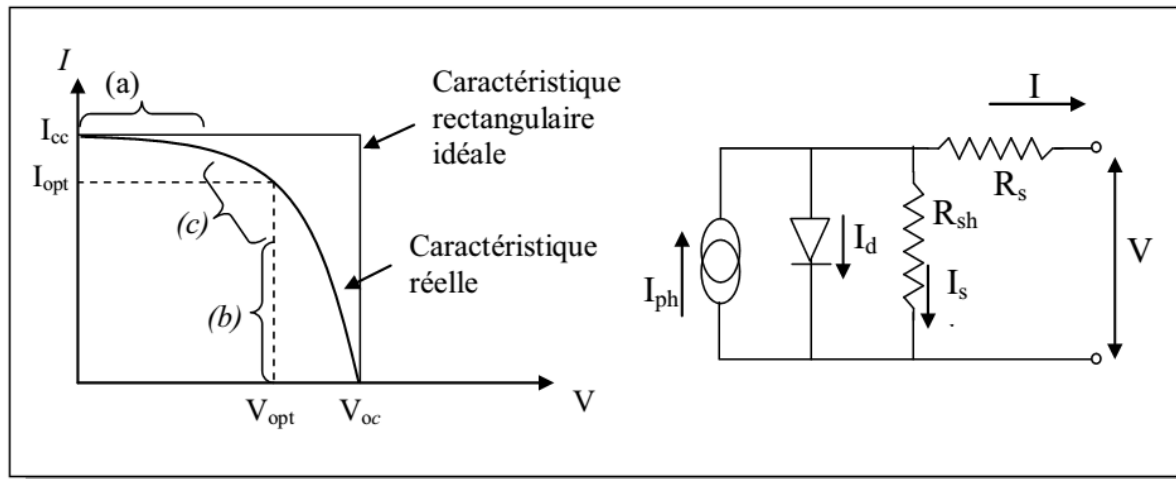


Figure (II-3) : Caractéristique et schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque réelle.

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.

II.2.3 Paramètres d'un panneau photovoltaïques

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.

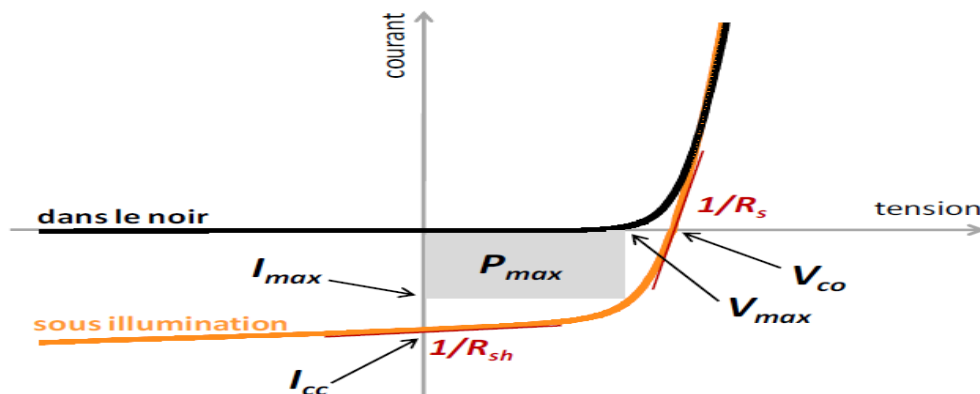


Figure (II-4): Caractéristique courant-tension et paramètres physiques d'une cellule photovoltaïque.

II.2.3.1 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.

II.2.3.2 Tension à circuit ouvert, V_{oc}

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.

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

Avec :

$\frac{KT_c}{q}$: représente la potentielle thermodynamique

T_c : la température absolue

q : la constante de charge d'électron, $1.602 \cdot 10^{-23} C$

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

I_{ph} : le courant photonique

I_s : le courant de saturation

II.2.3.3 Point de fonctionnement optimum Pmax (Vmax, Imax)

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

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

II.2.3.4 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 maximum idéal. 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:

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

II.2.3.5 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.

II.2.4 Association des cellules photovoltaïques

II.2.4.1 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.

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

La figure (II-4) montre la caractéristique résultante obtenue en associant en série n_s cellules identiques.

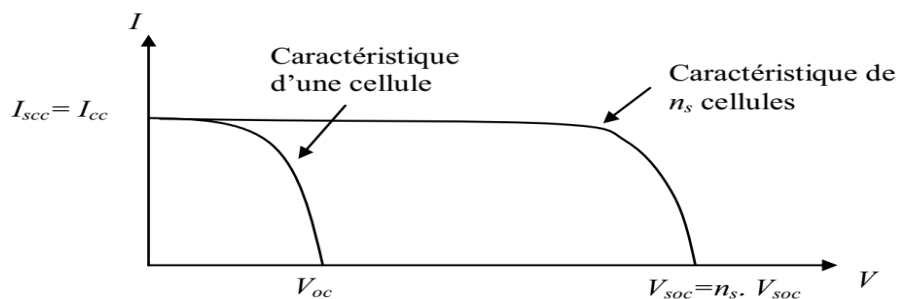


Figure (II-5) : Caractéristique résultante d'un groupement en série de n_s cellules identiques

II.2.4.2 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.

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

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

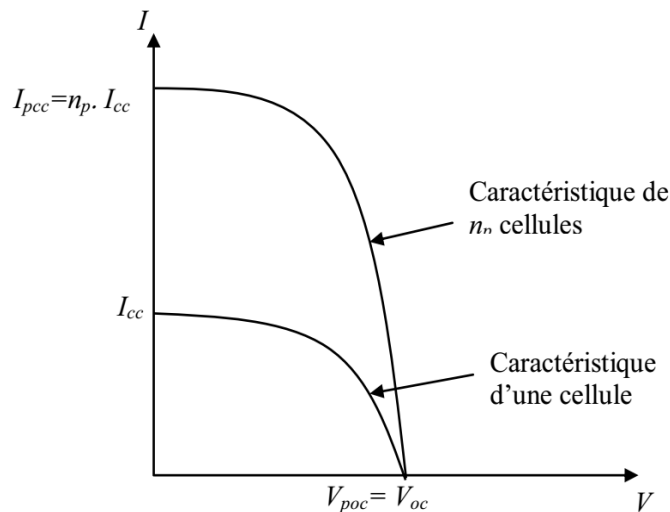


Figure (II-6): Caractéristique résultante d'un groupement en parallèle de n_p cellules identiques

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 existe plusieurs

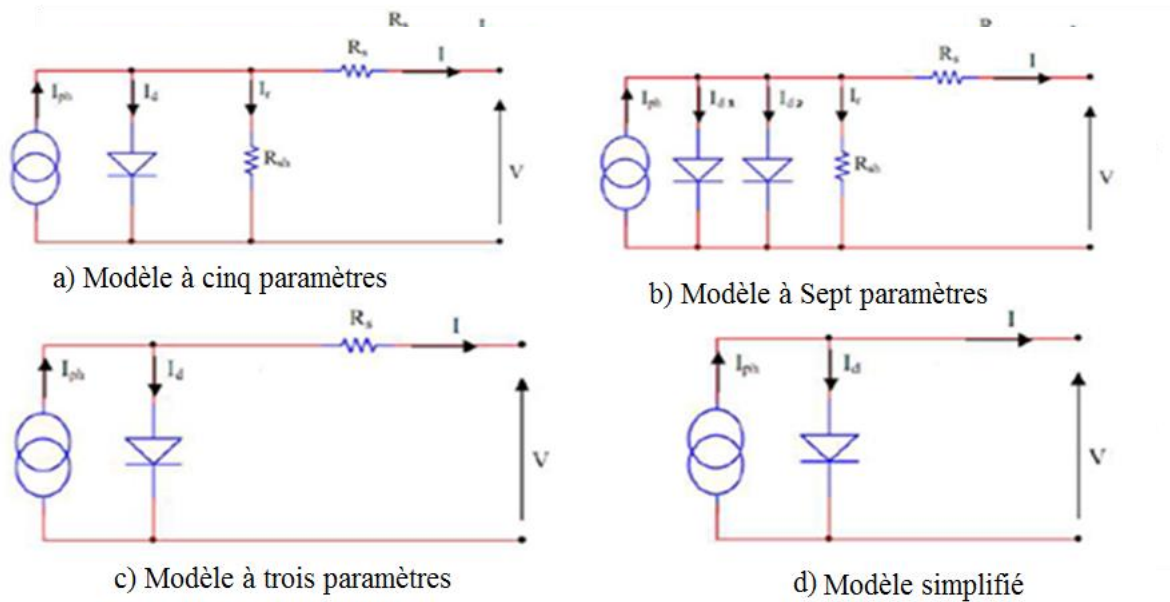


Figure (II-7) Modèles électriques de la cellule PV

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).

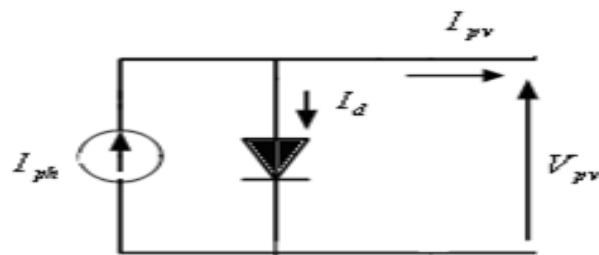


Figure (II-8) : Schéma équivalent simple d'une cellule photovoltaïque

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)

$$I_{pv} = I_{ph} - I_d \tag{II-7}$$

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 générer

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 ($k=1.38 \cdot 10^{-23} \text{J/K}$)

q : la constante de charge élémentaire ($q=1.6 \cdot 10^{-19} \text{C}$)

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

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.

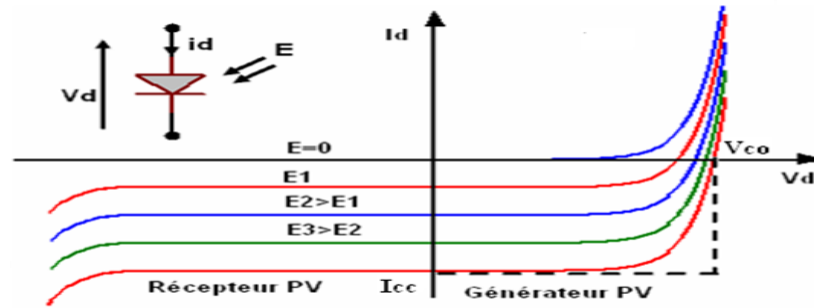


Figure (II-9) : Caractéristique (I, V) d'une cellule PV sous différents éclairagements E_i

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 choisis celui d'une seule diode.

II.3.3 Etudes 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_{s0} . 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.

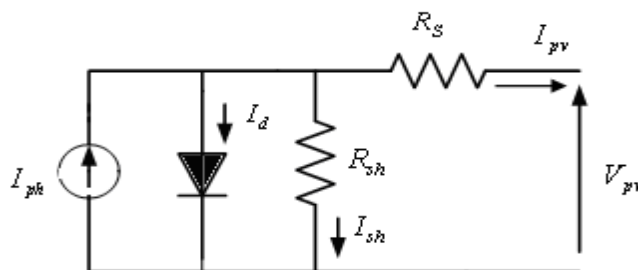


Figure (II-10) : Schéma équivalent d'un modèle à une diode (L5p) de la cellule [6]

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 : $R V_t = \frac{K T_c}{q}$: Résistance parallèle 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.

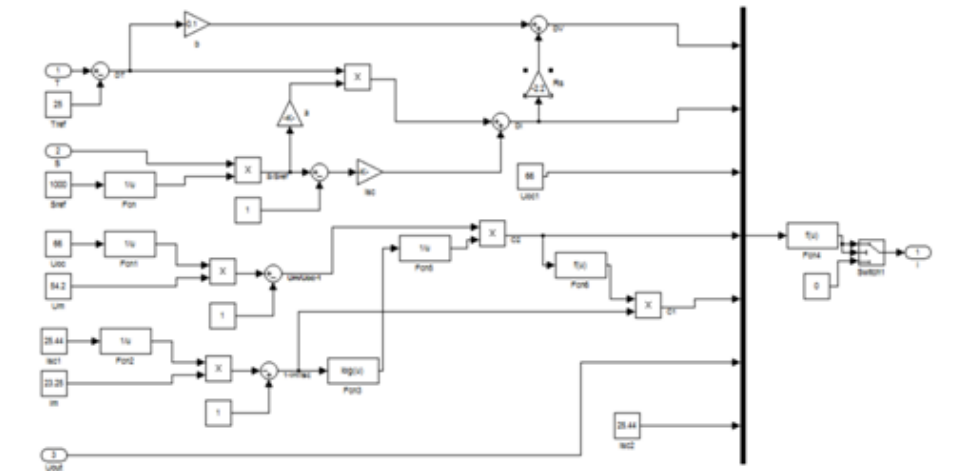


Figure (II-11) : Schéma de générateur PV en MATLAB-SIMULINK

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

Éclairement 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».

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

II.4.1 Résultat de Simulation

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

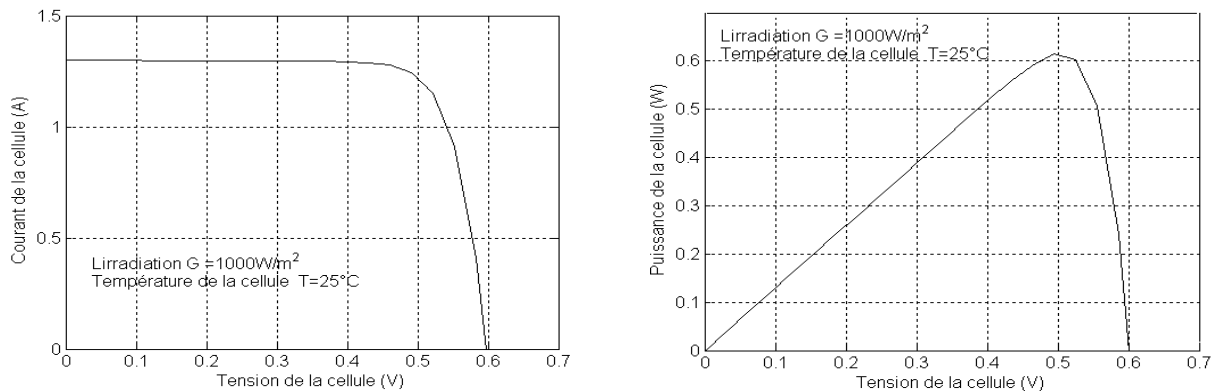


Figure (II-12) : Caractéristique $I(V)$ et $P(V)$ d'une cellule photovoltaïque, L5P.

II.4.1.1 Influence des résistances série et parallèle sur la cellule PV

A partir du circuit équivalent d'une photopile réelle, on constate que d'autant la résistance série est faible et la résistance shunt est grande, on collecte un maximum de courant ce qui implique un maximum de puissance. La figure (II-12) (a, b) illustre respectivement les caractéristiques (I, V) et (P, V) pour différentes résistances série. La figure (II-13) (a, b) montre respectivement les caractéristiques (I, V) et P-V pour différentes résistances shunt. En augmentant R_s ou en diminuant R_{sh} , on s'éloigne du rectangle idéal V_{oc} , I_{cc} de la caractéristique (I, V) qui correspond au $FF = 1$ et de même la puissance diminue.

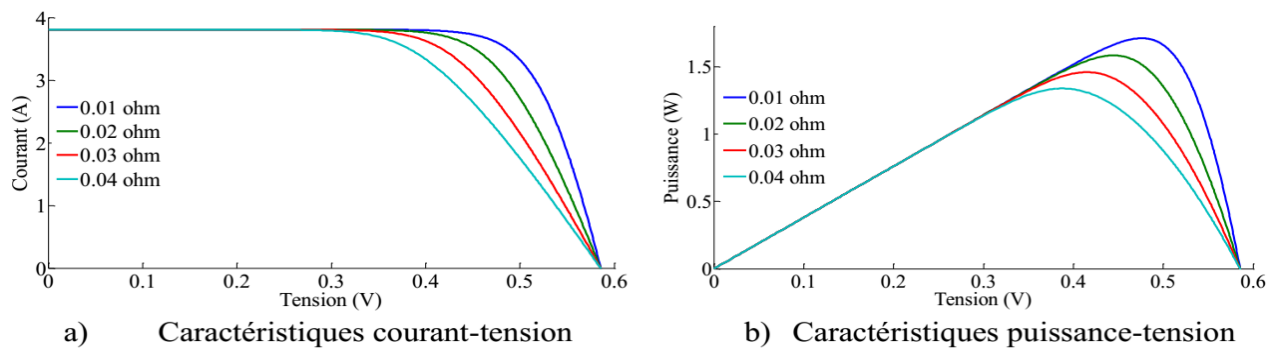


Figure II-12 : Influence de la résistance série sur les caractéristiques PV.

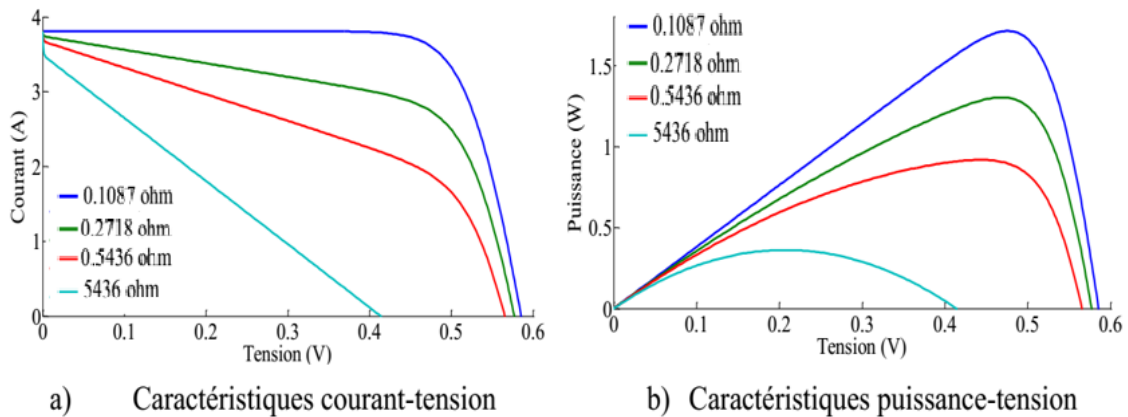


Figure (II-13) : Influence de la résistance shunt sur les caractéristiques PV.

II. 4.1.2 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 $P(V)$.

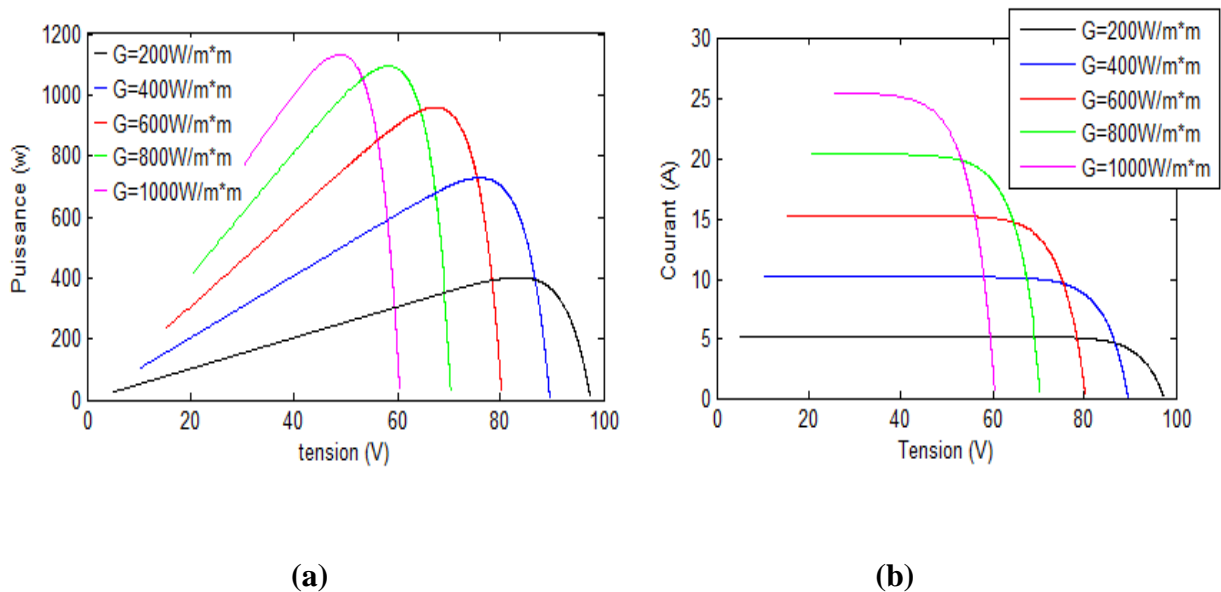


Figure (II-14) : L'influence de l'éclairement sur les caractéristiques $I=f(V)$ (a) et $P=f(V)$ (b)

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 ouverte. Quand la température augmente la tension de circuit ouverte 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 $P=f(V)$.

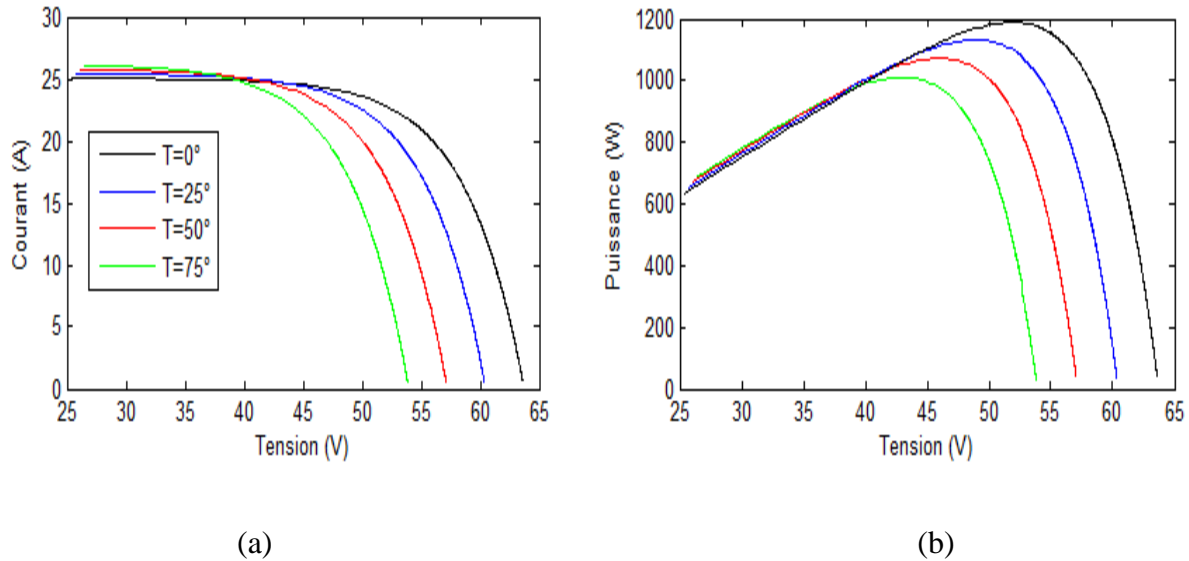


Figure (II-15) : L'influence de la température sur les caractéristiques $I=f(V)$ (a) et $P=f(V)$ (b)

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.

II.5.1 Fonctionnement d'un Générateur PV à sa Puissance Maximale

II.5.1.1 Principe

La conception globale de systèmes photovoltaïques optimisés est par nature difficile. En effet, Côté source, pour un générateur photovoltaïque (PV), la production de puissance varie fortement en fonction de l'éclairement, de la température, mais aussi du vieillissement global du système. Souvent, le comportement de la charge varie brutalement en fonction de la consommation des utilisateurs, ce qui est souvent difficile à prévoir surtout sur des petits réseaux locaux. Ainsi, pour qu'une connexion source-charge soit possible, un point de fonctionnement correspondant à l'intersection des caractéristiques électriques doit exister. Pour mieux comprendre ceci, prenons par exemple le cas d'une connexion directe entre un générateur PV et une charge. Nous regardons l'influence de la nature de la charge qu'elle soit une simple charge résistive R ou bien même une batterie, comme illustré dans la figure (II-16) où les points PPM1 et PPM2 correspondent au fonctionnement optimal du générateur PV.

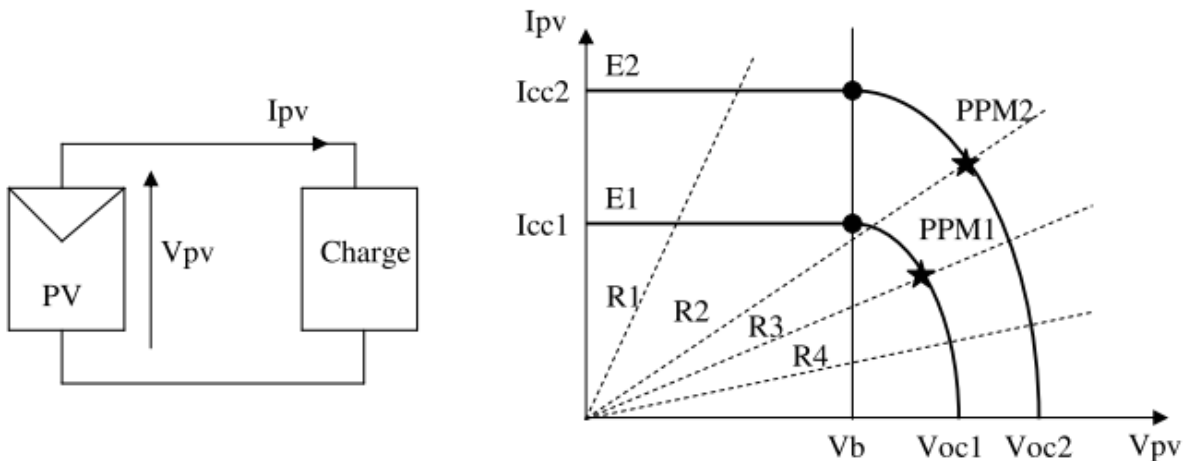


Figure (II-16) : a) Connexion électrique directe entre un générateur PV et une charge.

b) Points de fonctionnements résultant de l'association du générateur PV sous deux niveaux d'éclairements ($E1$, $E2$) avec une charge soit résistive R variable ($R1$, $R2$, $R3$, $R4$) ou bien d'une batterie (V_b).

Comme nous pouvons le constater sur la figure (II-16) (b), le fonctionnement du générateur PV dépend fortement des caractéristiques de la charge à laquelle il est associé. En effet, pour la charge résistive de différentes valeurs, l'adaptation optimale ne se produit que pour un seul point de fonctionnement particulier, nommé Point de Puissance Maximal (PPM), il est

noté dans notre cas PPM1 et PPM2. Ceux-ci correspondent à la puissance maximale que peut délivrer un générateur PV pour une courbe $I(V)$ donnée. Pour la charge de type batterie, le point de connexion source-charge n'est pas optimal. Ainsi, lorsque l'on réalise une connexion directe source-charge, le rendement de l'ensemble est alors rarement optimal.

II.5.1.2 Étage d'Adaptation entre un Générateur PV et une Charge

Un GPV présente des caractéristiques $I(V)$ non linéaires avec des PPM. Ces caractéristiques dépendent entre autre du niveau d'éclairement et de la température de la cellule. De plus, selon les caractéristiques de la charge sur laquelle le GPV débite, nous pouvons trouver un très fort écart entre la puissance potentielle du générateur et celle réellement transférée à la charge en mode connexion directe.

Afin d'extraire à chaque instant le maximum de puissance disponible aux bornes du GPV et de la transférer à la charge, la technique utilisée classiquement est d'utiliser un étage d'adaptation entre le GPV et la charge comme décrit dans la figure (II-17). Cet étage joue le rôle d'interface entre les deux éléments en assurant à travers une action de contrôle, le transfert du maximum de puissance fournie par le générateur pour qu'elle soit la plus proche possible de P_{MAX} disponible.

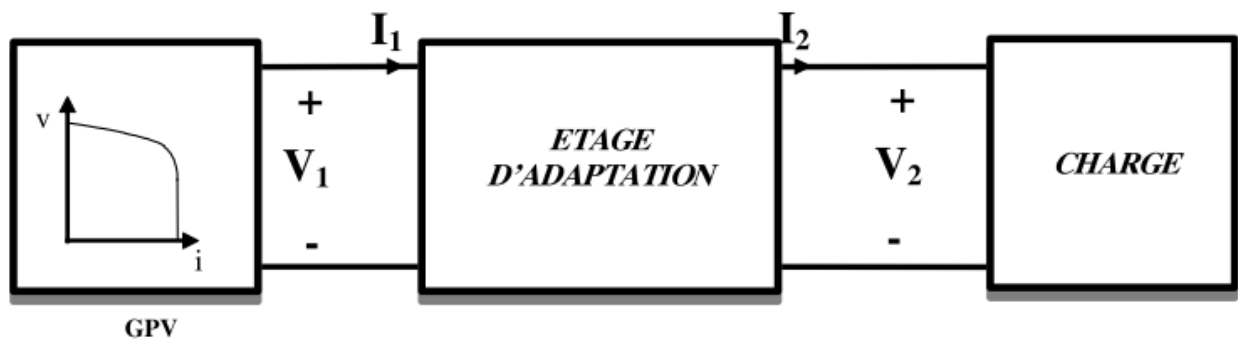


Figure (II-17): Etage d'adaptation jouant le rôle d'interface de puissance entre un GPV et une charge pour le transfert de P_{MAX} du GPV

Ce dernier par le biais d'une commande spécifique est alors susceptible de permettre au générateur de délivrer sa puissance maximale notée P_{max} ($P_{max} = V_{opt}I_{opt}$, où V_{opt} et I_{opt} représentent respectivement les tensions et courants optimaux du générateur PV pour une courbe

I (V) donnée) tout en assurant que la tension ou bien le courant de la charge correspond bien aux caractéristiques de cette dernière.

II.5.2 Principe de la recherche du point de puissance maximale (MPPT)

La chaîne de puissance d'un GPV où une charge DC est alimentée par un générateur à travers un convertisseur statique (CS) commandé par une MPPT peut être représentée comme indiquée sur la figure (II-18). La commande MPPT fait varier le rapport cyclique du CS de telle sorte que la puissance fournie par le GPV soit le P_{MAX} disponible à ses bornes. L'algorithme MPPT peut être plus ou moins compliqué pour rechercher le PPM, mais en général il est basé sur la variation du rapport cyclique du CS jusqu'à se placer sur le PPM en fonction des évolutions des paramètres d'entrée du CS (I_{PV} et V_{PV}). La figure (II-18) représente une chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque élémentaire associée à une commande MPPT. Pour simplifier les conditions de fonctionnement de cette commande, une charge DC est choisie. Comme nous pouvons le voir sur cette chaîne, la commande MPPT est nécessairement associée à un quadripôle possédant des degrés de liberté qui permettent de pouvoir faire une adaptation entre le GPV et la charge. Dans le cas de la conversion solaire, le quadripôle peut être réalisé à l'aide d'un convertisseur DC-DC de telle sorte que la puissance fournie par le GPV correspond à la puissance maximale (P_{MAX}) qu'il génère et qu'elle puisse ensuite être transférée directement à la charge.

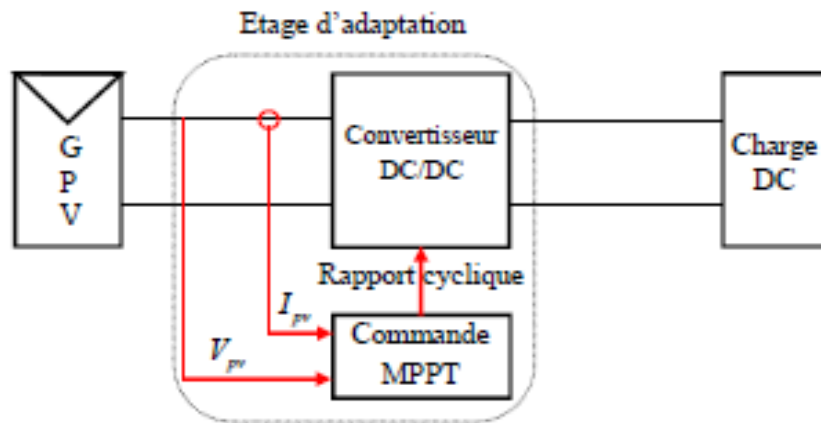


Figure (II-18): Connexion GPV-charge à travers un convertisseur DC/DC.

II.5.3 Classification des commandes MPPT

Nous pouvons classifier d'une manière générale les commandes MPPT selon le type d'implémentation électronique: analogique, numérique ou mixte. Il est cependant plus intéressant de les classifier selon le type de recherche qu'elles effectuent et selon les paramètres d'entrée de la commande MPPT. Bien qu'il existe un grand nombre de publications scientifiques qui présentent des commandes MPPT plus ou moins complexes, nous nous centrerons sur la méthode de "Perturbation et Observation" (P&O).

La méthode de "Perturbation et Observation" (P&O) est l'algorithme de poursuite du PPM le plus utilisé, et comme son nom l'indique il est basé sur la perturbation du système par l'augmentation ou la diminution de V_{ref} où en agissant directement sur le rapport cyclique du convertisseur DC-DC. Puis l'observation de l'effet sur la puissance de sortie du panneau. Si la valeur de la puissance actuelle $P(k)$ du panneau est supérieure à la valeur précédente $P(k-1)$ alors on garde la même direction de perturbation précédente sinon on inverse la perturbation du Cycle précédent. La figure (II-19) représente l'algorithme classique associé à une commande MPPT de type P&O, où l'évolution de la puissance est analysée après chaque perturbation de tension. Pour ce type de commande, deux capteurs (courant et tension du GPV) sont nécessaires pour déterminer la puissance du PV à chaque instant.

D : rapport cyclique.

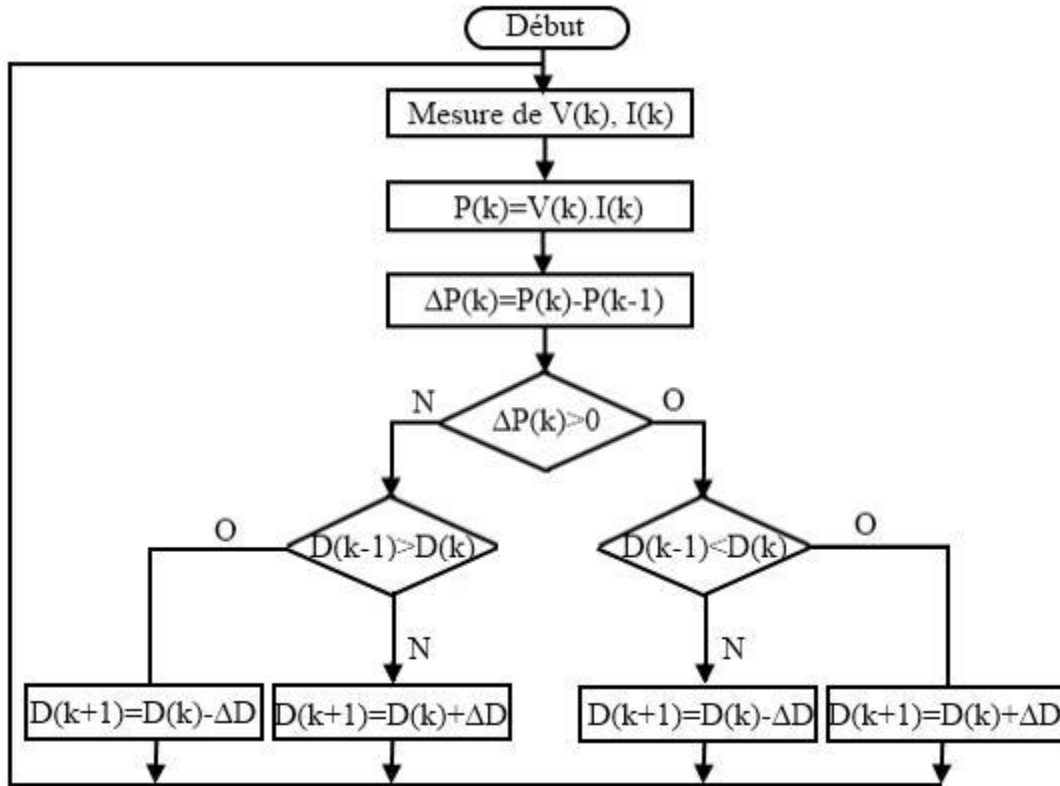


Figure (II-19): Algorithme de la méthode P&O.

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

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. Pour que le module fournisse sa puissance maximale disponible il faut une adaptation permanente de la charge avec le générateur photovoltaïque. Cette adaptation pourra être réalisée par l'insertion d'un convertisseur DC-DC (hacheur) contrôlé par un mécanisme de poursuite «Maximum Power Point Tracking» (MPPT), pour tester un algorithme de cheminement de point de puissance maximum (MPPT) 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, l'émulateur.

III.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 mises en 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 convertisseur ou step-down/up convertisseur).

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

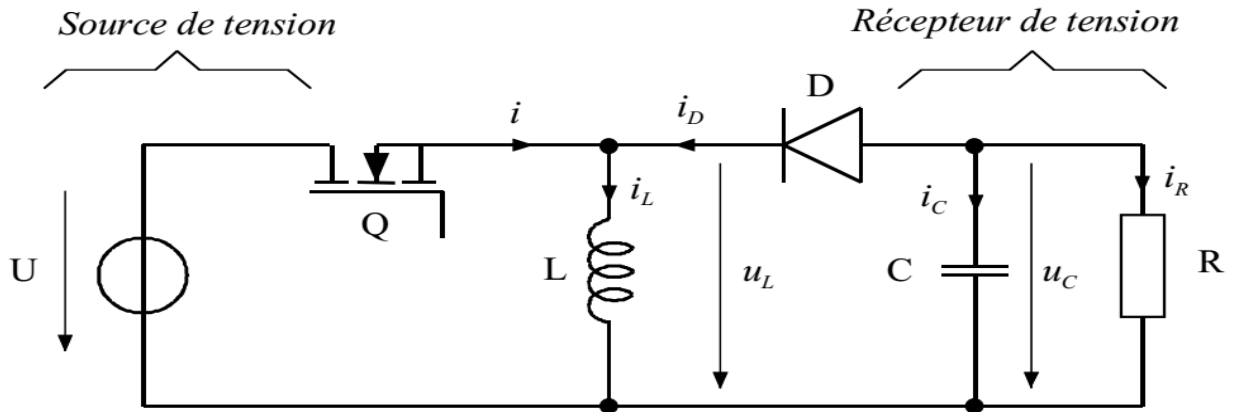


Figure (III-1) : Représentation schématique d'une alimentation à stockage inductif

III.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.

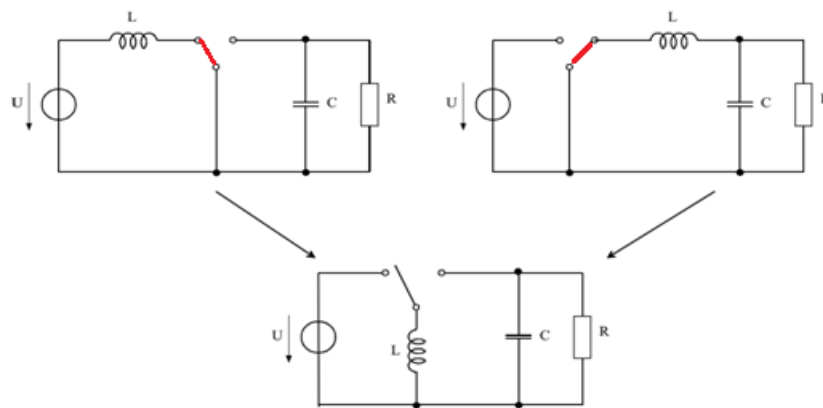


Figure (III-2) : Combinaison des alimentations

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 positif. 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 analysée en fonction de l'état *ON* ou *OFF* des interrupteur

III.3 Modélisation d'un convertisseur DC/DC (Hacheur buck-Boost) :

III.3.1 Structure :

Si la fréquence est suffisamment élevée, l'ondulation de la tension au borne du condensateur sera faible, donc la tension à ces borne peut être assimilé a une f.e.m E' .

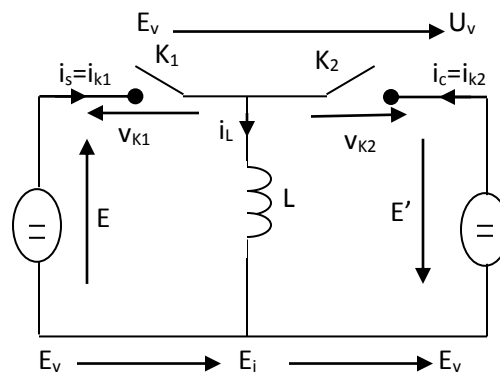


Figure (III-3) : Structure d'un hacheur à accumulation inductive avec interrupteurs

-Quand K_1 est fermé :

$$\begin{cases} v_{K1} = 0 \\ i_{K1} = i_L \end{cases} \quad (\text{III-1})$$

$$\begin{cases} v_{K2} = -(E + E') \\ i_{K2} = 0 \end{cases} \quad (\text{III-2})$$

-Quand K_2 est fermé

$$\begin{cases} v_{K1} = +(E + E') \\ i_{K1} = 0 \end{cases} \quad (\text{III-3})$$

$$\begin{cases} v_{K2} = 0 \\ i_{K2} = i_L \end{cases} \quad (\text{III-4})$$

Il faut *que* k_2 soit une diode « D » et k_1 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.

$$\begin{cases} i_s = i_h = i_L \\ i_c = 0 \\ v_d = -(E + E') \end{cases} \quad (\text{III-5})$$

Pour $\alpha T < t < T$, D conduit, H bloqué.

$$\begin{cases} i_L = i_c = i_d \\ i_s = 0 \\ v_h = +(E + E') \end{cases} \quad (\text{III-6})$$

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:

$$I_s = \alpha I_L, I_c = (1 - \alpha) I_L \quad (\text{III-7})$$

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

$$\frac{E'}{E} = \frac{I_s}{I_c} = \frac{\alpha}{(1 - \alpha)} \quad (\text{III-8})$$

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.

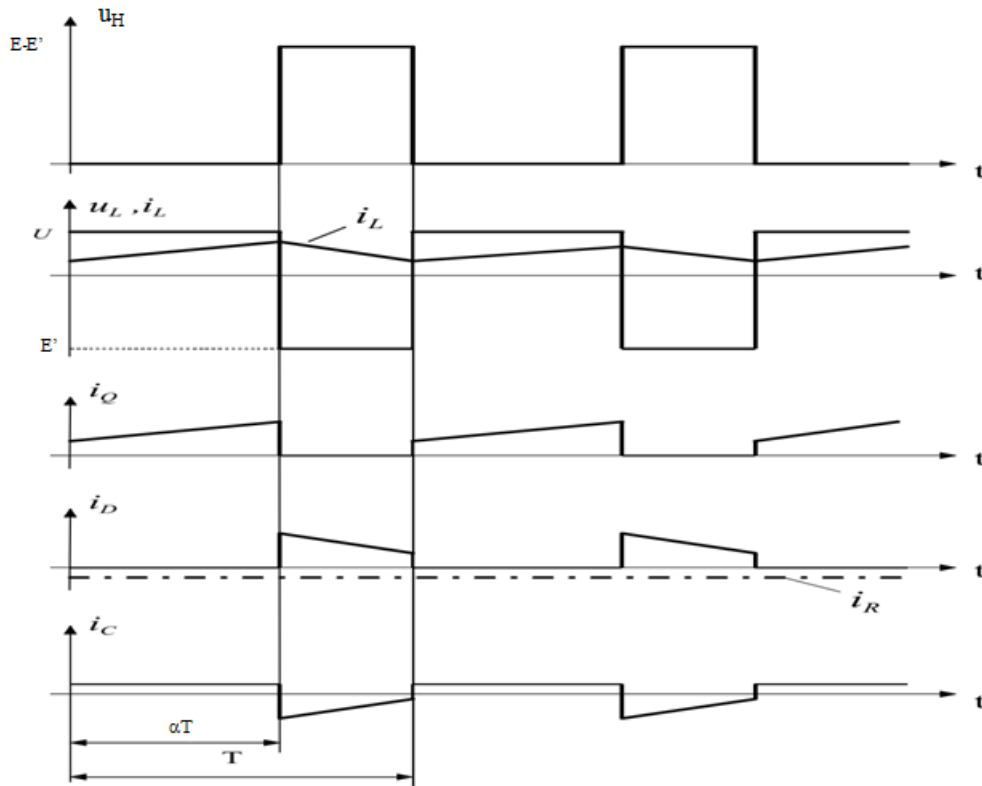


Figure (III-4) : Forme d'onde aux bornes des différents éléments du hacheur

Puisque $V_{Lmoy}=0$

$$\alpha TE = (1 - \alpha).T.E' \quad \Rightarrow \quad E' = \frac{\alpha}{1 - \alpha} E \quad (III-9)$$

Tous les résultats importants sont résumés sur le tableau suivant :

Relations générales en conduction continue

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 aux bornes de 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.2.3 Ondulation du courant i_L et de la tension u_C . (Choix de L et de C)

III.2.3.1 Ondulation du courant i_L et choix de L

La relation (III-10) donne l'ondulation de courant dans l'inductance en conduction continue et en fonction du rapport cyclique α :

$$\Delta I_L = i_{LMAX} - i_{LMIN} = \frac{U.T}{L} \cdot \alpha \quad (\text{III-10})$$

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

$$L \geq \frac{T \cdot U}{\Delta I_{Lmax}} \quad (\text{III-11})$$

III.2.3.2 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

$$\Delta U_C = \frac{\Delta Q}{C} = -\frac{I_R \cdot \alpha T}{C} = -\frac{U_C}{R} \cdot \frac{\alpha T}{C} \quad (\text{III-12})$$

L'ondulation relative découle directement de la relation précédente

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

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

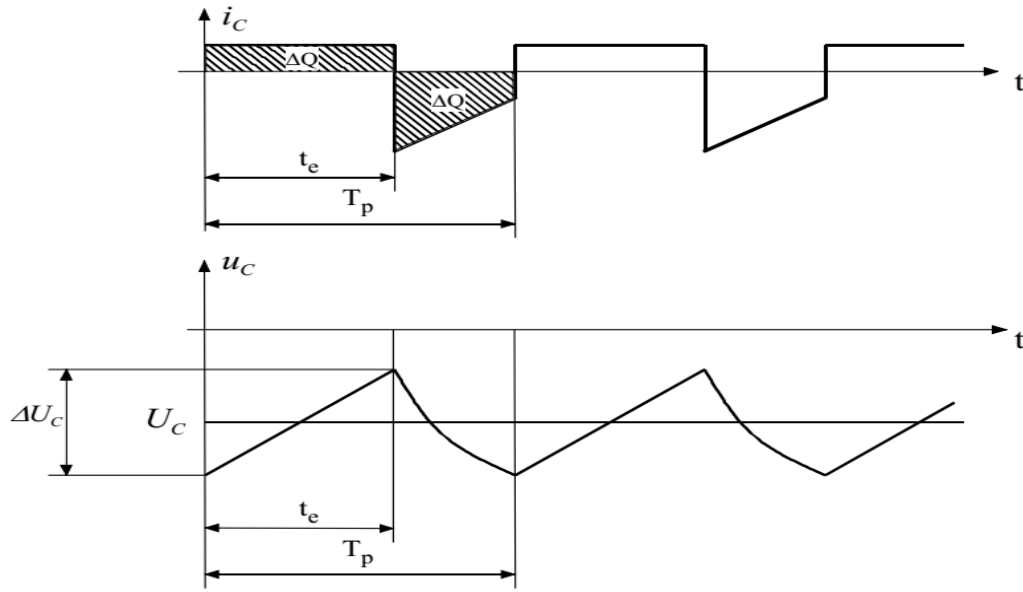


Figure (III-5) : Ondulation de la tension de sortie

III.2.4 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

$$I_{L\ LIM} = \frac{1}{2} \cdot \Delta I_L = -\frac{1}{2} \cdot \frac{U_c \cdot T}{L} \cdot (1 - \alpha) \quad (\text{III-14})$$

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

$$I_{R\ LIM} = -I_{L\ LIM} \cdot (1 - \alpha) = \frac{1}{2} \cdot \frac{U_c \cdot T}{L} \cdot (1 - \alpha)^2 \quad (\text{III-15})$$

III.2.5 Conduction intermittente

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

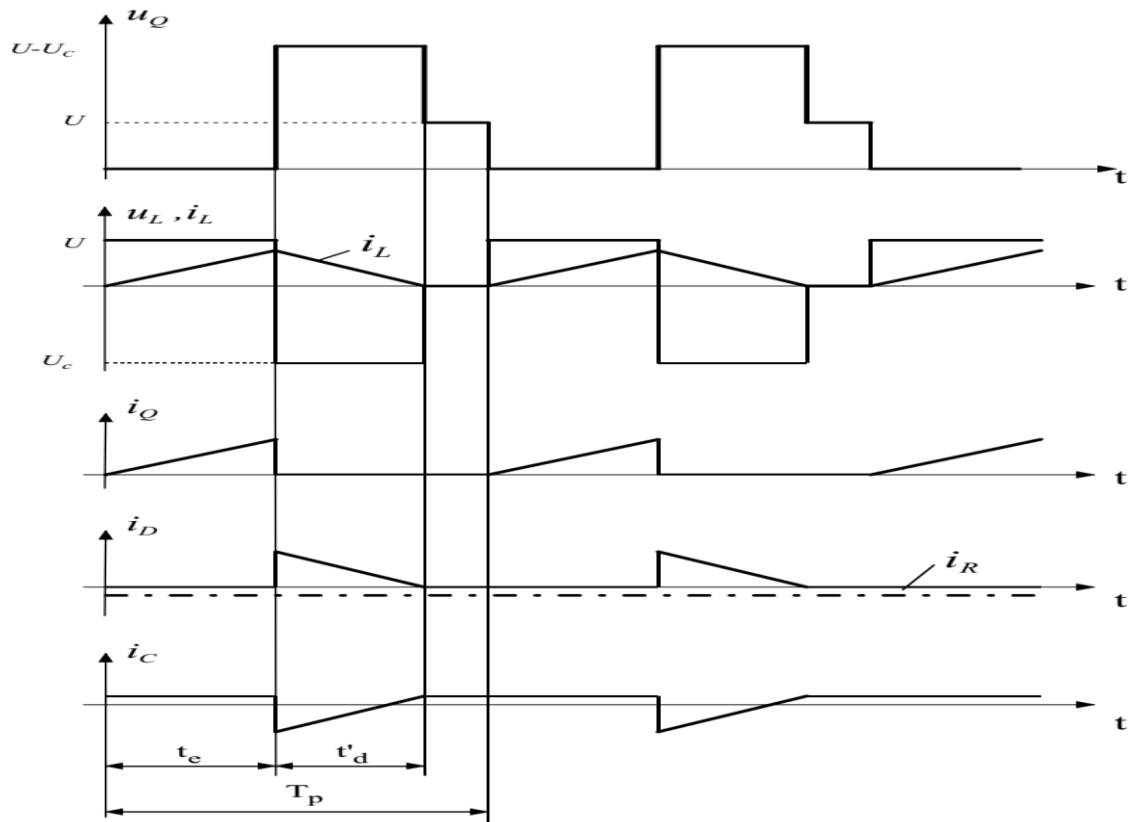


Figure (III-6) : Conduction intermittente

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

$$U_L = U \cdot \frac{t_e}{T_P} + U_c \cdot \frac{t'_d}{T_P} = 0 \tag{III-16}$$

et donc on obtient pour le temps d'extinction

$$t'_d = -\frac{U}{U_c} \cdot t_e \tag{III-17}$$

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

$$I_R = -\frac{1}{T_P} \cdot \int_{t_e}^{T_P} i_L(t) \cdot dt = -\frac{1}{2} \cdot i_{L \text{ MAX}} \cdot \frac{t'_d}{T_P} \tag{III-18}$$

Avec

$$i_{L\ MAX} = \frac{U}{L} \cdot t_e \quad (\text{III-19})$$

Et finalement

$$I_R = -\frac{U}{2L} \cdot \frac{t_d \cdot t_e}{T_P} = \frac{U_C \cdot T_P}{2L} \cdot \alpha^2 \cdot \left[\frac{U}{U_C} \right]^2 \quad (\text{III-20})$$

III.2.5.1 Caractéristiques statique avec tension de sortie

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

$$I_{L\ LIM(MAX)} = -I_{R\ LIM(MAX)} = -\frac{U_C \cdot T_P}{2L} \quad (\text{III-21})$$

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

$$I_{L\ LIM} = (1 - \alpha) \cdot I_{L\ LIM(MAX)} \quad (\text{III-22})$$

$$I_{R\ LIM} = (1 - \alpha)^2 \cdot I_{R\ LIM(MAX)} \quad (\text{III-23})$$

Dans la plupart des applications utilisant des alimentations élévatriques 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.

De la relation (III-12) on peut écrire :

$$I_R = I_{R\ LIM(MAX)} \cdot \left[\frac{U}{U_C} \right]^2 \cdot \alpha^2 \quad (\text{III-24})$$

Puis

$$\alpha = \frac{-U_C}{U} \cdot \sqrt{\frac{I_R}{I_{R\ LIM(MAX)}}} \quad (\text{III-25})$$

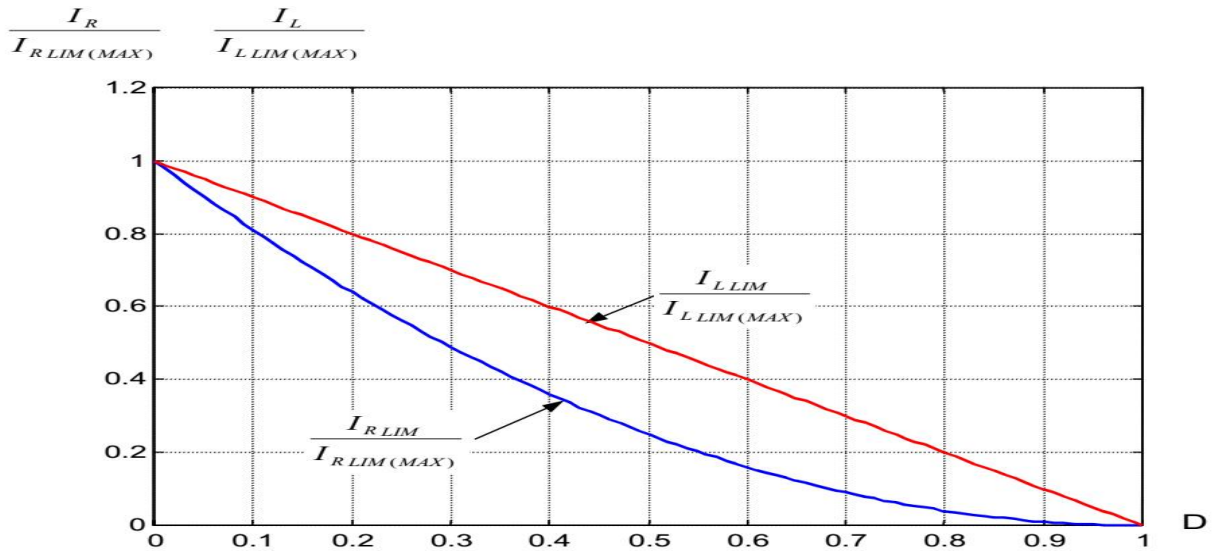


Figure (III-7) : Courant moyens dans l’inductance et dans la charge correspondant à la limite de la conduction continue pour $U_C=Cte$

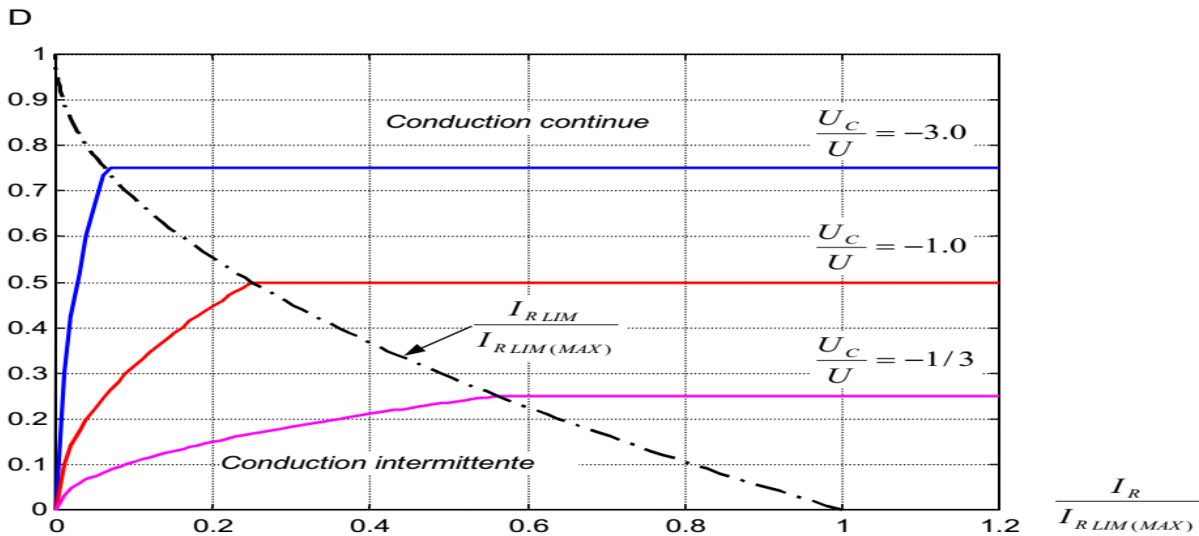


Figure (III-9) : Caractéristiques statique à tension d’entrée constante $U_C=Cte$

Comme pour les alimentations abaiseuses et élévatrices 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 α .

III.3.1 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 Buck-Boost est comme suit :

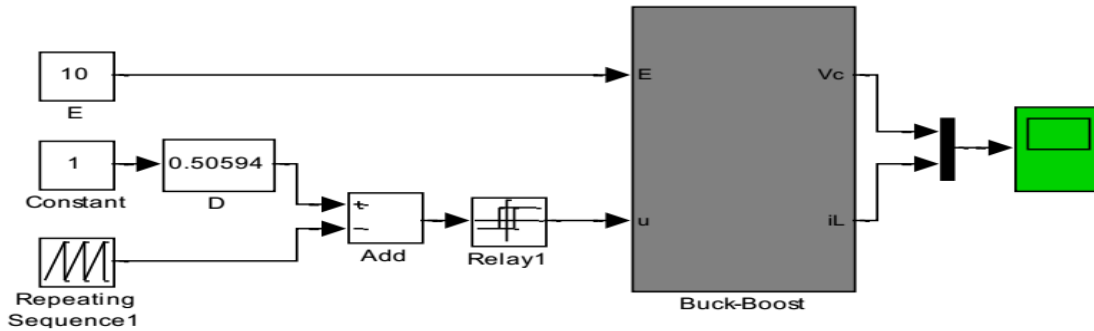


Figure (III-8) : Schéma synoptique du Buck-Boost avec une commande en boucle ouverte.

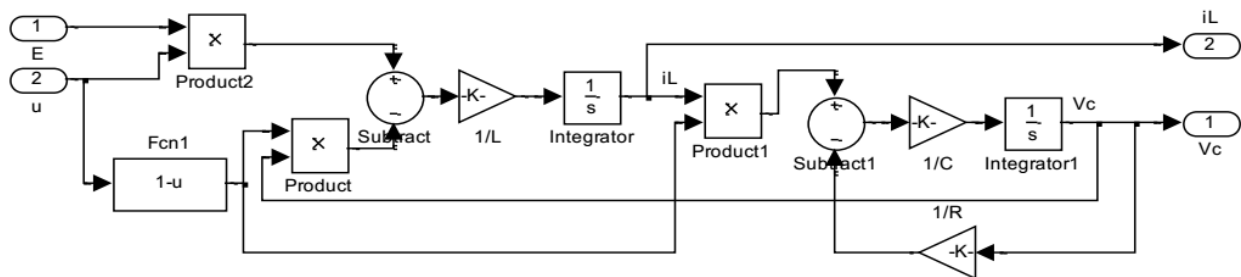


Figure (III-9) : Schéma bloc du convertisseur Buck-Boost.

Les trois courbes de la figures (III.10) montre que la tension de sortie V_S varie en fonction de la valeur du rapport cyclique α .

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

$\alpha=0.75$ alors $V_S=1500v$

$\alpha=0.5$ alors $V_S=500v$

$\alpha=0.25$ alors $V_S=166,66v$

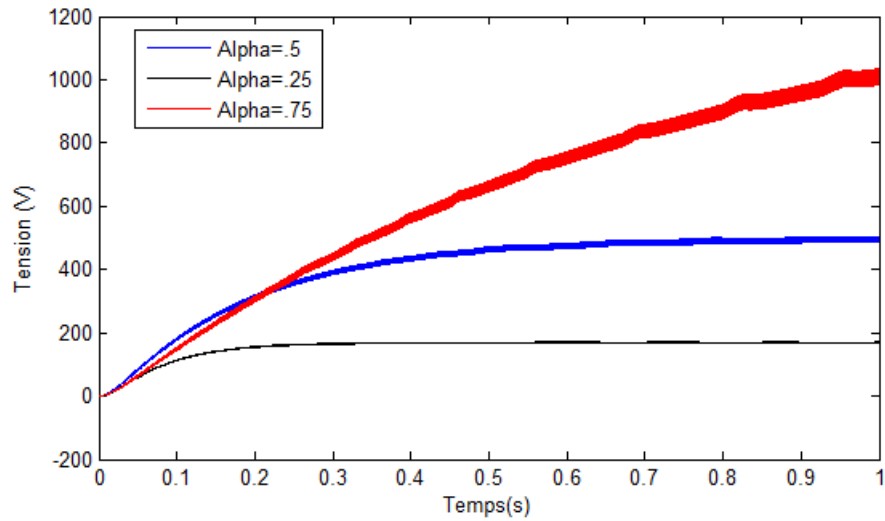


Figure (III-10) : Résultat de simulation de la tension V_s .

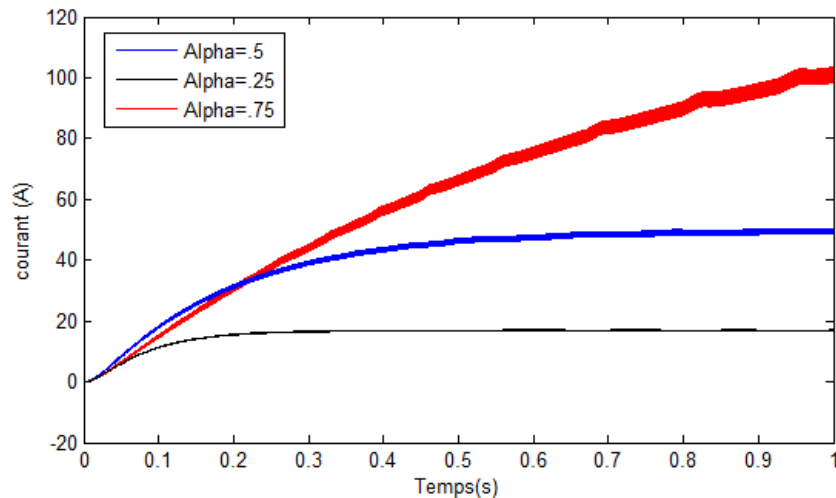


Figure (III-11) : Résultat de simulation du courant I_s

Les résultats de simulation représentés sur les figures (III-10) et figure (III-11) 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.

III. 4 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 présente l'avantage de fonctionner dans le quadrant Q1 tout en étant élévateur et abaisseur au même temps.

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

IV.1 Introduction

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 globale de l'émulateur photovoltaïque

Un système d'émulateur de panneau PV est fondamentalement 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.

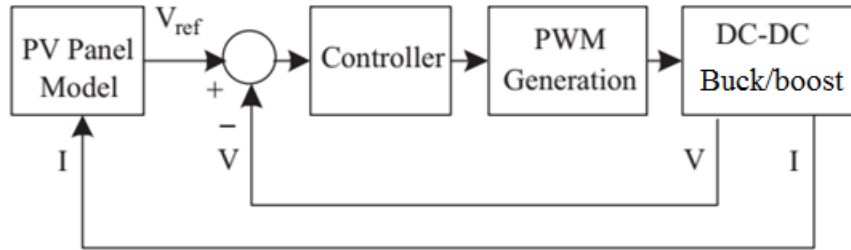


Figure (IV-1) : Schéma block de l'émulateur

Dans le deuxième chapitre le modèle du panneau photovoltaïque ainsi que son programme de simulations ont été élaborés, plusieurs teste 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. Ce convertisseur est associé au bloc PWM. Le seul bloc qui reste à modéliser et le bloc de contrôle, nous allons utiliser la méthode dite

IV.3 Principe de fonctionnement du contrôleur choisi

Dans le paragraphe II.5.1.1, figure (II.16) nous avons illustré l'influence de la résistance de charge sur la caractéristique (I,V). 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

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

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

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

$$I_R = -(1 - \alpha) \cdot I_L \tag{IV.5}$$

$$I = \alpha \cdot I_L \tag{IV.6}$$

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

$$R_e = \frac{(1-\alpha)^2}{\alpha^2} R \tag{IV.7}$$

Le schéma de principe de notre émulateur est le suivant

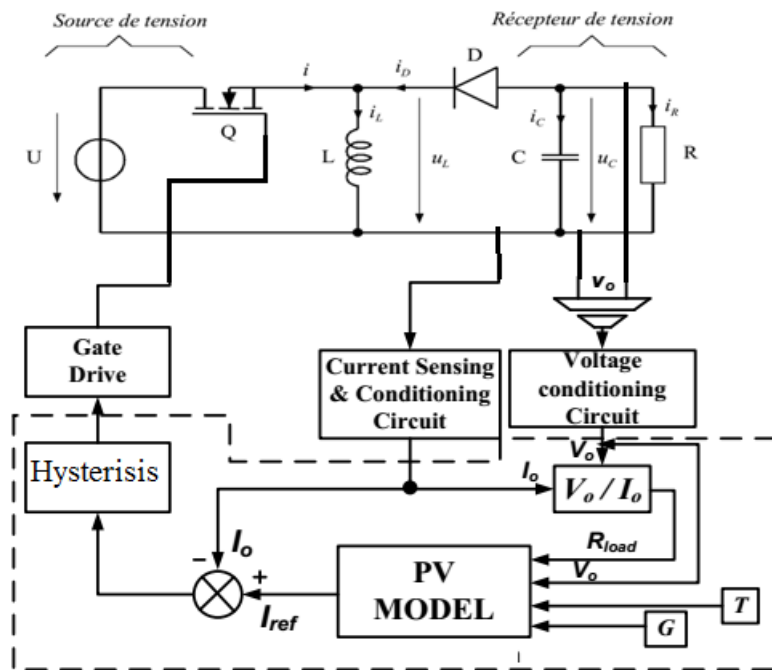


Figure (IV-2) : Schéma de principe de l'émulateur

L'organigramme de contrôle global de cet émulateur se déroule comme suit :

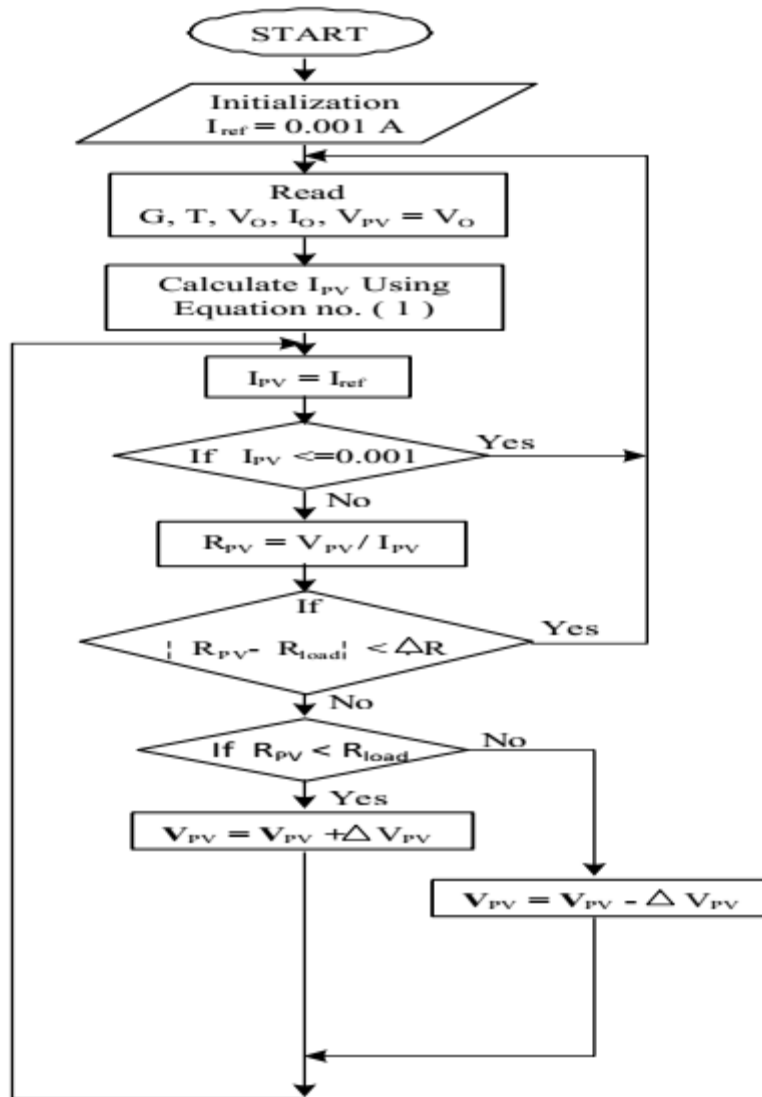
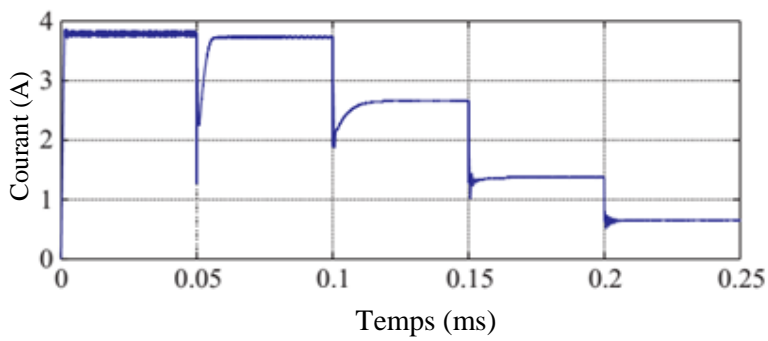
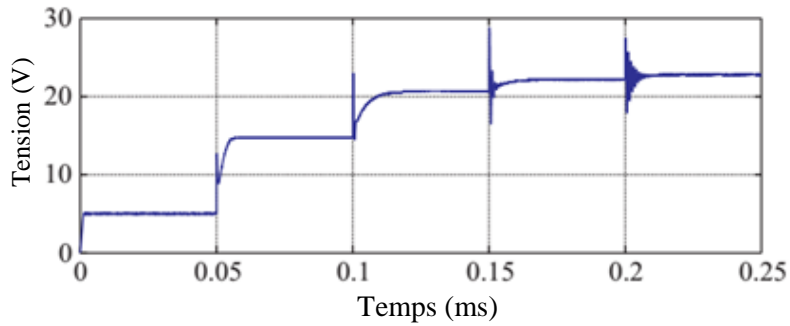


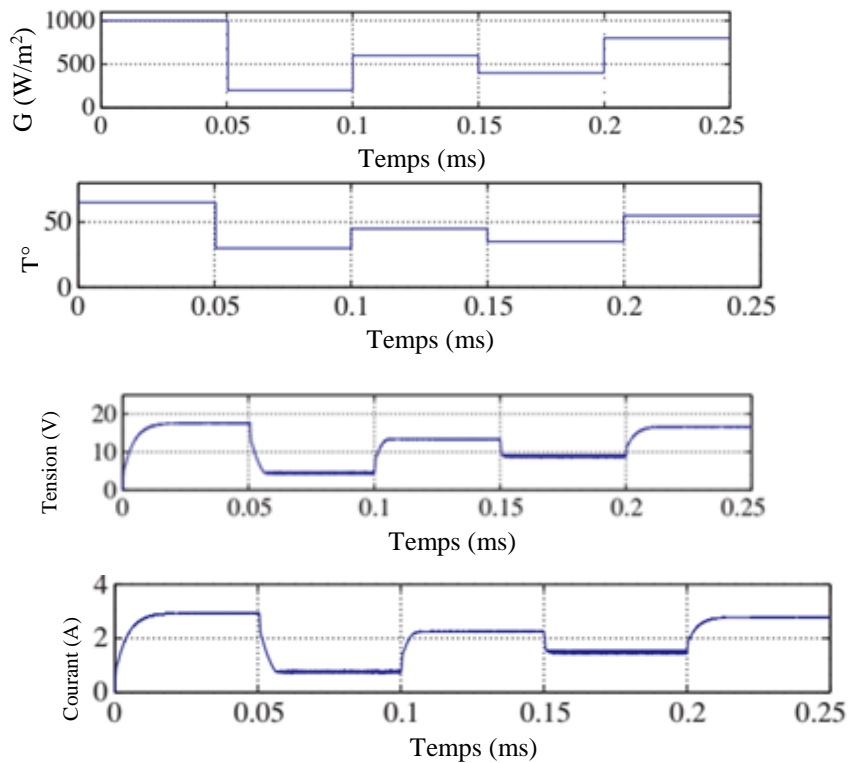
Figure IV. 3 : Organigramme de contrôle de l'émulateur

IV.4 résultats de simulation

Deux tests ont été effectués, le premier pour voir l'impact 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 influents sur la production énergétique d'un panneau photovoltaïque, est réalisé. Les résultats ainsi obtenus sont représentés sur les figures suivantes.



Impact de la variation de la temperature et de la radiation



IV.5 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

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).

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. On trouve aussi un aperçu sur quelques techniques de recherche du point de puissance maximale, tous ceci à été exploité afin de tester le comportement de l'émulateur. Le troisième chapitre est consacré à la présentation du convertisseur utilisé qui est 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.

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 ses caractéristiques sont, dans une large mesure, identiques à celles d'un vrai module photovoltaïque. Afin de valider les résultats de notre, nous avons appliqué deux techniques MPPT qui ont donné des résultats très acceptables.

Bibliographie

- [1] Maria Carmela Di Piazza • Gianpaolo Vitale « Photovoltaic Sources Modeling and Emulation » Springer-Verlag London 2013
- [2] 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)
- [3] Ankur V. Rana « Current Controlled Buck Converter based Photovoltaic Emulator » Journal of Industrial and Intelligent Information Vol. 1, No. 2, June 2013
- [4] Takudzwa B Tapfumanei¹, H.D.T Mouton², Arnold J. Rix « Solar Array Emulator »
- [5] Hayrettin CAN « Model of a photovoltaic panel emulator in MATLAB-Simulink » Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences 2013
- [6] Mustapha Elyaqouti & al « Modeling and Simulation of an Emulator of Photovoltaic Generator » *Communications on Applied Electronics* , Volume 5 – No.8, August 2016
- [7] Mohammed Azharuddin « A Nearly Accurate Solar Photovoltaic Emulator Using a dSPACE Controller for Real-time Control » Electric Power Components and Systems April 2016
- [8] Takudzwa Benedict Tapfumanei « Solar Array Emulator » Master of Science , Faculty of Engineering at Stellenbosch University 2016
- [9] Belkaid Abdelhakim « Conception et implémentation d'une commande MPPT de haute performance pour une chaine de conversion photovoltaïque autonome » Doctorat en sciences, Université de Sétif, 2015
- [10] *BENSACI Wafa* « Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque adapté par une commande MPPT » mémoire de master, Université Kasdi Merbah–Ouargla 2012
- [11] Helali Kamelia « modélisation de la cellule photovoltaïque » mémoire de magister, Université Mouloud Mammeri de Tizi-ouzou, 2012