

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI DE TIZI-OUZOU
FACULTE DE GENIE ELECTRIQUE ET D'INFORMATIQUE
DEPARTEMENT ELECTROTEQUINIQUE



MEMOIRE

De fin d'études

En vue de l'obtention du diplôme de Master Académique en
Machine Electrique

Thème

Etude, modélisation et simulation d'un
convertisseur boost entrelacé pour les
applications photovoltaïques

Présenté par :

M^r : LARABI ALI

M^r : RABIA ISMAIL

Proposé & dirigé par:

Promoteur Mr: N. BENYAHIA

Co-promoteur Mr: M.ZAOUIA

Promotion 2012

Nomenclature

- G** : Ensoleillement (W/m^2)
- S** : Durée de l'ensoleillement (s).
- I** : Le courant délivré par le module (A).
- I_p** : Photo courant (A).
- I_d** : Courant de diode (A).
- I_{shu}** : Le courant shunt (A).
- T_a** : Température ambiante ($^{\circ}\text{C}$).
- T_j** : La température de la cellule ($^{\circ}\text{C}$).
- R_{ser}** : Résistance série (Ω).
- R_{shu}** : Résistance shunt (Ω)
- A** : Facteur d'idéalité.
- G_{ref}** : Irradiation de référence ($1000 \text{ W}/\text{m}^2$).
- T_{ref}**: Température de référence (25°C).
- N_s** : Nombre de cellule en série dans un module.
- e** : La charge de l'électron $1,6.10^{-19}\text{C}$.
- K** : Constant de Boltzmann $1,38.10^{-23} \text{ J}/\text{K}$.
- E_g** : Energie de gap (pour le silicium cristalline $E_g = 1.12 \text{ eV}$).
- P_{out}** : Puissance à la sortie de convertisseur (W).
- P_{in}** : Puissance à l'entre de convertisseur (W).
- V_{out}** : Tension à la sortie de convertisseur (V).
- V_{in}** : Tension à l'entre de convertisseur (V).
- DC** : Courant continu.
- eV**: Electron Volt.
- GPV** : Générateur photovoltaïque.
- I_{pv}** : Courant délivrée par le GPV.
- MPPT** : Maximum Power Point Tracker.
- P_{max}** : Puissance maximale potentiellement disponible a la sortie du GPV.
- P_{out}** : Puissance a la sortie de l'étage d'adaptation.
- PPM** : Point de Puissance Maximale.
- P_{pv}** : Puissance délivrée par le GPV.
- PV** : Photovoltaïque.
- V_{pv}** : Tension délivrée par le GPV.
- α** : Rapport cyclique.
- f** : La fréquence de découpage .

C : Valeur du condensateur de filtrage (F).

IL : Courant dans l'inductance (A).

$V_{C\ min}$: Tension minimum aux bornes du condensateur (V).

$V_{C\ max}$: Tension maximum aux bornes du condensateur (V).

ΔV_{out} : Ondulation de tension aux bornes du condensateur (V).

$V_{CO_{NS}}$: La somme des tensions en circuit ouvert de N_s cellules en série.

$I_{CC_{NS}}$: Courant de court-circuit de N_s cellules en série.

$I_{CC_{Np}}$: La somme des courants de court-circuit de (N_p) cellules en parallèle.

$V_{CO_{Np}}$: Tension du circuit ouvert de (N_p) cellules en parallèle.

δ_M : Est l'angle d'inclinaison optimale en degrés.

δ : l'angle d'inclinaison réel, les deux sont exprimés en degrés.

Listes des figures

N° figure	Titre
Figure I-1	Schéma d'une cellule élémentaire
Figure I-2	Schéma équivalent électrique de la cellule PV
Figure I-3	photo du panneau PV du laboratoire LATAGE
Figure I-4	Les différentes zones de la caractéristique I (V)
Figure I-5	Caractéristiques résultantes d'un groupement de (Ns) cellules en série
Figure I-6	Caractéristiques d'un groupement de cellules en parallèle (Np)
Figure I-7	(a) Architecture Classique d'un panneau solaire photovoltaïque avec diodes de protections. (b) défaillance d'une des cellules du module PV et activation de la diode (by-pass) mise en évidence du courant de circulation I_{pv}
Figure I-8	Influence de la résistance série sur la caractéristique (I_{pv}-V_p)
Figure I-9	Influence de la résistance shunt sur la caractéristique (I_{pv}-V_p)
Figure I-10	Caractéristique de la puissance en fonction de la tension et $I(V)$
Figure I-11	Connexion directe GPV-Charge via une diode anti-retour.
Figure I-12	Caractéristiques électriques d'un générateur photovoltaïque en connexion directe GPV-Charge.
Figure I-13	Chaîne de conversion photovoltaïque avec convertisseur (DC-DC) contrôlé par une commande (PPM) sur charge DC
Figure I-14	Schéma synoptique d'un système de conversion énergétique
Figure I-15	Convertisseur dévolteur
Figure I-16	Convertisseur survolteur
Figure I-17	Convertisseur buck-boost
Figure I-18	Convertisseur flyback
Figure I-19	Convertisseur DC/AC
Figure I-20	Organigramme de l'algorithme Perturbation et Observation
Figure I-21	Caractéristique de la puissance tension d'un générateur photovoltaïque, Variation de $\Delta P / \Delta V$
Figure I-22	Méthode avec Contre-réaction de tension et modulation
Figure I-23	Intervalles de variation de la tension de fonctionnement optimale pour des Ensoleillements et des températures variables
Figure I-24	Méthode de la contre réaction en courant

Listes des figures

Figure II-1	Hacheur boost élémentaire
Figure II-2	Allure tension V_t et courant I_L
Figure II-5	Allure de tension aux bornes du thyristor
Figure II-6	Allure de tension aux bornes de la diode
Figure II-7	Allures des différents courants
Figure II-8	Allure de courant de l'inductance
Figure II-9	Ondulation de courant
Figure II-10	Ondulation de tension
Figure II-11	Hacheur boost a deux niveaux « entrelacé »
Figure II-12	Courant dans les deux inductances et courant de source Pour $\alpha < 0.5$
Figure II-13	Courant dans les deux inductances et courant de source Pour $\alpha > 0.5$
Figure II-14	Variation du rapport des ondulations du courant de charge en fonction de α
Figure III-1	Schéma du système photovoltaïque à étudier
Figure III-2	Photo du panneau du laboratoire LATAGE « UMMTO »
Figure III-3	Convertisseur boost à deux bras
Figure III-4	Organigramme de la commande MPPT de type P&O
Figure III-5	Schéma électrique équivalent de la cellule photovoltaïque
Figure III-6	Schéma du générateur photovoltaïque sous MATLAB-simulink
Figure III-7	Caractéristique de $I_{pv}=f(V_{pv})$ à éclairement et température données
Figure III-8	Caractéristique $P_v=f(V_{pv})$ à températures et éclairement données
Figure III-9	Caractéristique $V_{pv}=f(I_{pv})$ à températures constantes « 25°C » et à éclairement variables
Figure III-10	Caractéristique $P_v=f(V_{pv})$ à températures constantes « 25°C » et à éclairement variables
Figure III-11	Caractéristique $V_{pv}=f(I_{pv})$ à températures variables à éclairement constants « 1000W/M² »
Figure III-12	Caractéristique $P_v=f(V_{pv})$ à températures variables à éclairement constants « 1000W/M² »
Figure III-13	Caractéristique de $V_{pv}=f(I_{pv})$ obtenues dans la pratique
Figure III-14	Caractéristique de $P_v=f(V_{pv})$ obtenues dans la pratique
Figure III-15	Caractéristique de tension d'entrée et de sortie du convertisseur
Figure III-16	Signal de commande décalé d'une demi-période

Listes des figures

Figure III-17	Zoom de l'ondulation de courants
Figure III-18	Signal de commande sans décalage
Figure III-19	Zoom de l'ondulation de courants
Figure IV-1	Courbe de la variation de l'éclairement (ensoleillement) en fonction de temps
Figure IV-2	Variation de la puissance en fonction de temps du PV pour un changement de l'éclairement
Figure IV-3	Variation de tension en fonction de temps pour un changement de l'éclairement
Figure IV-4	Variation du rapport cyclique en fonction de temps pour un changement de l'éclairement
Figure IV-5	Variation du courant d'entrée et de sortie du convertisseur en fonction de temps pour un changement de l'éclairement
Figure IV-6	Variation des courants en fonction de temps pour un changement de l'éclairement
Figure IV-7	Signal de commande décalé d'une demi-période
Figure IV-8	Ondulation du courant I_{pv} avec un boost entrelacé
Figure IV-9	Ondulation du courant I_{pv} avec un boost élémentaire
Figure IV-10	Signal de commande non décalé
Figure IV-11	Ondulation du courant I_{pv} avec un boost entrelacé sont décalage
Figure IV-12	Ondulation du courant I_{pv} pour un système muni d'un convertisseur à un seul bras à une fréquence de fonctionnement variable (1KHz, 3KHz)
Figure IV-13	Ondulation du courant I_{pv} pour un système muni d'un convertisseur à deux bras à une fréquence de fonctionnement variable (1KHz, 3KHz)
Figure IV-14	Ondulation de la tension V_{out} muni d'un convertisseur élémentaire à une fréquence de fonctionnement variable (1KHz, 3KHz)
Figure IV-15	Ondulation de la tension V_{out} muni d'un convertisseur à deux bras à une fréquence de fonctionnement variable (1KHz, 3KHz)
Figure IV-16	Ondulation de tension V_{out}
Figure IV-17	Ondulation de tension V_{out} pour $c = 750 \cdot 10^{-6}f$

Listes des figures

SOMMAIRE

Introduction générale.....	1
Chapitre I : Energie solaire photovoltaïque	
I.1.Introduction.....	3
I.2.Les cellules photovoltaïques	3
I.2.1.Propriétés électriques des cellules photovoltaïques.....	4
I.3.Le module photovoltaïque	5
I.3.1.Zones de fonctionnement du module photovoltaïque.....	5
I.3.2.Architecture classique d'un module photovoltaïque.....	6
I.3.2.1. Association des cellules en série.....	6
I.3.2.2. Association des cellules en parallèle.....	8
I.3.2.3.Association des cellules (série et parallèle)	8
I.4.Influence des différents paramètres internes.....	10
I.4.1. Influence de la résistance série	10
I.4.2.Influence de la résistance parallèle (shunt).....	10
I.5. Le rendement	11
I.5.1. Le rendement maximum	11
I.5.2. Calcul du rendement moyen	12
I.5.3. Energie produite par le champ PV	13
I.6.Les différentes connexions des systèmes photovoltaïques	14
I.6.1.La connexion directe GPV-charge comme mode de transfert de puissance.....	14
I.6.2. La connexion GPV-charge via un étage d'adaptation continu-continu	15
I.7.Les différents types de convertisseurs utilisés pour les applications photovoltaïques	16
I.7.1.Convertisseur dévolteur	17
I.7.2.Convertisseur survolteur	18
I.7.3.Le convertisseur Buck-Boost.....	18
I.7.4.Convertisseur flyback	19
I.7.5.Convertisseurs DC/AC « onduleur »	19
I.8.Les différentes techniques de poursuite du point de puissance maximale.....	20
I.8.1. Méthode de la perturbation et de l'observation la (P&O).....	21
I.8.2. Algorithme d'incrémentacion de la conductance.....	22
I.8.3.Méthodes à contre réaction de la tension	23
I.8.4. Méthode à tension de référence fixe	24

I.8.5.Méthode MPPT avec mesure de la tension à vide du panneau	24
I.8.6.Méthode MPPT avec cellule pilote.....	25
I.8.7.Méthode avec contre réaction du courant	25
I.9.Conclusion	26

Chapitre II : Etude du convertisseur DC/DC

II. Introduction	27
II.1.Etude d'un hacheur survolteur (boost)	27
II.2.Chronogrammes des différentes grandeurs	30
II.3.Dimensionnement du survolteur.....	33
II.3.1.Calcul de l'inductance de lissage.....	33
II.3.2.Calcul du condensateur de filtrage	34
II.4.Mise en parallèle de deux convertisseurs boost.....	36
II.4.1.Etude de l'ondulation du courant de source	37
II.5.Comparaison entre la structure simple et la structure entrelacée	39
II.6.Conclusion	40

Chapitre III : Modélisation du système photovoltaïque

III.1. introduction	41
III.2. Système photovoltaïque a étudier	41
III.2.1.Présentation de notre système	41
III.2.1.1.Le générateur (PV).....	41
III.2.1.2Convertisseur Boost (Continu- Continu) entrelacé	42
III.2.1.3.La Commande MPPT.....	43
III.3.Modélisation et simulation du générateur photovoltaïque	44
III.3.1.Modélisation du générateur PV	45
III.3.2.Simulation du générateur (GPV) à éclairement et température données « constants »	46
III.3.3.Simulation du générateur (GPV) à éclairement et température variable.....	48
III.3.3.1.L'influence de l'éclairement sur les caractéristiques $V_{pv}=f(I_{pv})$	48
III.3.3.2.L'influence de l'éclairement sur les caractéristiques $P_v=f(V_{pv})$	48
III.3.3.3.L'influence de la température sur la caractéristique ($V_{pv}=f(I_{pv})$).....	49
III.3.3.4.L'influence de la température sur la caractéristique ($P_v=f(V_{pv})$).....	50
III.3.3.5.Essaie expérimentaux	50

III.4.Modélisation du convertisseur DC-DC	51
III.4.1.modélisation du convertisseur boost élémentaire « un seul bras ».....	51
III.4.2.modélisation du convertisseur boost entrelace à deux bras.....	53
III.5.Simulation	54
III.5.1. Commandes décalées	55
III.5.2. Commande non décalés (le même rapport cyclique)	56
III.6.Conclusion.....	57

Chapitre IV : Simulation du système

IV.1.Introduction	57
IV.2 .Résultats de simulation et interprétations	57
IV3.Ondulation du courant Ipv	60
IV.3.1. Avec un signal de commande décalé d'une demi-période	60
IV.3.2. Avec un signal de commande non décalé	61
IV.4.Influence de la capacité de filtrage sur l'ondulation de la tension Vout	63
Conclusion	64

Introduction générale

Les nombreuses énergies fossiles existantes susceptibles d'être emmagasinées (pétrole, gaz, uranium, carbone,...etc.) sont insuffisantes et en voie de disparition, en plus de cela elles présentent des inconvénients qui se traduisent par la pollution de l'atmosphère, une pollution chimique et radioactive. Cependant les besoins de l'homme en énergie augmentent de jour en jour, ce qui l'amène à rechercher constamment une énergie nouvelle disponible et non polluante.

L'énergie solaire est une source d'énergie renouvelable qui atteint la maturité technologique, son exploitation technique est relativement non polluante pour l'environnement, une source inépuisable, surabondante et gratuite, semble très prometteuse, disponible dans tous les pays et chaque jour, solution potentielle aux problèmes écologiques.

Le système photovoltaïque constitue le moyen de transformation de cette énergie solaire en électricité étant donné que c'est la forme d'utilisation la plus prépondérante. Le problème d'électrification des sites isolés, représente un lourd fardeau financier, l'extension du réseau pour des demandes relativement faibles et isolées ne pourra pas résoudre le problème et n'est pas rentable.

L'exploitation de l'énergie photovoltaïque pour la production de l'électricité représente un intérêt non négligeable, l'Algérie par exemple, à l'instar des pays en voie de développement, est confronté au problème d'alimentation électrique des zones isolées et montagneuses. L'application des systèmes photovoltaïques apparaît comme une alternative prometteuse, car notre pays bénéficie d'une situation géographique très favorable pour l'utilisation de l'énergie solaire et elle dispose d'une durée d'ensoleillement et d'une quantité d'énergie incidente très importantes.

La facilité d'installation du système photovoltaïque est également un atout majeur, l'utilisation, l'entretien et la maintenance sont relativement simples. Bien que l'énergie photovoltaïque porte beaucoup d'avantage soit connue depuis de nombreuses années comme source pouvant produire de l'énergie électrique allant de quelques milliwatts au mégawatt, elle reste encore à un stade peu connu et ne se développe pas encore dans de grandes proportions, notamment à cause du coût d'investissement trop élevé. De plus, plusieurs problèmes techniques doivent être résolus pour amener ces systèmes à un degré de maturité suffisant pour en faire des produits industriels à part entière. Les problèmes concernent autant le matériau de conversion photovoltaïque, qui reste cher à synthétiser, que la chaîne de

Introduction Générale

conversion électrique, qui présente beaucoup de pertes lors d'une utilisation mal adaptées. Outre la durée de vie de la cellule qui est affecté par l'ondulation de courant débité. Le convertisseur DC-DC de type élévateur de tension (boost) est généralement utilisé dans les applications photovoltaïques, il permet d'avoir une tension de sortie plus élevée et améliore le rendement du système PV. En outre il permet de réduire le nombre de panneau utilisé dans le système PV.

Afin de minimiser l'amplitude des ondulations du courant à l'entrée du convertisseur une structure multi-bras parallèle « entrelacée » peut-être envisagée. Cette structure permet de prolonger la durée de vie du panneau photovoltaïque et aussi diminuer les pertes de conduction et le poids du convertisseur. [16]

L'objet de notre travail est orienté vers l'optimisation de la puissance du générateur PV, sous différents paramètres « éclairément, température », par l'incorporation d'un convertisseur continu-continu de type « boost » entrelacé commandé par un algorithme de recherche du point de la puissance maximale (MPPT).

Dans le premier chapitre, nous allons décrire la production de l'énergie solaire photovoltaïque et les modèles de convertisseurs utilisés pour les applications PV. Nous allons donner l'explication des deux modes de transferts de puissance. Et enfin nous allons discuter les différentes méthodes de recherches de puissance maximales. Le deuxième chapitre sera consacré à l'étude du convertisseur boost élémentaire et entrelacé. Dans le troisième chapitre nous allons modéliser les différents composants de notre système, «la commande MPPT de type P&O, le modèle de la cellule photovoltaïque et le convertisseur boost », puis nous discuterons les résultats obtenus. Le dernier chapitre, sera consacré aux résultats obtenus par simulation de tout le système et leurs interprétations. Enfin, nous terminerons notre travail par une conclusion générale.

I.1.Introduction

Face aux prévisions d'épuisement inéluctable des ressources mondiales en énergie fossile (pétrole, gaz, charbon...), en énergie d'origine thermonucléaire (uranium, plutonium), face aux multiples crises pétrolières, économiques, la science s'est tout naturellement intéressée aux ressources dites 'renouvelables' et notamment vers la plus ancienne ; le soleil qui est considéré dans l'Antiquité comme un dieu, est aujourd'hui réduit au statut d'énergie, une énergie qu'il nous faut apprendre à capter, à transformer, et à stocker

I.2.Les cellules photovoltaïques

Une cellule photovoltaïque est assimilable à une diode photosensible, son fonctionnement est basé sur les propriétés des matériaux semi conducteurs.

La cellule photovoltaïque permet la conversion directe de l'énergie lumineuse en énergie électrique. Son principe de fonctionnement repose sur l'effet photovoltaïque (Becquerel 1938). Une cellule est constituée de deux couches minces d'un semi conducteur. Ces deux couches sont dopées différemment. Pour la couche (N), c'est un apport d'électrons périphériques et pour la couche (P) c'est un déficit d'électrons. Les deux couches présentent ainsi une différence de potentiel. L'énergie des photons lumineux captés par les électrons périphériques (couche N), leur permet de franchir la barrière de potentiel et d'engendrer un courant électrique continu. Pour effectuer la collecte de ce courant, des électrodes sont déposées par sérigraphie sur les deux couches du semi conducteur (Figure I.1). L'électrode supérieure est une grille permettant le passage des rayons lumineux. Une couche anti reflet est ensuite déposée sur cette électrode afin d'accroître la quantité de lumière absorbée [5].

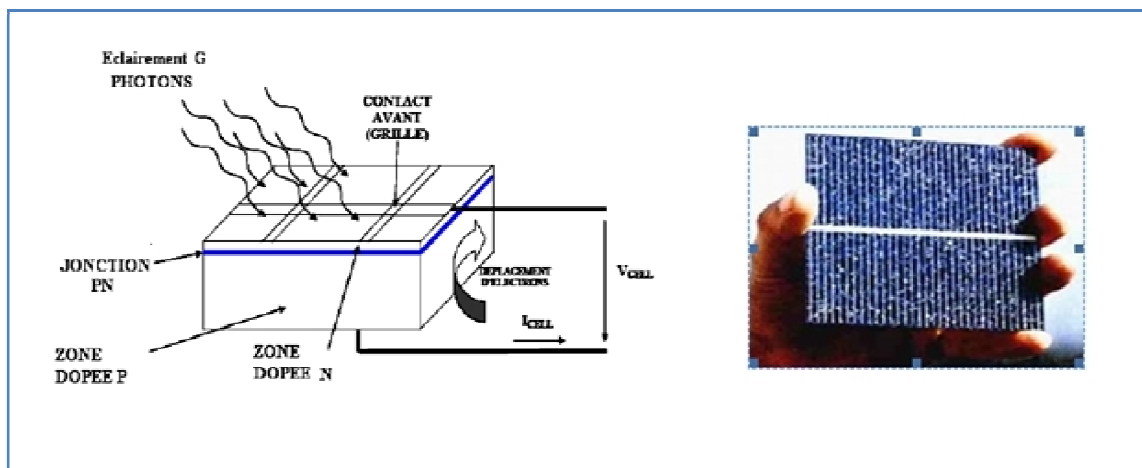


Figure I-1 : schéma d'une cellule élémentaire

I.2.1. Propriétés électriques des cellules photovoltaïques

Le schéma du circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque qui est largement utilisé dans la littérature est représenté sur la Figure I.2:

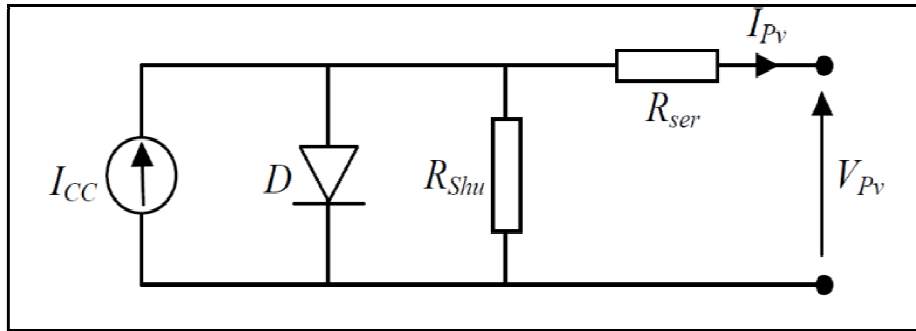


Figure I.2: Schéma équivalent électrique de la cellule PV

Ce modèle a l'avantage d'être simple et implantable sur bon nombre de simulateurs, Il permet aussi d'obtenir le comportement statique d'une cellule PV sous polarisation.

Comme le montre le schéma de la figure I.2 une photopile comporte en réalité une résistance série et une résistance en dérivation ou shunt. Ces résistances auront une certaine influence sur la caractéristique (V_p-I_{pv}) de la photopile.

- **La résistance Série**

En pratique, la cellule PV, contient des résistances dans le matériau qui constitue les semi-conducteurs, la grille en métal, les contacts, et l'autobus courant de rassemblement. L'ensemble des pertes dépend, de la résistance série (R_s).

Son effet devient très remarquable en module composé de plusieurs cellules connectées en série, la valeur de cette résistance est multipliée par le nombre de cellules [6].

- **Résistance parallèle**

Cette résistance représente une partie des pertes liée à une petite fuite de courant par un chemin résistif parallèlement au dispositif intrinsèque. Ceci peut être représenté par une résistance parallèle (R_p). Son effet est beaucoup moins remarquable dans un module photovoltaïque comparé à la résistance série, qui devient seulement apparent quand un certain nombre de modules sont reliés en parallèle pour créer un générateur photovoltaïque [6].

I.3. Le module photovoltaïque :

Un module ou générateur photovoltaïque est constitué d'un ensemble de cellules photovoltaïques élémentaires montées en série et/ou parallèle afin d'obtenir des caractéristiques électriques désirées tels que la puissance, le courant de court-circuit et la tension en circuit ouvert [7].



Figure I-3 : photo du panneau PV du laboratoire LATAGE

I.3.1. Zones de fonctionnement du module photovoltaïque :

Les caractéristiques électriques d'un panneau photovoltaïque varient en fonction de la température, de l'éclairement et, de façon générale, des conditions de fonctionnement lorsqu'il est connecté à une charge donnée. Ces propriétés sont en effet nécessaires pour comprendre le comportement d'un générateur PV et ensuite effectuer des optimisations de fonctionnement.

Selon l'association en série et/ou parallèle de ces modules, les valeurs du courant de court-circuit « I_{cc} » et de la tension à vide « V_{co} » sont plus ou moins importantes (figure I.4). 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 $I(V)$ d'un générateur PV en trois « 03 » zones :

- Une zone assimilable à un générateur de courant (I_{cc}) proportionnel à l'irradiation, d'admittance interne pouvant être modélisée par $1/R_{sh}$ (Zone1).
- Une zone assimilable à un générateur de tension (V_{co}) d'impédance interne équivalente à R_s (Zone2).
- Une zone où l'impédance interne du générateur varie très fortement de R_s à R_{sh} (Zone3).

Le point de fonctionnement pour lequel la puissance fournie par le générateur est maximale est situé dans la Zone3. Il est caractérisé par le couple (I_{OPT}, V_{OPT}), et seule une charge dont la caractéristique passe par ce point, permet d'extraire la puissance maximale disponible dans les conditions considérées.[7].

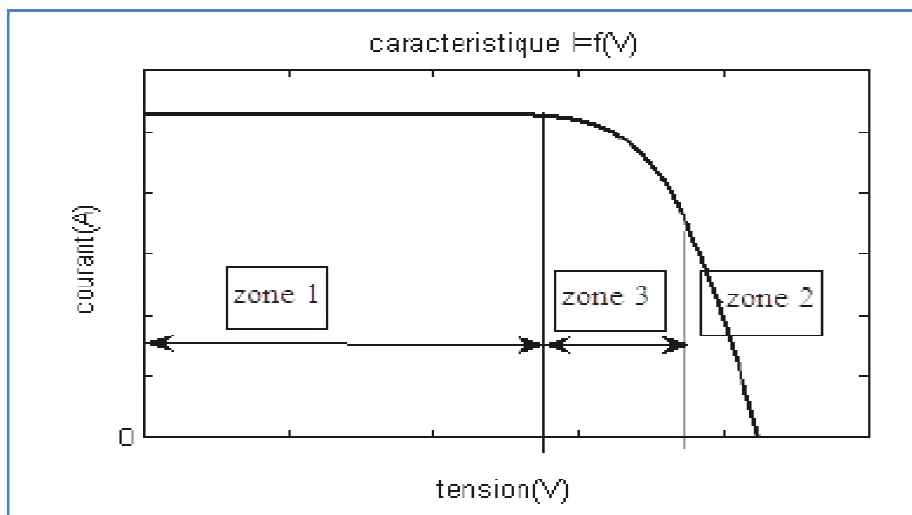


Figure I .4 : Les différentes zones de la caractéristique $I (V)$

I.3.2. Architecture classique d'un module photovoltaïque

I.3.2.1. Association des cellules en série

Dans des conditions d'ensoleillement standard ($1000\text{W}/\text{m}^2$; 25°C), la puissance maximale délivrée par une cellule en silicium de (150 cm^2) est d'environ (2.3 W crête) sous une tension de (0.5V).

Une cellule photovoltaïque élémentaire constitue donc un générateur électrique de faible puissance insuffisante en tant que telle pour la plupart des applications domestiques ou industrielles. Les générateurs photovoltaïques sont, de ce fait, réalisés par association, en série et/ou en parallèle, d'un grand nombre de cellules élémentaires.

Une association de cellules en série (N_s) permet d'augmenter la tension du générateur photovoltaïque (GPV) [8].

Les cellules sont alors traversées par le même courant et la caractéristique résultant du groupement série est obtenues par addition des tensions élémentaires de chaque cellule, un tel regroupement est représenté par la figure I.5.

L'équation (I.1) résume les caractéristiques électriques d'une association série de (N_s) cellules [8]:

$$V_{CO_{N_s}} = N_s * V_{CO}; I_{CC} = I_{CC_{N_s}} \quad (I - 1)$$

$V_{CO_{N_s}}$: La somme des tensions en circuit ouvert de N_s cellules en série

$I_{CC_{N_s}}$: Courant de court-circuit de N_s cellules en série

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

Comme la surface des cellules devient de plus en plus importante, le courant produit par une seule cellule augmente régulièrement au fur et à mesure de l'évolution technologique alors que sa tension reste toujours très faible.

L'association série permet ainsi d'augmenter la tension de l'ensemble et donc d'accroître la puissance de l'ensemble.

Les panneaux commerciaux constitués de cellules de première génération sont habituellement réalisés en associant (36) cellules en série afin d'obtenir une tension ($V_{CO_{N_s}} = N_s \times V_{CO} = 21.6V$) optimale du panneau (V_{oc}) proche de celle d'une tension de batterie de 12V.

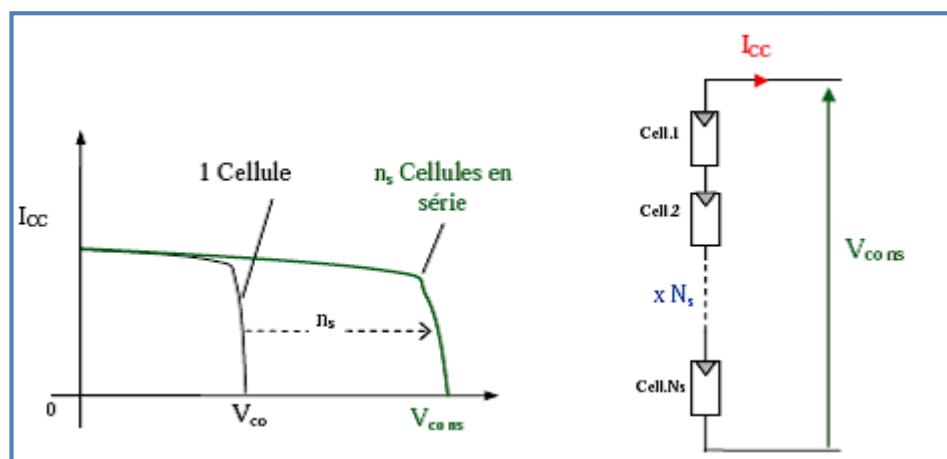


Figure I.5. Caractéristiques résultantes d'un groupement de (N_s) cellules en série [08]

I.3.2.2. Association des cellules en parallèle

Une association parallèle de (N_p) cellules est possible et permet d'accroître le courant de sortie du générateur ainsi créé. Dans un groupement de cellules identiques connectées en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et la caractéristique résultant du groupement est obtenue par addition des courants. L'équation (I.2) et la Figure I.6 résument les caractéristiques électriques d'une association parallèle de (N_p) cellules [8].

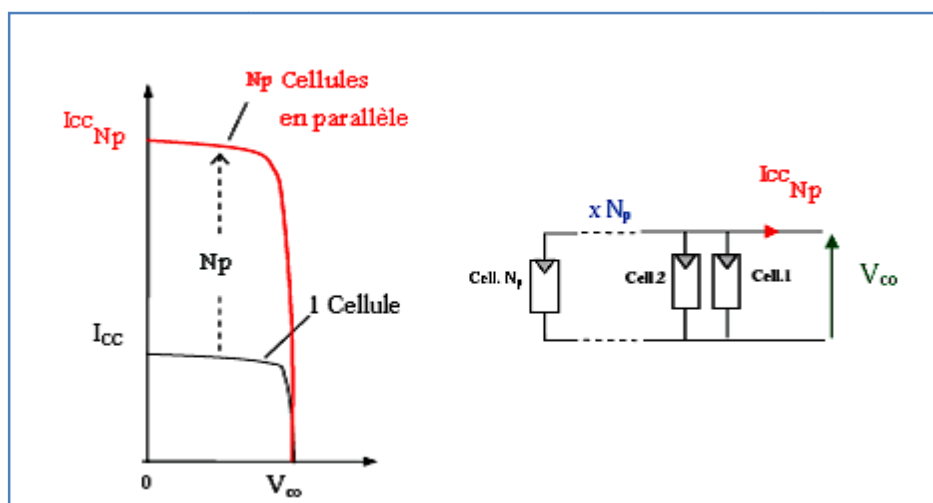


Figure I.6. Caractéristiques d'un groupement de cellules en parallèle (N_p) [8]

Avec :

$$I_{cc_{N_p}} = N_p \times I_{cc} ; V_{co} = V_{co_{N_p}} \quad (I - 2)$$

$I_{cc_{N_p}}$ La somme des courants de court-circuit de (N_p) cellules en parallèle

$V_{co_{N_p}}$ Tension du circuit ouvert de (N_p) cellules en parallèle

I.3.2.3. Association des cellules (série et parallèle)

La caractéristique $I(V)$ d'un générateur solaire peut être considérée comme le fruit d'une association d'un réseau de ($N_s \cdot N_p$) cellules en série/parallèle. La caractéristique globale peut, en outre, varier en fonction de l'éclairement, de la température, du vieillissement des cellules et les effets d'ombrage ou d'inhomogénéité de l'éclairement. De

plus, il suffit d'une occultation ou d'une dégradation d'une des cellules mises en série pour provoquer une forte diminution du courant solaire produit par le module photovoltaïque. Lorsque le courant débité est supérieur au courant produit par la cellule faiblement éclairée, la tension de celle-ci devient négative et se comporte comme un élément récepteur. Celle-ci se retrouve à dissiper une quantité trop importante de puissance électrique qui pourrait aboutir à sa destruction si le défaut persiste trop longtemps. C'est le phénomène dit de hot spot ou « point chaud ».

Pour remédier à ce phénomène, il faut câbler une diode by-pass en parallèle pour chaque groupe de cellules, ces diodes ont pour rôle de protéger les cellules qui deviennent passives Figure I-7-a. La diode by-pass lorsqu'elle se met à fonctionner, court-circuite alors une partie du panneau comme indiqué en Figure I-7-b, évitant ainsi la circulation de courants inverses au sein des cellules défectueuses. Par contre, cette solution efficace réduit d'autant la puissance délivrée ainsi que la tension aux bornes du panneau. La dégradation d'une seule cellule condamne donc le groupe de cellules associé à la cellule défectueuse et protégée par la diode by-pass à ne pas produire de puissance. Ce phénomène de perte partielle de puissance est à comparer à la perte totale d'un panneau entier en cas de problème sur une cellule avec un panneau fonctionnant sans protections.

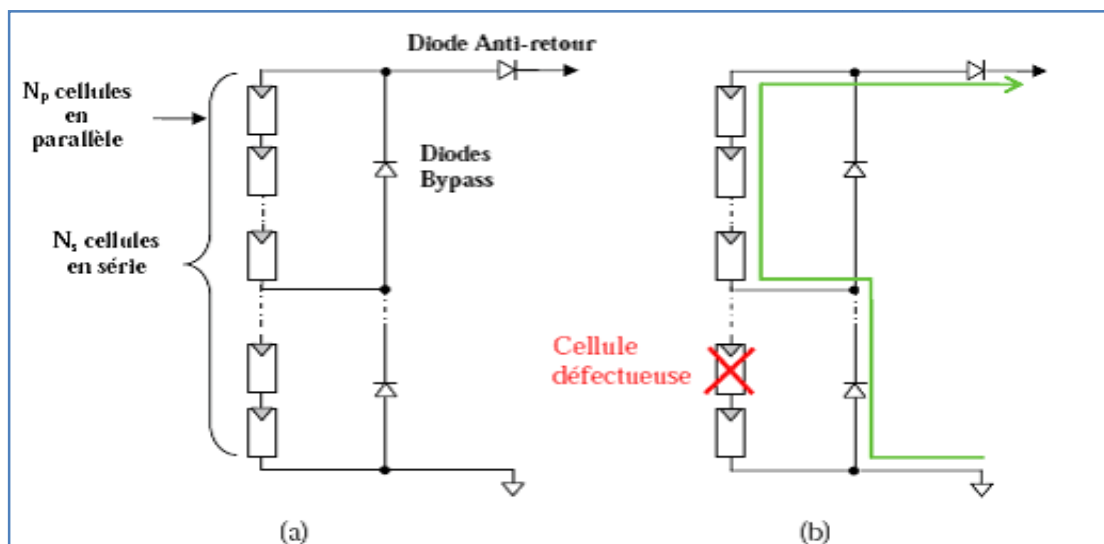


Figure I.7. (a) Architecture Classique d'un panneau solaire photovoltaïque avec diodes de protections. (b) défaillance d'une des cellules du module PV et activation de la diode (by-pass) mise en évidence du courant de circulation I_{pv}

Une autre protection consiste à protéger le module photovoltaïque contre les courants négatifs qui pourraient être générés lors de différentes connexions en parallèle de plusieurs

panneaux (lorsque le panneau devient récepteur plutôt que générateur). Ainsi, une diode anti retour est mise en série avec chaque branche d'un GPV. Le risque est que des chaînes de cellules fortement éclairées débitent dans des chaînes soumises à moins d'éclairément. Il est à souligner que la présence de cette diode anti-retour permet d'éviter tous les courants négatifs y compris provenant de la charge (comme une batterie par exemple fonctionnant tout le temps et pouvant débiter sur le GPV la nuit). [8]

I.4. Influence des différents paramètres internes

I.4.1. Influence de la résistance série

La Figure (I.8) montre l'influence de la résistance série sur la caractéristique de la cellule. Celle-ci se traduit par la diminution de la pente (I_{pv} - V_p) de dans la zone où la cellule fonctionne comme générateur de tension pratiquement constant, et qui ne modifie pas la tension du circuit ouvert. Mais lorsqu'est anormalement élevée, elle peut diminuer notablement le courant de court-circuit. [9].

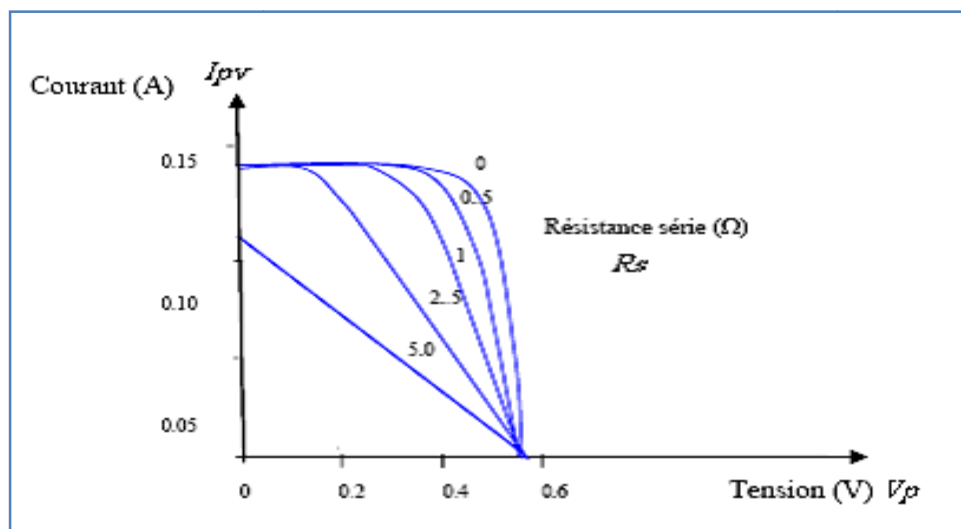
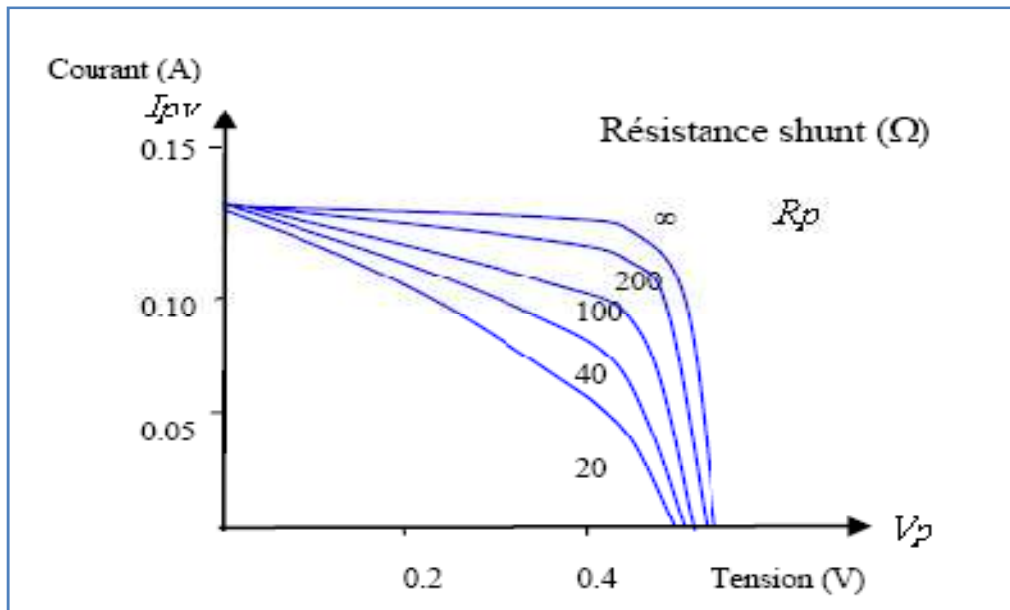


Figure (I-8) : Influence de la résistance série sur la caractéristique (I_{pv} - V_p) [9].

I.4.2. Influence de la résistance parallèle (shunt)

Comme le montre la Figure (I.9), la résistance shunt se traduit par une légère diminution de la tension de circuit-ouvert, et une augmentation de la pente de la caractéristique de la cellule dans la zone où elle fonctionne en générateur de courant presque constant. La résistance (R_p) a pour origine les imperfections de la qualité de la jonction (P-N) et elle est responsable de l'existence des courants de fuite.



La figure I.9. Influence de la résistance shunt sur la caractéristique (I_{pv} - V_p) [9].

I.5. Le rendement

I.5.1. Le rendement maximum

La puissance $P=VI$ est nulle en court circuit et en circuit ouvert .elle passe par un maximum quand on parcourt la caractéristique $I=f(V)$.Ce maximum MPP peut être déterminé en portant sur le même graphique la caractéristique $I=f(V)$ et les hyperboles de puissance constante. le point de fonctionnement optimal correspond au point de tangente des deux courbes comme le montre la figure I.10.

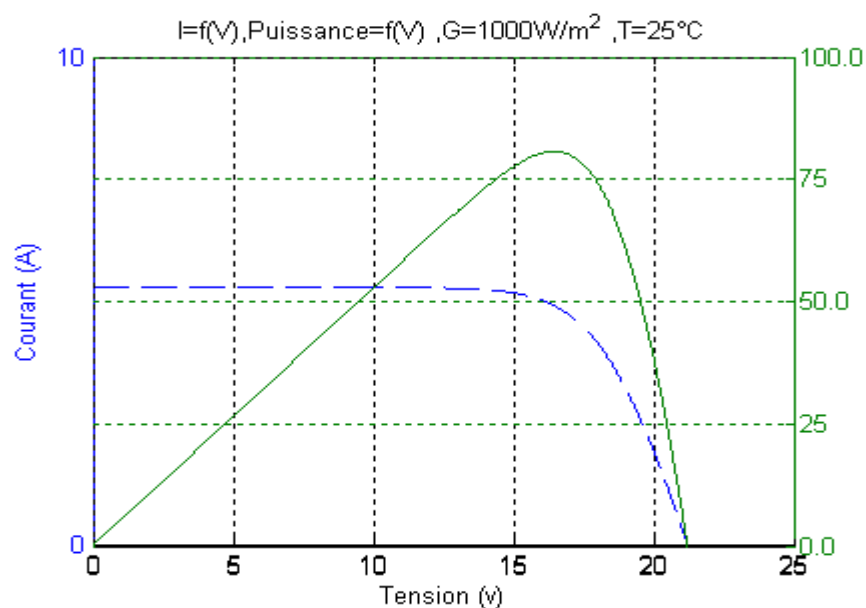


Figure I.10 : Caractéristique de la puissance en fonction de la tension et $I(V)$

Le rendement est :

$$\eta = \frac{P_M}{P_0} = \frac{I_M * V_M}{G * S} \quad (I - 3)$$

Avec :

P_0 : Est la puissance incidente elle est égale au produit de l'éclairement par la surface totale du panneau photovoltaïque.

Le rendement maximum η_{max} de la conversion photons-électrons du panneau solaire noté est défini selon l'équation (I-4):

$$\eta_{max} = \frac{P_{max}}{G * S} \quad (I - 4)$$

Dans laquelle P_{max} est le maximum de puissance potentiellement disponible à la sortie du panneau PV.

Les rendements η et η_{max} dépendent du matériau de conversion utilise et les pertes liées a la technologie de mise en œuvre pour réalisé une cellule [10].

I.5.2. Calcul du rendement moyen

Le rendement moyen du champ elle provient des travaux d'Evans.et est identique pour tous les types de générateur photovoltaïque. [10]

Le rendement moyen η_p du champ est fonction de la température moyenne du module T_c

$$\eta_p = \eta_r [1 - \beta_p (T_c - T_r)] \quad (I - 5)$$

Ou η_p est le rendement du module à la température de référence T_r (25° C), et β_p est le coefficient de température pour le rendement du module T_c . Est reliée à la température ambiante moyenne du mois T_a Par la formule d'Evans (Evans, 1981).

$$(T_c - T_a) = (219 + 832 \overline{K_t}) * \left(\frac{NOC - 20}{800} \right) \quad (I-6)$$

Ou NOC est la température nominale des cellules en opération et K_t l'indice de clarté mensuel.

η_r , NOC et β_p dépendent du type de module PV considéré .les constructeurs peut spécifier ces données ou utilisées le tableau 2 pour des matériaux courants.

L'équation (I-6) n'est valable que si l'inclinaison du champ PV est optimale. Sinon on doit multiplier le terme droite de l'équation par un facteur de correction défini par :

$$C_f = 1 - 1.17 * 10^{-4}(\delta_M - \delta)^2 \quad (I - 7)$$

« δ_M » Est l'angle d'inclinaison optimale et « δ » l'angle d'inclinaison réel, les deux sont exprimés en degrés.

Type de module	η_r (%)	NOC (°C)	β_p (%/°C)
Si monocristallin	13.0	45	0.40
Si polycristallin	11.0	45	0.40
Si amorphe	5.0	50	0.11
CdTe	7.0	46	0.24
CuInSe ₂ (CIS)	7.5	47	0.46

Tab.1.1 Caractéristiques du module PV pour des technologies courantes.

I.5.3. Energie produite par le champ PV

L'énergie produite par le générateur PV est donnée par :

$$E_p = S \eta_p \overline{Ht} \quad (I - 8)$$

Où :

« S » est la surface du champ PV

« \overline{Ht} » est l'ensoleillement horaire moyen

Soient « λ_p » Les pertes diverses du champ PV et « λ_c » Les pertes du conditionnement de l'énergie. [10]

L'énergie disponible pour la charge électrique est :

$$E_A = E_p (1 - \lambda_p)(1 - \lambda_c) \quad (I - 9)$$

Le rendement totale est défini par :

$$\eta_P = \frac{E_A}{S \overline{Ht}} \quad (I - 10)$$

I.6. Les différentes connexions des systèmes photovoltaïques

Il existe deux types de connexions de système photovoltaïque:

I.6.1. La connexion directe GPV-charge comme mode de transfert de puissance

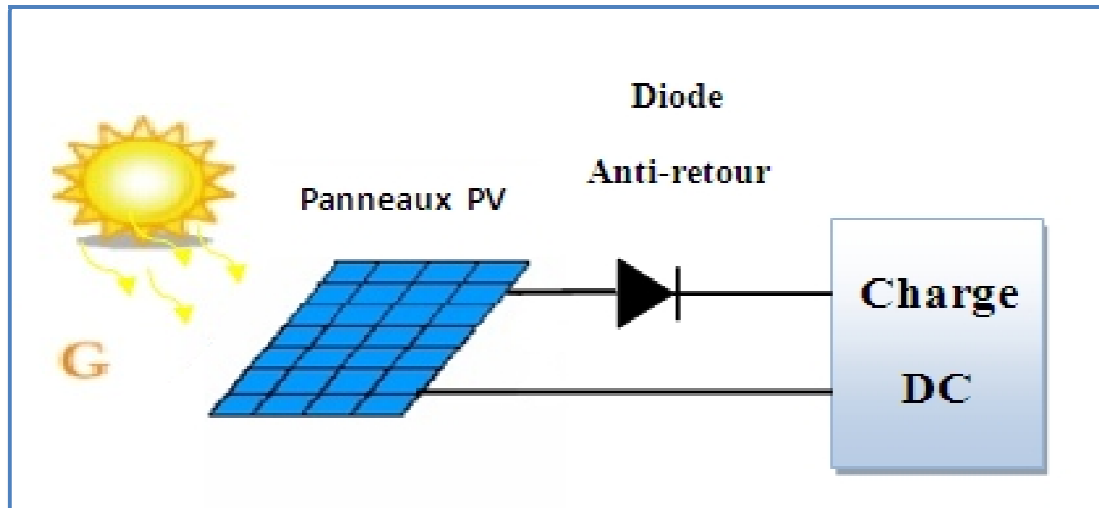


Figure I-11 : Connexion directe GPV-Charge via une diode anti-retour.

La connexion directe du panneau solaire photovoltaïque à une charge reste actuellement le principe de fonctionnement le moins cher et le plus répandu, Figure I-16. Bien sûr, il faut s'assurer auparavant que la charge accepte bien la connexion directe au générateur de puissance continue qu'est le panneau solaire. En effet, le GPV est une source d'énergie continue qui ne peut être connectée à une charge alternative que via un étage d'adaptation de type onduleur.

L'inconvénient majeur de cette connexion est sa dépendance directe entre la puissance fournie par le générateur et la charge. En fait, la puissance fournie par le module photovoltaïque résulte de l'intersection entre la caractéristique $I(V)$ du GPV et celle de la charge. Comme le montre la caractéristique de la Figure I-12, la puissance transmise directement à une batterie ou une charge résistive de type lampe ou bien même un moteur (MCC), n'est pas toujours effectuée à la puissance maximale P_{MAX} (PPM = point de puissance maximale) que peut fournir le panneau solaire. La solution la plus utilisée actuellement est de créer généralement un GPV par association de cellules pour obtenir une puissance nominale donnée proche de celle nécessaire pour l'utilisation. Cette solution est valable pour les charges DC de type batterie recueillant le courant PV sous des tensions

proches de V_{opt} . Une autre application directe est le pompage d'eau « au fil du soleil ». Dans ce cas, on garantit statistiquement la coïncidence du point de puissance maximale PPM du générateur avec les besoins optimaux de la charge. Toutefois, les pertes de ce genre d'association peuvent aller de 5% à 30% selon les gisements solaires et l'état des charges.

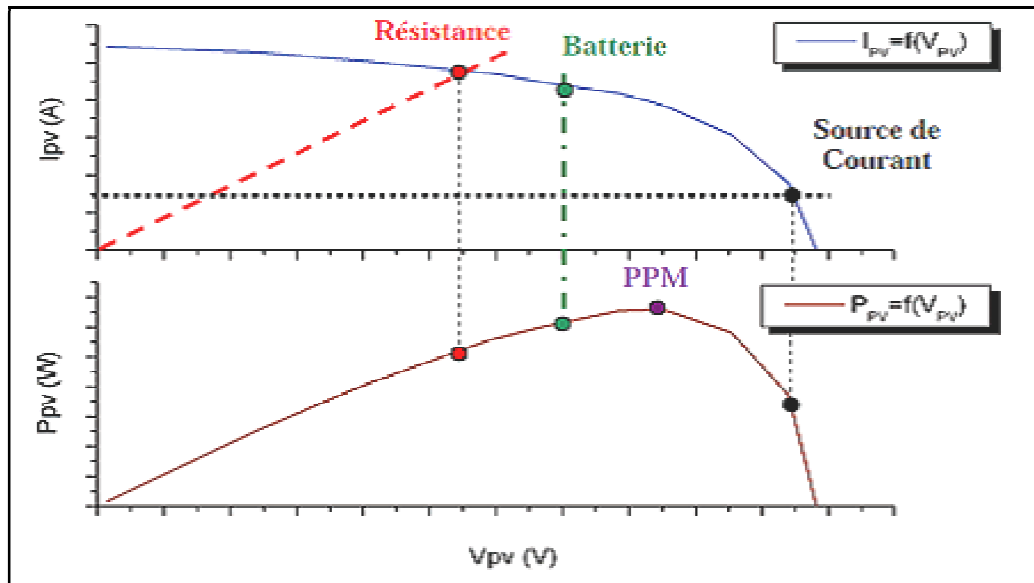


Figure I-12 : Caractéristiques électriques d'un générateur photovoltaïque en connexion directe GPV-Charge.

Les caractéristiques électriques d'un GPV peuvent changer rapidement en fonction de l'irradiation solaire, de la température et à plus long terme du vieillissement des cellules. En réalité, la connexion directe est surtout utilisée en raison de sa simplicité de mise en œuvre, son coût minimal et sa fiabilité. En termes de rendement, même si la puissance du GPV est choisie judicieusement par rapport à la charge, ce type de connexion souffre souvent d'une mauvaise adaptation électrique et présente des pertes importantes de production d'énergie. Pour augmenter la production d'un GPV, on trouve de plus en plus d'étages d'adaptation entre le panneau et la charge, dans le but d'optimiser la production d'énergie à tout moment est ainsi de plus en plus préconisée.

Bien sûr, ces étages présentent un surcoût par rapport à la connexion directe qui ne nécessite qu'une simple diode. [8][12]

I.6.2. La connexion GPV-charge via un étage d'adaptation continu-continu

La Figure I.13 présente le schéma de principe d'un module photovoltaïque doté d'un étage d'adaptation (DC-DC) entre le (GPV) et la charge. Cette structure correspond à un système plus communément appelé système autonome. Il permet le plus souvent d'alimenter une batterie pour stocker de l'énergie ou une charge qui ne supporte pas les fluctuations de la tension (ballast,...).

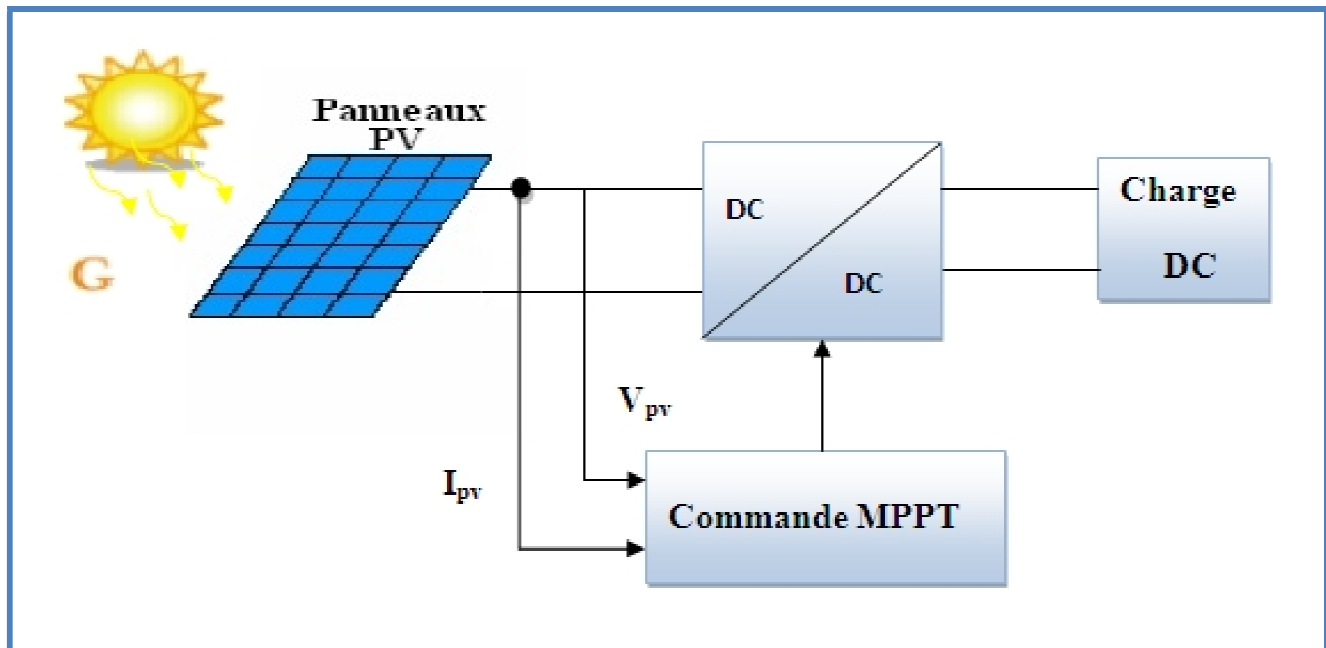


Figure I-13: Chaîne de conversion photovoltaïque avec convertisseur (DC-DC) contrôlé par une commande (PPM) sur charge DC [8]

Cet étage d'adaptation qui dispose d'une commande MPPT « Maximum Power Point Tracking » ou en français « Recherche du Point de Puissance Maximum » est un organe fonctionnel du système PV et permet la recherche du point de fonctionnement optimal du générateur PV. L'algorithme de recherche MPPT peut être plus ou moins complexe en fonction du type d'implantation choisie et des performances recherchées. Cependant, tous les algorithmes performants de recherches de PPM doivent agir sur la variation du rapport cyclique du type du convertisseur de puissance associé.

I.7. Les différents types de convertisseurs utilisés pour les applications photovoltaïques

Le convertisseur est l'association d'un bloc de puissance et d'un bloc de commande. Son rôle est de régler le transit d'énergie électrique de la source vers le récepteur, en modifiant éventuellement la forme sous laquelle cette énergie se présente.

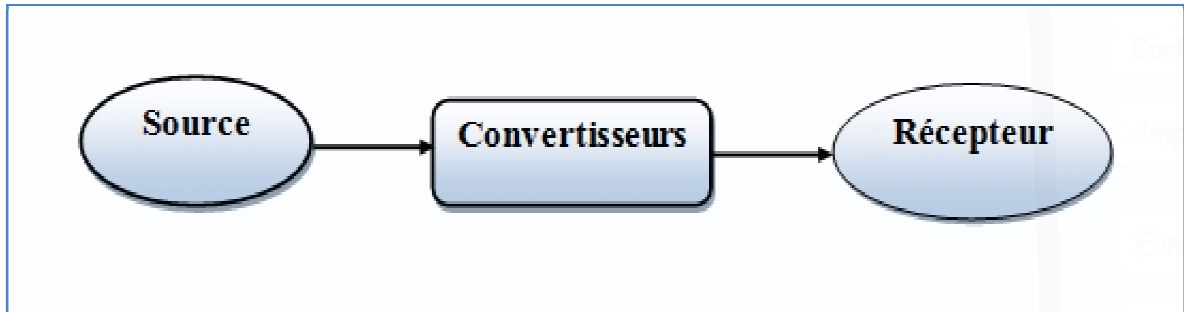


Figure I.14. Schéma synoptique d'un système de conversion énergétique

Il existe différentes topologies ou schémas de base pour les convertisseurs statiques tels que le boost, buck, buck-boost, flyback, et convertisseur DC/AC etc. Nous avons repris ici les différences principales entre ces topologies. Chacune a ses particularités et nous allons essayer de synthétiser les principales caractéristiques de quelques types différents d'alimentations.

I.7.1. Convertisseur dévolteur

Ce nom est lié au fait que la tension moyenne de sortie est inférieure à celle de l'entrée. Il comporte un interrupteur à amorçage commandé (transistor, bipolaire, transistor MOS ou IGBT...) et un interrupteur à blocage spontané (diode)

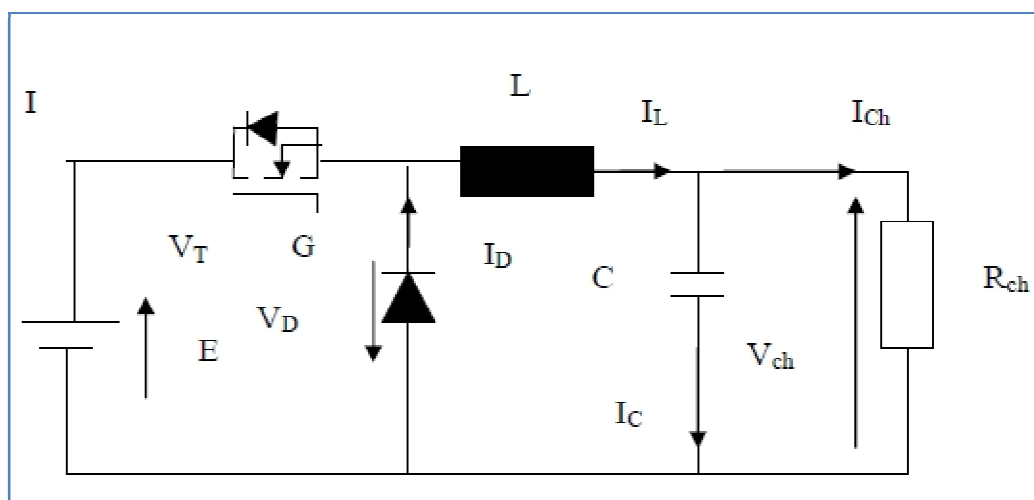


Figure I.15. Convertisseur dévolteur

I.7.2. Convertisseur survolteur

Dans ce hacheur, la tension moyenne de sortie est supérieure à la tension d'entrée, d'où son nom. Cette structure demande un interrupteur commandé à l'amorçage et au blocage (bipolaire, Mos, IGBT...) et une diode (amorçage et blocage spontanés) [17, 18].

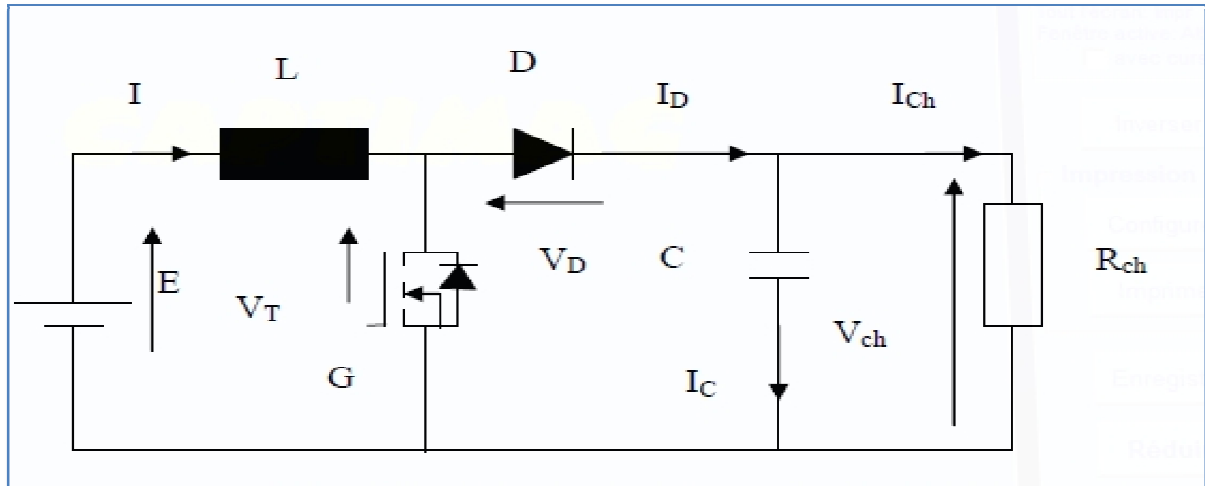


Figure I.16. Convertisseur survolteur

I.7.3. Le convertisseur Buck-Boost

La troisième topologie de base de ce convertisseur est donnée par la Figure I.17. Dans ce dispositif, la tension peut être augmentée ou diminuée selon le mode de commutation. Cependant, La tension de sortie est de signe opposé à la tension d'entrée.

Tandis que, lorsque le transistor est sur la position « on » le courant dans l'inductance augmente, l'énergie est stockée ; et quand le commutateur tourne sur la position « Off » la tension à travers l'inductance est renversée et l'énergie stockée se transfère vers la charge via la diode.

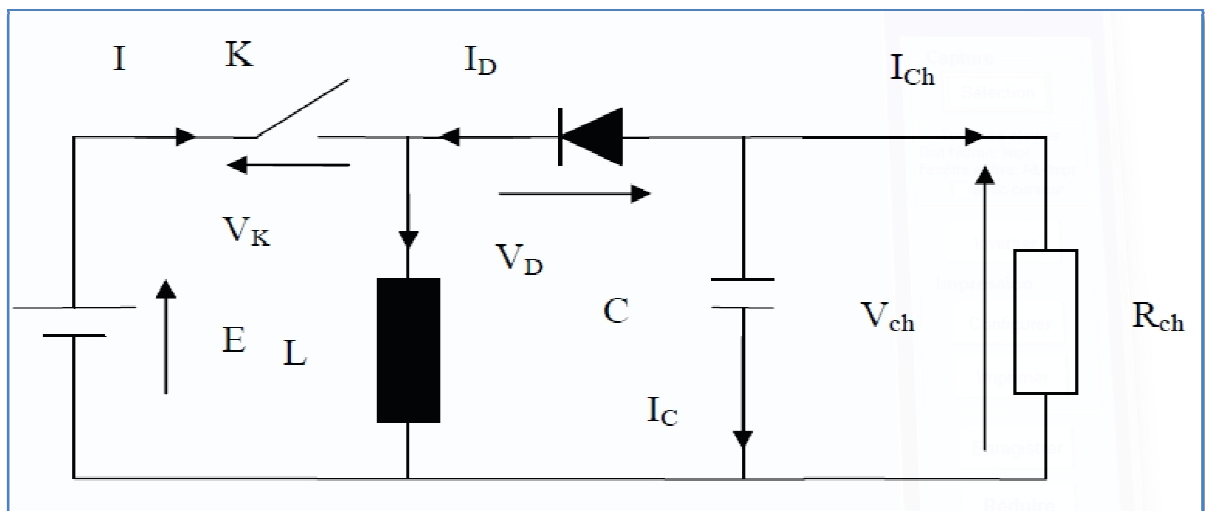


Figure I.17. Convertisseur buck-boost

I.7.4. Convertisseur flyback

Il s'agit en fait d'un buck modifié. En effet, il suffit de remplacer la self d'un buck par un transformateur câblé comme ci-dessous. Les deux enroulements sont enroulés en sens inverses. [22]

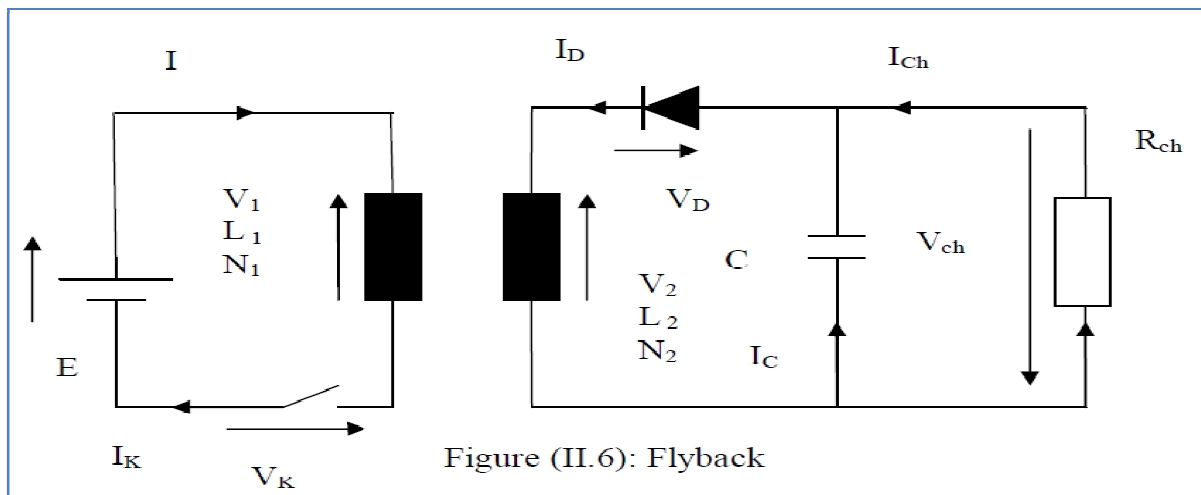


Figure (II.6): Flyback

Figure I.18. Convertisseur flyback

I.7.5. Convertisseurs DC/AC « onduleur »

L'onduleur couplé au réseau est utilisé pour les installations photovoltaïques. Il permet de transformer le courant continu, produit par les modules solaires, en un courant ondulé conforme à celui du réseau. Il adapte également le courant produit à la fréquence et à la tension du réseau. Dans les installations d'habitation, le courant solaire produit est d'abord utilisé par l'habitation elle-même, si le courant produit pour l'habitation est excédentaire, l'excédent est injecté dans le réseau. L'installation d'un onduleur couplé au réseau électrique se fait avec l'accord de l'organisme de distributeur de d'énergie électrique. Pour des raisons de sécurité, un onduleur couplé au réseau doit constamment surveiller ces perturbations et interrompre immédiatement l'injection en cas de défaillance ou de coupure. Ceci est absolument nécessaire pour permettre une intervention sans danger sur le réseau [19].

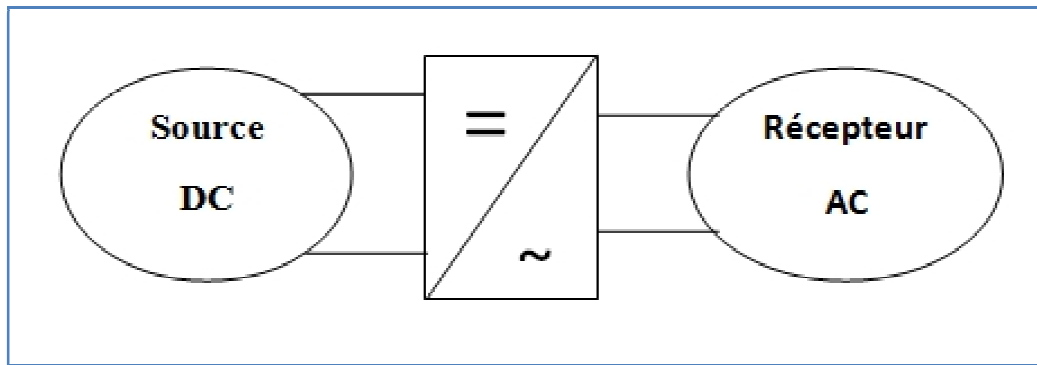


Figure I.19. Convertisseur DC/AC

La mise en série du convertisseur DC/DC avec un GPV un grand intérêt de diminuer l'impact d'ombrage et ainsi maximiser l'énergie produite.

Le convertisseur Boost a montré un grand intérêt au sein de cette structure. En effet, son élévation de tension, son bon rendement, sa fiabilité, la possibilité d'effectuer un Maximum Power Point Tracking (MPPT) et son coût faible sont des avantages déterminants.

Ces constats ont porté notre intérêt sur l'étude de la structure du convertisseur boost entrelacé.

I.8. Les différentes techniques de poursuite de point de puissance maximale

La puissance électrique produite par un panneau photovoltaïque dépend fortement de l'ensoleillement et à un degré moins important de la température des cellules. Ces deux variables influençant le comportement du système présentent des fluctuations quotidiennes et saisonnières. Pour ces raisons, le panneau photovoltaïque ne peut fournir une puissance maximale que pour une tension particulière et un courant bien déterminé ; ce fonctionnement à puissance maximale dépend de la charge à ses bornes. À cet effet et en fonction du type de cette charge, un dispositif de contrôle devra être intégré dans le circuit de commande du convertisseur (hacheur). Il existe plusieurs méthodes de recherche de point de puissance maximales :

1.8.1. Méthode de la perturbation et l'observation la (P&O)

C'est l'algorithme de poursuite du point de puissance maximale (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 la tension de référence (V_{ref}), ou en agissant directement sur le rapport cyclique du convertisseur (DC-DC), puis l'observation de l'effet sur la puissance de sortie en vue d'une éventuelle correction de ce rapport cyclique. Si la valeur de la puissance actuelle $P(k)$ du générateur 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 [08]. L'organigramme de l'algorithme de perturbation et de l'observation (P et O) est donné par la Figure I.19. Rapport cyclique. $\alpha=D$

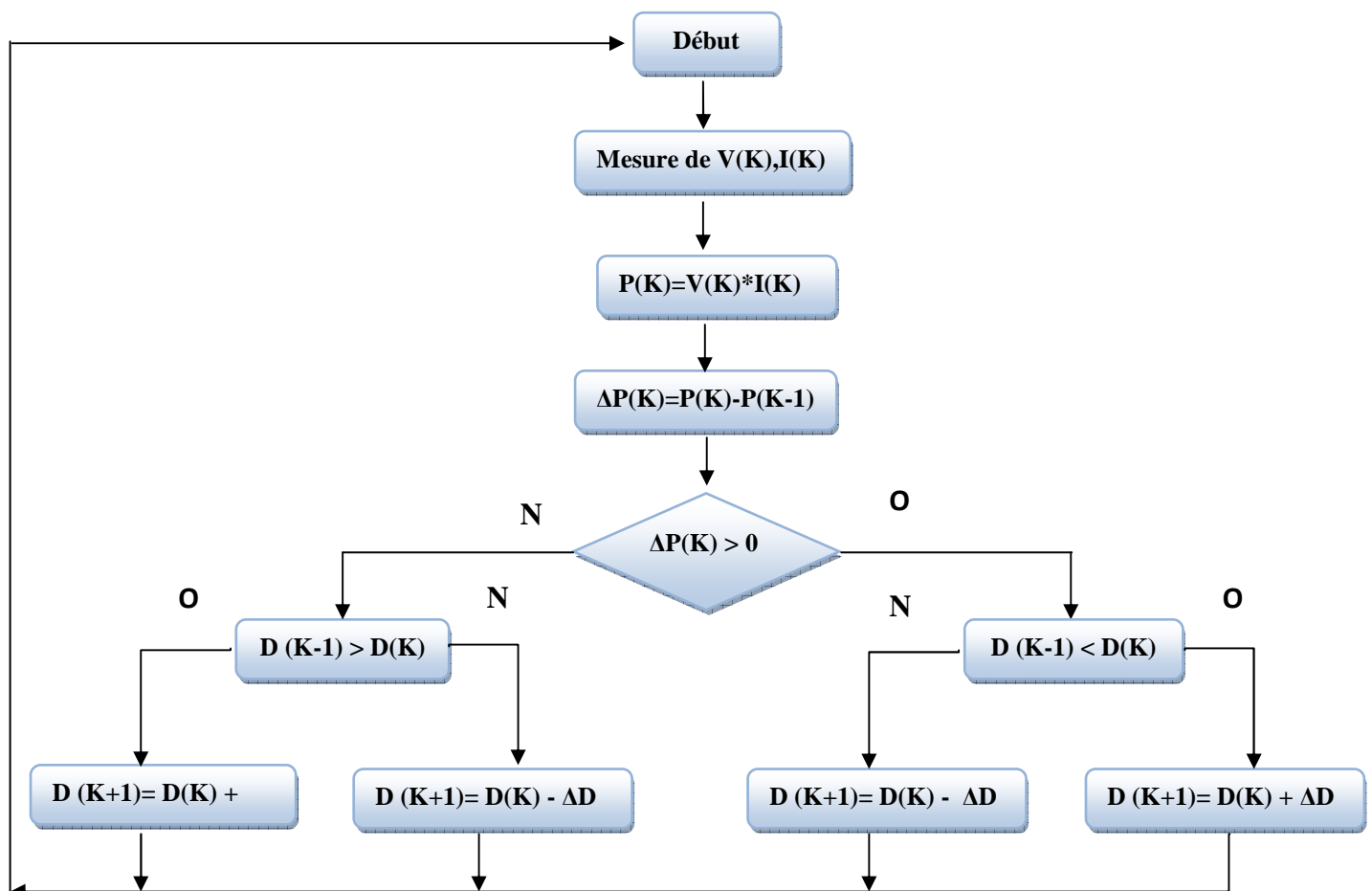


Figure I.20. Organigramme de l'algorithme Perturbation et Observation [03]

1.8.2. Méthode d'incrémentation de la conductance

Cette méthode utilise la conductance incrémentale de la source comme MPPT. Cet algorithme a été développée comme une tentative de surmonter le problème d'oscillation de l'algorithme (P&O). Les tensions et courants du panneau sont mesurés, de telle manière que le contrôleur peut calculer la conductance et la conductance incrémentale et décider de son comportement. On définit la conductance par $G = \frac{I}{V}$ et l'incrémentation par $\Delta G = \frac{dI}{dV}$

Finalement en dérivons la puissance par rapport à la tension en obtient : $\frac{I}{V} \frac{dP}{dV} = G + \Delta G$

Il nous suffit de chercher la conductance pour laquelle $G = \Delta G$, selon la valeur de G trois cas à Envisager

$$\left\{ \begin{array}{ll} \Delta G = -G & (\frac{dP}{dV} = 0) \\ \Delta G > -G & (\frac{dP}{dV} > 0) \\ \Delta G < -G & (\frac{dP}{dV} < 0) \end{array} \right.$$

Les équations ci-dessus sont employées pour déterminer la direction dans laquelle la perturbation est produite pour déplacer le point de fonctionnement vers le MPP. Cette perturbation est répétée jusqu'à ce que la $\frac{dp}{dt} = 0$ soit satisfaite.

Si ($\Delta G > -G$) alors ($\Delta P / \Delta V > 0$), le point de fonctionnement est à gauche du MPP. La tension de fonctionnement doit être augmentée pour atteindre le MPP.

Si ($\Delta G < -G$) alors ($\Delta P / \Delta V < 0$), le point de fonctionnement se trouve à droite du MPP, dans ce cas la tension doit être réduite pour atteindre le MPP [13].

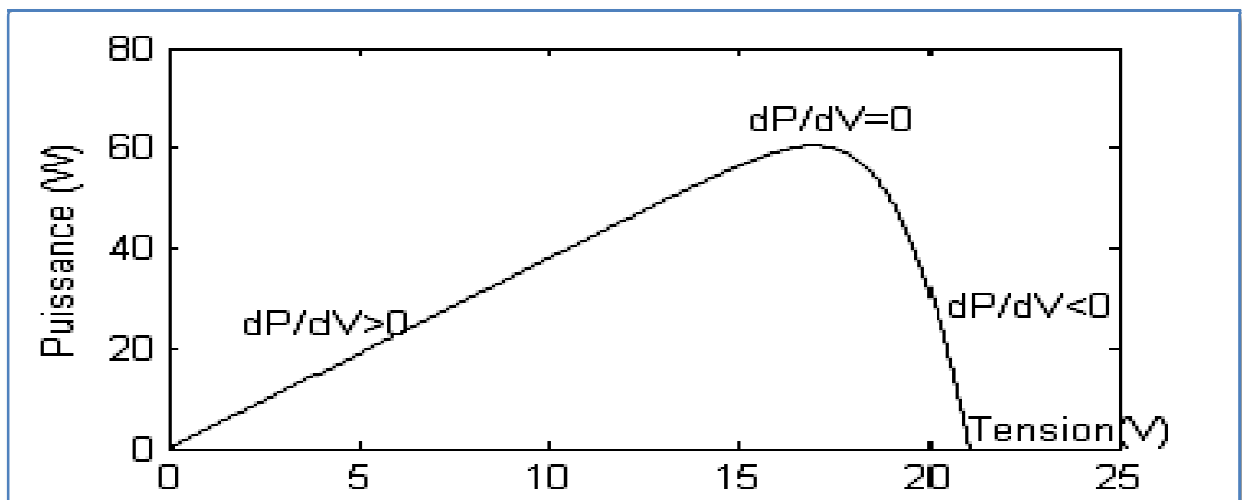


Figure I.21 : Caractéristique de la puissance tension d'un générateur photovoltaïque, Variation de $\Delta P / \Delta V$

I.8.3. Méthodes à contre réaction de la tension

Ce genre de mécanisme repose sur le contrôle de la tension de fonctionnement des panneaux par comparaison de cette tension avec une référence.

Cela génère une tension d'erreur qui fait varier le rapport cyclique de la MLI de la commande afin d'annuler cette erreur comme le montre la figure I.22 [7]:

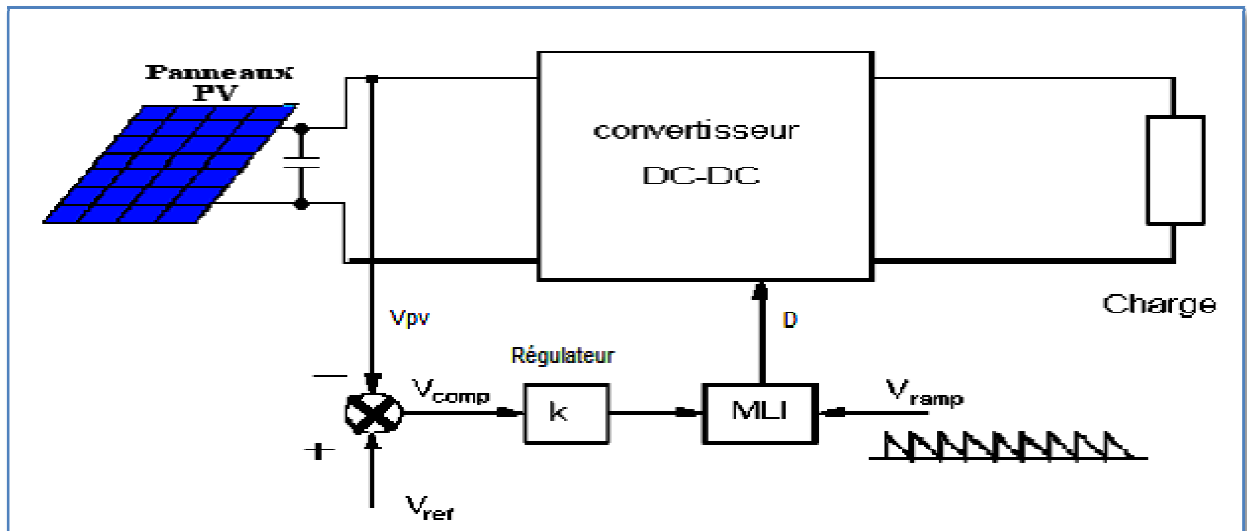


Figure I.22. Méthode avec Contre-réaction de tension et modulation [7]

Selon la nature de cette tension de référence (fixe ou variable, interne ou externe), on distingue trois types de méthodes :

I.8.4. Méthode à tension de référence fixe

Cette méthode est basée sur une simple comparaison entre la tension de sortie du panneau avec une tension de référence prédéfinie, pour ajuster continuellement le rapport cyclique du convertisseur (DC-DC). Cette tension correspond à la tension moyenne de l'intervalle des points des puissances maximales (Figure I.23), relevées par des tests sous différentes conditions d'ensoleillement et de température en agissant simplement sur les différents facteurs de pondération lors de la mise au point afin de générer le maximum de puissance. A cause de la dépendance de la tension du panneau avec l'ensoleillement et la température, la tension de puissance maximale est déviée, alors la tension de référence doit être corrigée pour différents ensoleillements et températures le long des périodes de l'année [7].

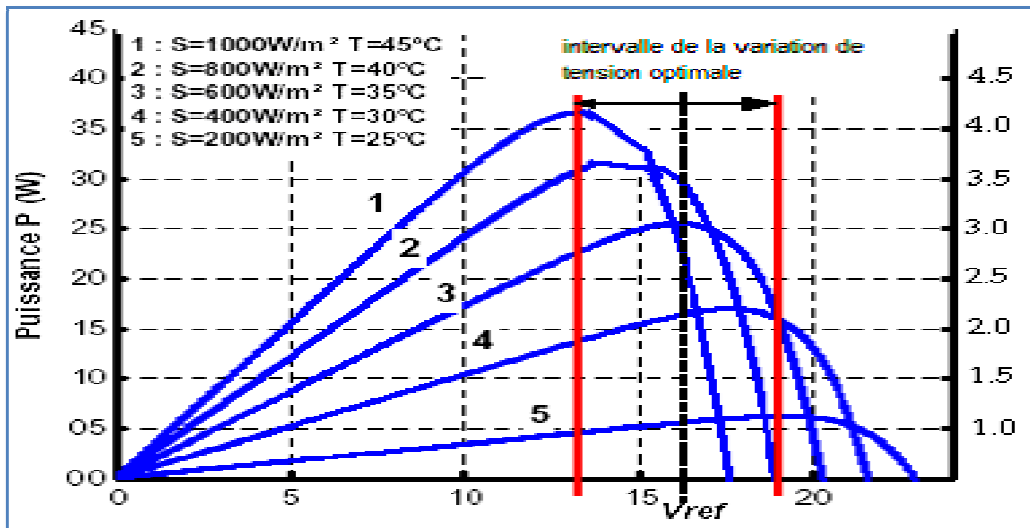


Figure I.23 : Intervalles de variation de la tension de fonctionnement optimale pour des Ensoleillements et des températures variables [15].

I.8.5.Méthode MPPT avec mesure de la tension à vide du panneau

La tension à vide du panneau (V_{oc}) est mesurée en interrompant le fonctionnement normal du système avec une certaine fréquence, en mémorisant la valeur mesurée, et puis ajustant la tension de référence sur une certaine fraction de la tension du circuit ouvert qui a été expérimentalement déterminée pour être 76% de. Cette tension de référence est comparée à la tension de fonctionnement du panneau (V) et le signal d'erreur résultant est employé comme entrée dans la commande MLI du convertisseur (DC-DC) (Figure I.22). Cette augmentation permet la commande de la tension de fonctionnement du panneau photovoltaïque avec la considération de facteurs importants comme l'ensoleillement et la température. En plus, le vieillissement et l'accumulation de la poussière sur la surface de cellules sont aussi pris en compte [7].

I.8.6.Méthode MPPT avec cellule pilote

Pour éviter les inconvénients liés à l'interruption fréquente de l'exploitation du système, on propose l'utilisation d'une cellule pilote. C'est une cellule photovoltaïque simple qui est électriquement indépendante du reste de la rangée photovoltaïque. Sa tension est constamment mesurée, elle fournit donc l'information implicite du reste des conditions de fonctionnement courantes du panneau. La tension de la cellule pilote est multipliée par un certain facteur constant pour être comparée à la tension de référence de la boucle de contre réaction. Puisque cette méthode emploie toujours un facteur fixe pour estimer la tension

optimale d'une valeur mesurée de, le point de puissance maximale n'est toujours pas vraiment obtenu. Cette technique est fondée sur la connaissance des caractéristiques de la rangée photovoltaïque pour estimer le lieu du point de puissance maximale [7].

I.8.7.Méthode avec contre réaction du courant :

Dans toutes les méthodes (MPPT) présentées jusqu'ici, une mesure de (I_{pv}) et (V_p) a été employée pour obtenir des informations sur la puissance de sortie du panneau. Cette nouvelle méthode (MPPT) utilise seulement une mesure de courant pour obtenir l'information sur le point opérationnel et actuel du système [14]

L'avantage de cette méthode est qu'elle est simple, contrairement aux méthodes mentionnées précédemment.

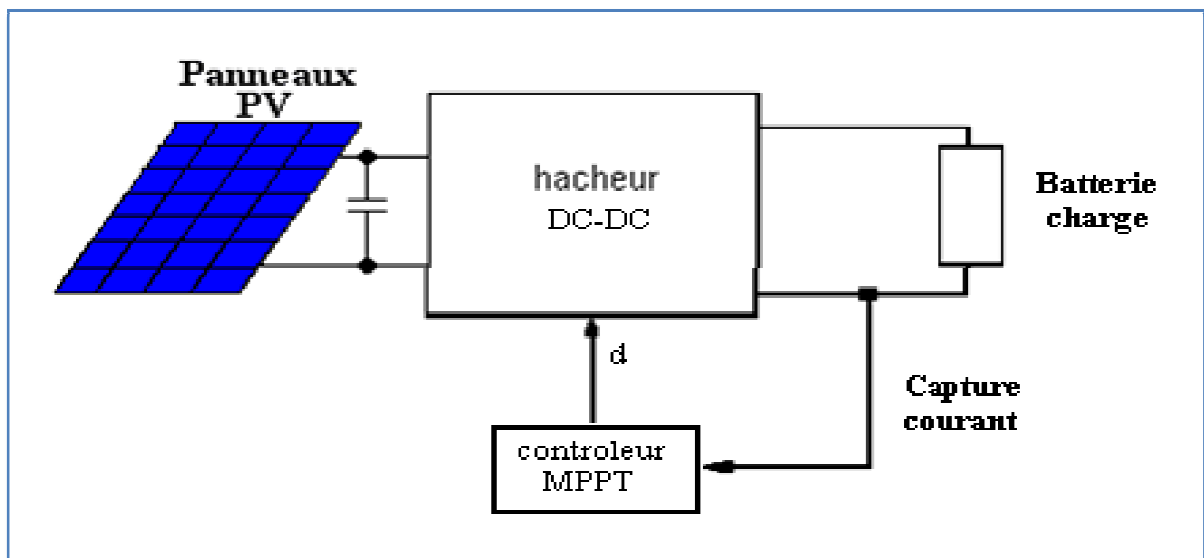


Figure I.24. Méthode de la contre réaction en courant

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons donné un aperçu général de la production de l'énergie solaire photovoltaïque par le biais de module solaire, nous avons cité les modèles de convertisseurs utilisés pour les applications PV ; Puis nous avons énuméré les différents modes de transferts de puissance. Et enfin nous avons discuter les différentes méthodes de recherches de point de puissance maximales.

II. Introduction

La connexion directe du système photovoltaïque qui est constitué d'une rangée de module PV avec un nombre choisi de cellules et d'une charge n'exige aucune commande d'électronique de traitement de puissance. Cette structure est si simple mais elle présente des limitations.

La puissance assurée par le système PV est directement le produit courant-tension qui peut flouter sensiblement selon l'état de la charge. En outre, il n'y a aucune manière de commander la tension des panneaux (PV) pour assurer un transit de puissance maximum.

Afin de surmonter ce problème, des circuits électroniques sont utilisés pour la commande et la limitation des courants de charge [11].

Les convertisseurs statiques adaptées aux applications solaire photovoltaïques, sont souvent appelés convertisseurs solaire, ils ont comme objectifs d'adapter l'énergie électrique qui provient du panneau photovoltaïque pour pouvoir alimenter une charge continue ou alternative.

L'objectif de ce chapitre est de faire une étude descriptive générale des deux structures de la conversion DC-DC « le boost élémentaire » et « le boost entrelacé ».

II.1. Etude d'un hacheur survolteur (boost)

Un convertisseur Boost, ou hacheur parallèle, est une alimentation à découpage qui convertit une tension continue en une autre tension continue de plus forte valeur [4]. Ce montage permet de fournir une tension moyenne V_c à partir d'une source de tension continue $E < V_c$. Le montage étudié est par la figure II-1 :

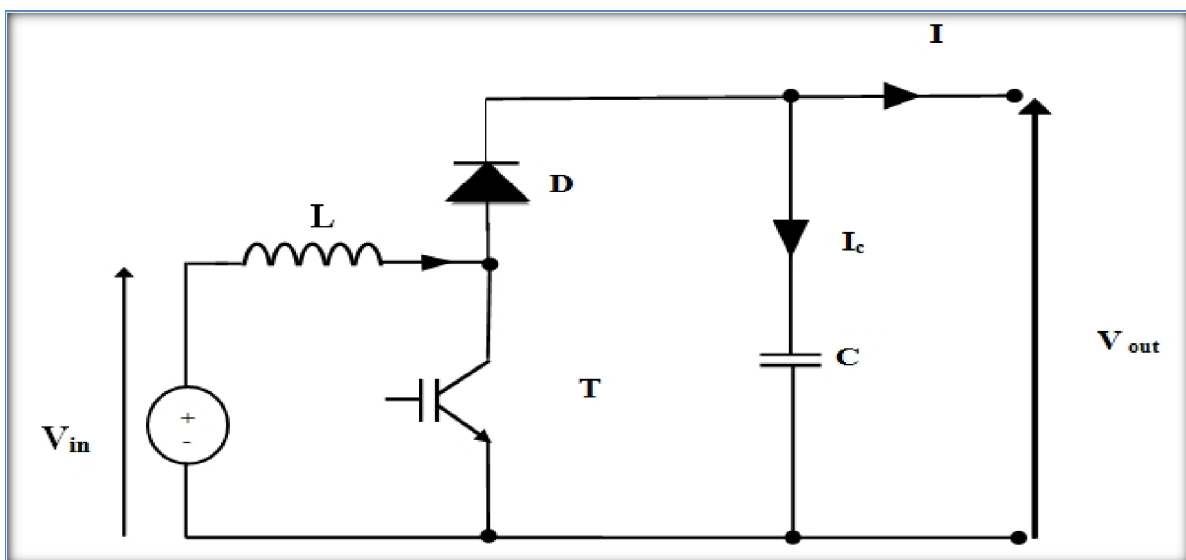


Figure II-1 : hacheur boost élémentaire

Le fonctionnement du convertisseur élévateur est basé sur la charge et la décharge de l'inductance de lissage, placées à l'entrée de celui-ci. Les phases d'augmentation et de diminution du courant dans l'inductance correspondent respectivement à l'état fermé et ouvert de l'interrupteur T. En dépendance du point de fonctionnement et de la valeur de l'inductance de lissage, trois modes de fonctionnement peuvent être observés :

1. Conduction continue : Le courant dans l'inductance ne s'annule pas pendant la durée de la période de pulsation.
2. Conduction discontinue : Le courant dans l'inductance s'annule dans la durée de la période de pulsation durant un laps de temps non nul.
3. Conduction critique : Ce régime de conduction situe la limite entre le régime de conduction continue et discontinue. C'est-à-dire que le courant dans l'inductance s'annule de façon ponctuelle dans l'intervalle de temps T [16].

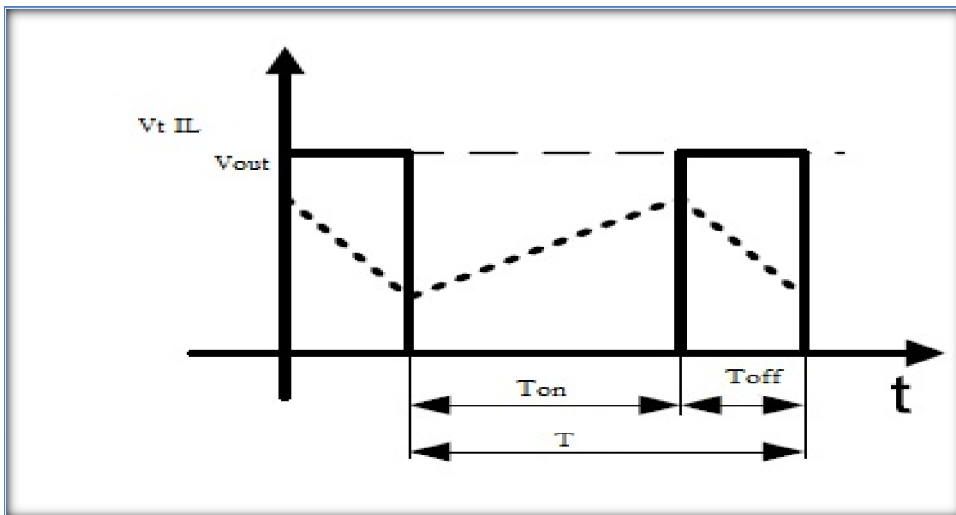


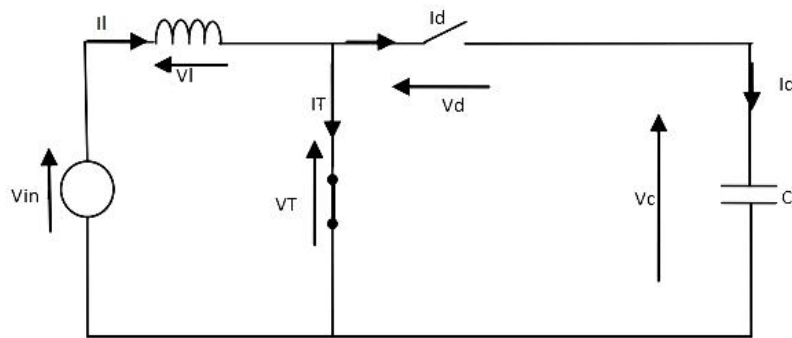
Figure II-2 : Allure tension Vt et courant IL

Les grandeurs électrique de sortie (V_c et I_c) sont liées à celles de l'entrées (V_{in} et I_L) en fonction du rapport cyclique du signal qui commande l'interrupteur du convertisseur par les relations suivantes :

$$V_c = \frac{V_{in}}{1-D} \tag{II-1}$$

$$I_c = \frac{I_L}{1-D} \tag{II-2}$$

- Pour $t \in [0 \text{ à } T]$ T conduit, D ouverte



$$\begin{cases} I_d = I_c = 0 \\ V_T = 0 \end{cases} \quad (II-3)$$

$$\begin{cases} V_d = V_T - V_c = -V_c \\ V_T = \frac{2L}{T} \frac{dI_T}{dt} = 0 \end{cases} \quad (II-4)$$

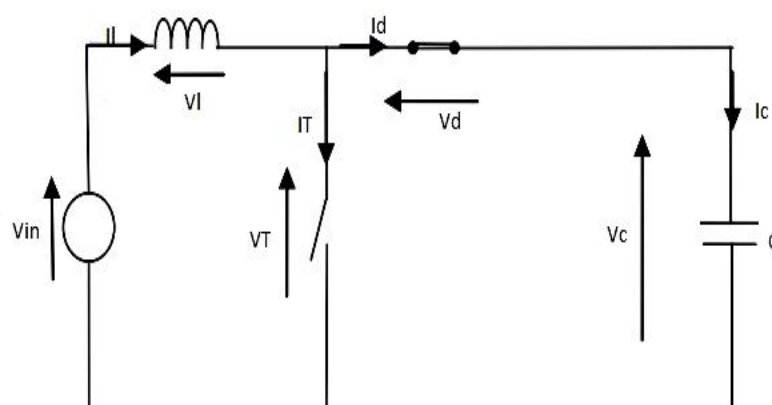
$$I_L = I_d + I_T = I_T \quad (II-5)$$

Donc:

$$I_L = I_T = \frac{2L}{T} \frac{dI_T}{dt} + I_1 \quad (II-6)$$

$$I_{L_{max}} = \frac{2L}{T} \alpha T + I_0 \quad (II-7)$$

Pour $t \in [T, 2T]$ D conduit, T ouverte



$$\begin{cases} V_d = 0 \\ I_T = 0 \end{cases} \quad (II-8)$$

$$VT = Vd + Vc = Vc \tag{II-9}$$

$$IL = Id + Ic \tag{II-10}$$

$$Vc = \frac{Vc}{\alpha} - L \frac{dIL}{dt} \tag{II-11}$$

$$IL = \frac{Vc}{L} \alpha T - I_0 \tag{II-12}$$

Détermination de I_1 et I_2 :

$$IL(0) = I_0$$

D'où : $I_1 = I_0$

$$IL(\alpha T) = IL(\alpha T^+) \tag{II-13}$$

Donc :

$$\frac{Vc}{L} \alpha T + I_0 = \frac{Vc}{L} \alpha T + I_2 \tag{II-14}$$

$$I_2 = I_0 + \frac{Vc}{L} \alpha T \tag{II-15}$$

- Chronogrammes des différentes grandeurs:

Les tensions:

$$VT = \begin{cases} 0 & t \in [0, T] \\ \frac{Vc}{\alpha} & t \in [T, T] \end{cases}$$

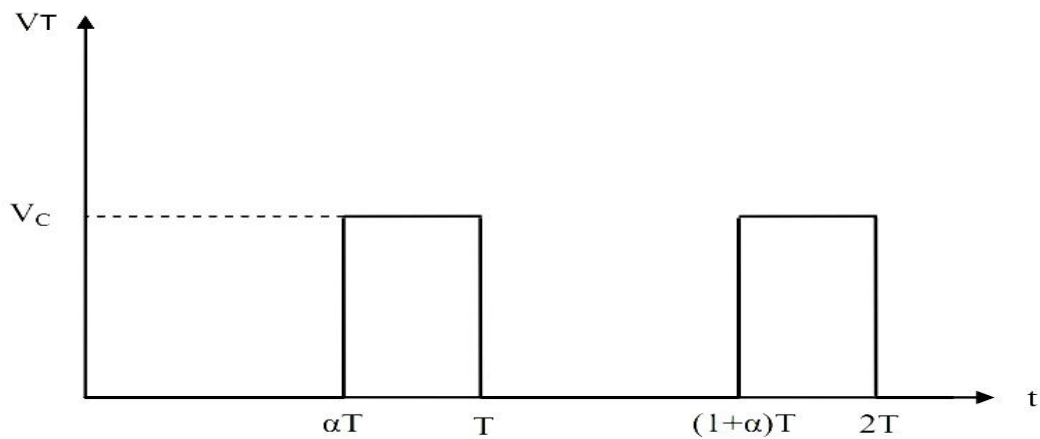


Figure II-5 : Allure de tension aux bornes du thyristor

$$VT_{moy} = (1 - \alpha) Vc \tag{II-16}$$

$$VT_{moy} = \frac{Vc}{\alpha} \tag{II-17}$$

Car on a $VT = \frac{Vc}{\alpha} - L \frac{dIL}{dt}$

Et la valeur moyenne de $L \frac{di_L}{dt} = 0$ donc:

$$V_c = \frac{V_d}{\alpha} \text{ c'est la démonstration de l'équation (II-1)}$$

$$V_d = \begin{cases} -V_c & t \in [0, T] \\ 0 & t \in [T, T] \end{cases}$$

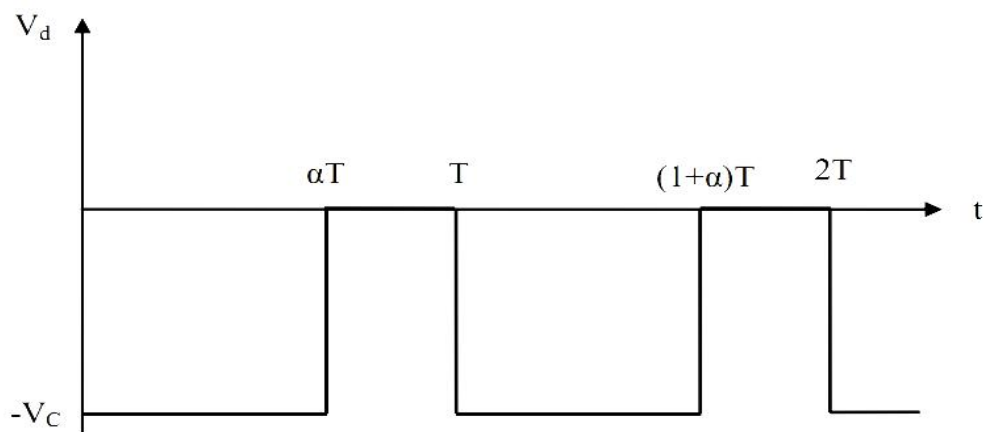


Figure II-6 : Allure de tension aux bornes de la diode

Les courants

$$i_L = \frac{V_c}{L}t + I_0 \quad \text{pour} \quad t \in [0, \alpha T] \tag{II-18}$$

$$i_L = \frac{V_c}{L}(\alpha T - t) + I_0 \quad \text{pour} \quad t \in [\alpha T, T] \tag{II-19}$$

On a:

$$I_2 = I_0 + \frac{V_c}{L} \alpha T \tag{II-20}$$

$$i_L = \frac{V_c}{L}(\alpha T - t) + I_0 + \frac{V_c}{L} \alpha T \tag{II-21}$$

$$i_L = -\frac{V_c}{L}t + \frac{V_c}{L} \alpha T + I_0 = -\frac{V_c}{L}(t - \alpha T) + I_0 \tag{II-22}$$

$$i_L = \begin{cases} \frac{V_c}{L}t + I_0 & t \in [0, \alpha T] \\ -\frac{V_c}{L}(t - \alpha T) + I_0 & t \in [\alpha T, T] \end{cases} \tag{II-23}$$

$$i_L = \begin{cases} -\frac{V_c}{L}(t - \alpha T) + I_0 & t \in [\alpha T, T] \end{cases} \tag{II-24}$$

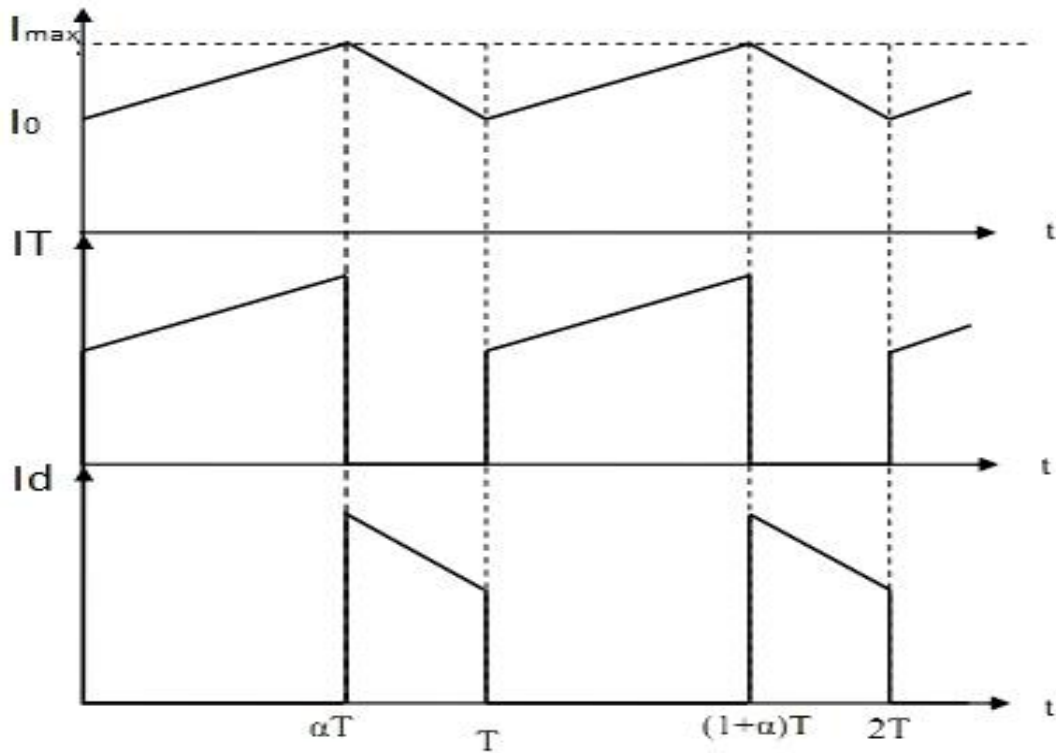


Figure II-7 : Allures des différents courants

Les puissances

Puissance fournie par la source

$$P_{source} = U_{source} \cdot I_L \tag{II-25}$$

$$P_{source} = \int_0^T U_{source} \cdot I_L dt = \int_0^T U_{source} \cdot I_L dt \tag{II-26}$$

$$P_{source} = U_{source} \cdot I_L \tag{II-27}$$

Puissance reçue par la charge

$$P_{charge} = U_{charge} \cdot I_L \tag{II-28}$$

$$P_{charge} = \int_0^T U_{charge} \cdot I_L dt \tag{II-29}$$

$$P_{charge} = V_c \cdot I_L \tag{II-30}$$

Pour un hacheur parfait on a : $U_{source} = U_{charge}$

$$\text{Donc : } P_{source} \cdot D = V_c \cdot I_L \tag{II-31}$$

$$(1 - \alpha) \cdot V_c \cdot I_L = V_c \cdot I_L \tag{II-32}$$

$I_L = \frac{V_c \cdot D}{1 - D}$ C'est la démonstration de l'équation (II-2)

En régime permanent le courant I_L représente des ondulations.

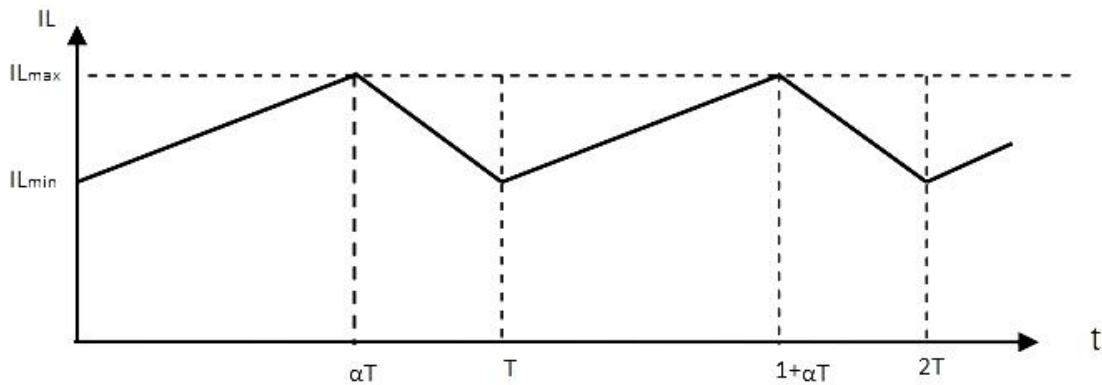


Figure II-8 : Allure du courant dans l'inductance

$$\Delta I_L = I_{Lmax} - I_{Lmin} = \frac{V_{in} \alpha T}{L} \quad (II-33)$$

II.3. Dimensionnement du survolteur.

Le convertisseur survolteur de la figure II-1 est composé de trois éléments qui sont l'inductance de lissage, la cellule de commutation et le condensateur de filtrage placé à la sortie du convertisseur du côté haute tension. La cellule de commutation est constituée d'interrupteurs adaptés à la puissance et au niveau de tension de l'application ainsi qu'à la fonction souhaitée [17].

L'inductance de lissage L_1 est utilisée pour limiter l'ondulation du courant dans le convertisseur et dans la source.

Le condensateur de filtrage permet de limiter les ondulations de tension dues au découpage à la sortie du convertisseur.

II.3.1. Calcul de l'inductance de lissage :

L'ondulation du courant dans l'inductance est calculée en considérant la tension de sortie continue, c'est-à-dire en négligeant l'ondulation de tension vis-à-vis de la valeur moyenne (Figure-9).

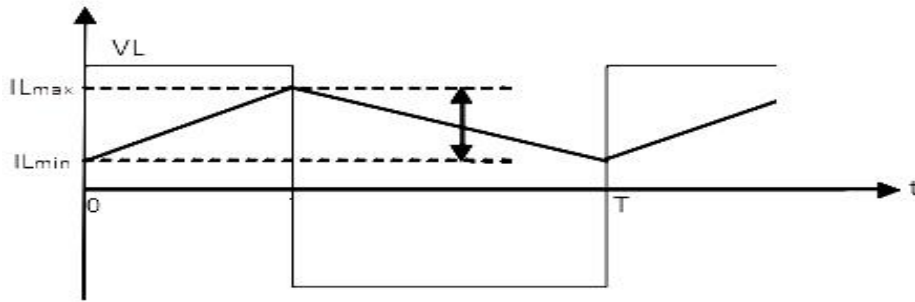


Figure II-9 : Ondulation de courant

Calculons l'ondulation du courant :

Pour $0 \leq t \leq \alpha T$

$$IL(t) = \frac{V_L}{L} t \quad (II-34)$$

à $t = \alpha T$

$$IL(\alpha T) = \frac{V_L}{L} \alpha T \quad (II-35)$$

$$\Delta IL = IL(\alpha T) - IL(0) = \frac{V_L}{L} \alpha T \quad (II-36)$$

Or: $V_{out} = \frac{V_L}{1 - \alpha}$

Nous pouvons donc écrire :

$$\Delta IL = \alpha (1 - \alpha) \frac{V_{out}}{L f} \quad (II-37)$$

L'inductance est calculée en fonction de l'ondulation maximale de courant souhaitée.

L'ondulation maximale est obtenue pour un rapport cyclique de 1/2 car :

$$d\Delta IL / d\alpha = 0 \text{ pour } \alpha = 1/2 \quad (II-38)$$

L'ondulation maximale est donc donnée par :

$$\Delta I_{max} = \frac{V_{out}}{4 L f} \quad (II-39)$$

L'inductance minimale pour un hacheur survolteur est donnée par la relation :

$$L_{min} = \frac{V_{out}}{4 f \Delta I_{max}} \quad (II-40)$$

II.3.2. Calcul du condensateur de filtrage

L'ondulation de tension à la sortie résulte du courant alternatif dans le condensateur.

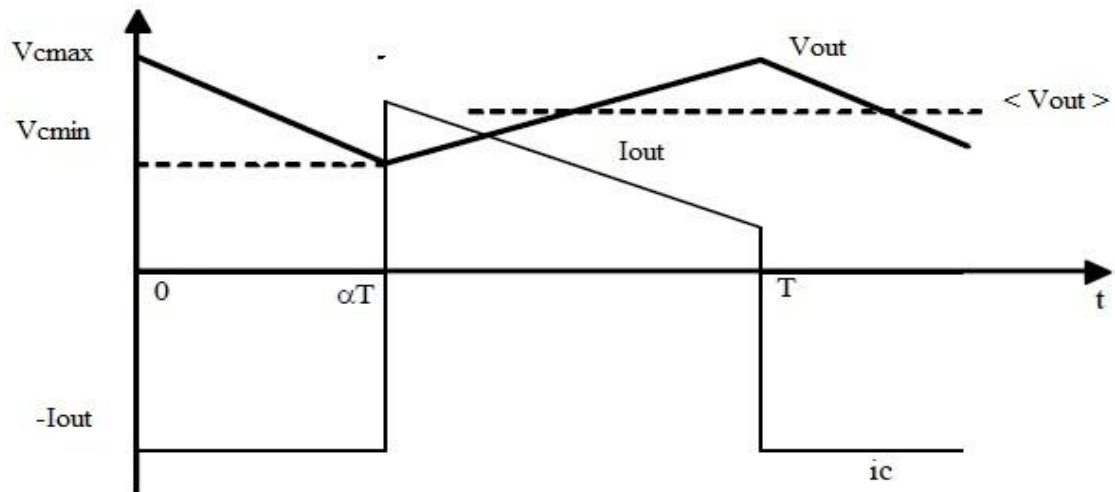


Figure II-10 : Ondulation de tension

Calculons l'ondulation de tension :

Pour $0 \leq t \leq \alpha T$

$$\frac{dV_c}{dt} = -\frac{I_{out}}{C} \quad (II-41)$$

En $t = \alpha T$

$$\frac{dV_c}{dt} = \frac{I_{out}}{C} \quad (II-42)$$

D'où : $\Delta V_c = \frac{I_{out} \alpha T}{C}$

Or : $IL = \frac{I_{out} \alpha T}{C}$

Nous pouvons donc écrire : $\Delta V_c = \frac{IL}{C} \quad (II-43)$

Paramètres :

- C : capacité du condensateur de filtrage (F)
- IL : Courant dans l'inductance (A)
- V_{Cmin} : Tension minimale aux bornes du condensateur (V)
- V_{Cmax} : Tension maximale aux bornes du condensateur (V)
- ΔV_{out} : Ondulation de tension aux bornes du condensateur (V)

L'ondulation de tension maximale est obtenue pour un courant maximal et un rapport cyclique de 1/2. Soit :

$$\Delta V_{out} \approx \frac{I_{in}}{2Cf} \quad (II-44)$$

La capacité minimale du condensateur est donnée par la relation :

$$C \geq \frac{I_{in}}{\Delta V_{out} \cdot 2f} \quad (II-45)$$

- En régime permanent, le courant présente des ondulations. Afin de limiter les pertes en conduction et diminuer le poids du convertisseur, une structure à deux niveaux « parallèle » peut être envisagée. Cette structure consiste à placer en parallèle deux convertisseurs élévateurs élémentaires et de décaler les commandes de ce dernier, afin de diminuer l'amplitude et augmenter la fréquence de l'ondulation du courant à l'entrée du convertisseur.

II.4.Mise en parallèle de deux convertisseurs boost

La mise en parallèle des convertisseurs est une structure qui permet de partager le courant entre plusieurs cellules élémentaires. Le courant traversant chaque cellule est alors moins important. On diminue ainsi les contraintes en courant des composants. On présente sur la figure un convertisseur continu-continu, constitué de deux boost élémentaires identiques mis en parallèle. Chaque cellule fournit la moitié de la puissance totale. Cette structure est utilisée pour réduire l'ondulation du courant d'entrée.

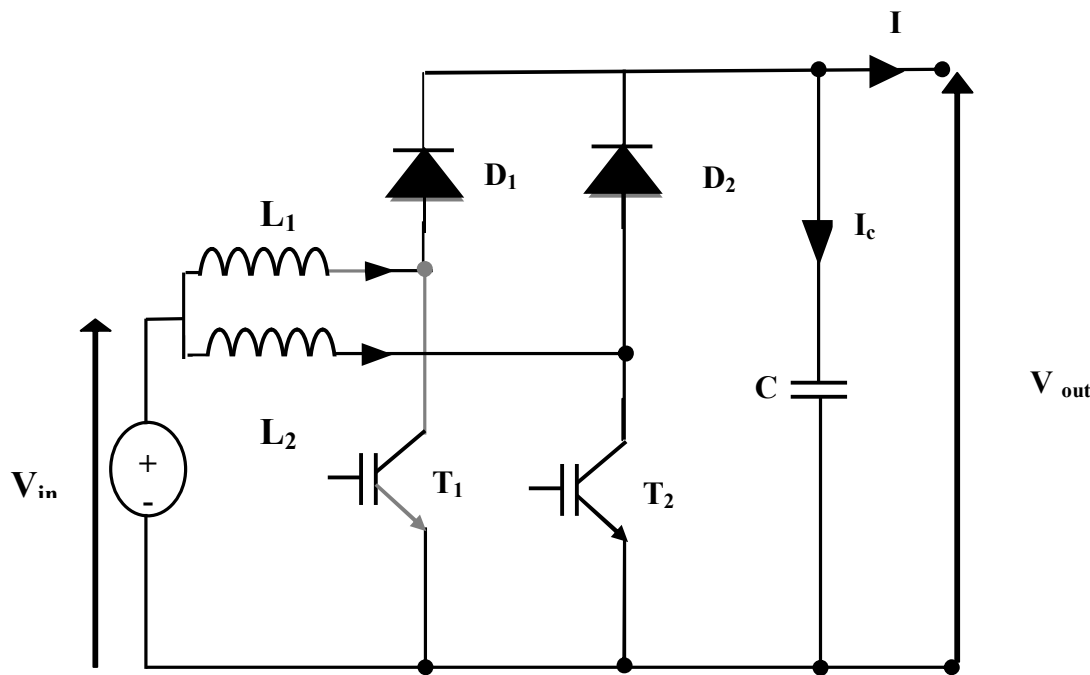


Figure II-11 : hacheur boost a deux niveaux « entrelacé »

Dans la structure du convertisseur de la figure II-11, chaque boost élémentaire est commandé avec le même rapport cyclique et les commandes sont décalées entre elles d'une demi-période. Le courant moyen passant dans chaque cellule correspond à la moitié du courant d'entrée.

La tension de sortie a la même valeur moyenne que celle du boost classique pour un rapport cyclique donné. Tant que les deux convertisseurs élémentaires sont identiques, les courants dans les inductances sont de même forme, mais ils sont décalés d'une demi-période entre eux. Selon l'équation 46 (l'ondulation de courant dans chaque inductance sont toujours égales à :

$$\Delta I_{L1} = \Delta I_{L2} = \frac{V_{in} D(1-D)}{fL} \quad (II-46)$$

II.4.1. Etude de l'ondulation du courant de source :

Pour un rapport cyclique inférieur à 0,5, la forme du courant de source est représentée sur la figure 12

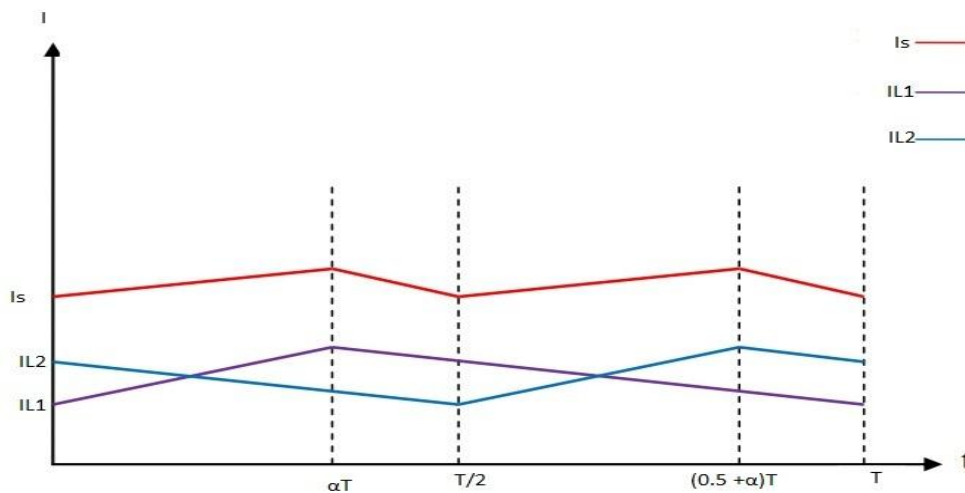


Figure II-12 : Courant dans les deux inductances et courant de source Pour $D < 0.5$

$$I_s = I_{L1} + I_{L2} \quad (II-47)$$

$$\Delta I_s = I_{s(\alpha T)} - I_{s(0)} \quad (II-48)$$

$$I_s(\alpha T) = I_{L1}(\alpha T) + I_{L2}(\alpha T) \quad (II-49)$$

Pour raison de symétrie on a :

$$i_{L1}(\alpha T) = i_{L1}\left(\frac{T}{2}\right) + \alpha T \tag{II-50}$$

$$i_{L2}(\alpha T) = \frac{2I_{L1}(\frac{T}{2})}{2} + \frac{2I_{L2}(\frac{T}{2})}{2} \alpha T + 2I_{L2} \tag{II-51}$$

$$i_{L2}(\frac{T}{2}) = I_{L2} \left(\frac{T}{2}\right) \tag{II-52}$$

$$I_{L2} \left(\frac{T}{2}\right) = I_{L1} \left(\frac{T}{2}\right) + I_{L2} \left(\frac{T}{2}\right) \tag{II-53}$$

Du graphe des courants on a :

$$I_{L1} \left(\frac{T}{2}\right) = I_{L1} \tag{II-54}$$

$$I_{L2}(\alpha T) = \frac{2I_{L1}(\frac{T}{2})}{2} - \frac{2I_{L2}(\frac{T}{2})}{2} \alpha T + 2I_{L2} \tag{II-55}$$

$$\Delta I_s = \frac{2I_{L1}(\frac{T}{2}) - 2I_{L2}(\frac{T}{2})}{2} = \frac{2I_{L1} - 2I_{L2}}{2} \Delta I_L \tag{II-56}$$

Pour un rapport cyclique supérieur à 0.5, la forme du courant de source est représentée sur la figure II-13

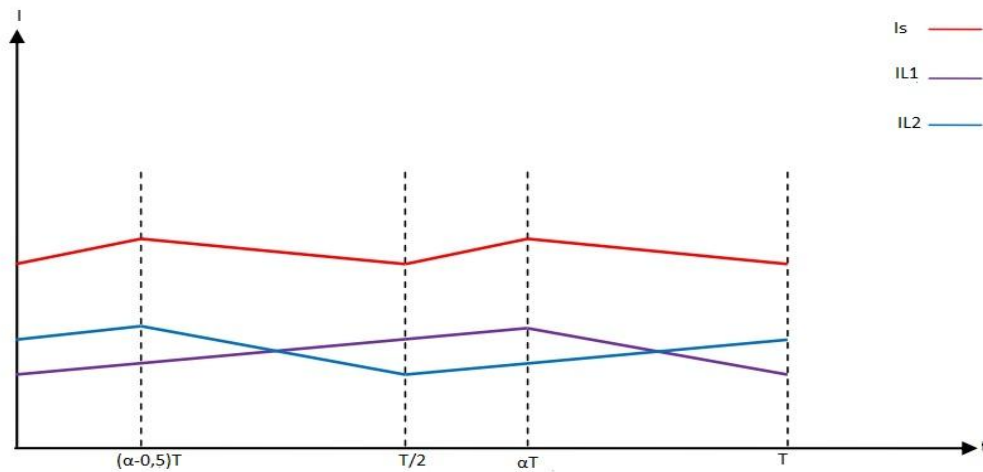


Figure II-13 : Courant dans les deux inductances et courant de source Pour $\alpha > 0.5$

Pour ce rapport cyclique, l'ondulation du courant de source s'écrit [20] :

$$\Delta I_s = I_{L1} - I_{L2} \tag{II-57}$$

$$I_{L1} = I_{L2} \tag{II-58}$$

$$i_{L1} = \frac{1}{L} \int_0^T v_{L1} dt \quad (II-59)$$

Pour raison de symétrie on a :

$$i_{L1} = \frac{1}{L} \int_0^T v_{L1} dt \quad (II-60)$$

$$i_{L1} = \frac{1}{L} \int_0^T v_{L1} dt = \frac{1}{L} \int_0^T v_{L1} dt \quad (II-61)$$

$$i_{L1} = \frac{1}{L} \int_0^T v_{L1} dt \quad (II-62)$$

$$i_{L1} = \frac{1}{L} \int_0^T v_{L1} dt = \frac{1}{L} \int_0^T v_{L1} dt + \frac{1}{L} \int_0^T v_{L1} dt \quad (II-63)$$

Du graphe des courants on a :

$$i_{L1} = \frac{1}{L} \int_0^T v_{L1} dt \quad (II-64)$$

$$i_{L1} = \frac{1}{L} \int_0^T v_{L1} dt = T \cdot \frac{1}{L} \int_0^T v_{L1} dt \quad (II-65)$$

$$\Delta i_{L1} = \frac{1}{L} \int_0^T v_{L1} dt \cdot \Delta IL \quad (II-66)$$

II.5.Comparaison entre le hacheur simple et la hacheur entrelacée

- Le courant traversant les éléments de chaque cellule du hacheur Boost entrelacée est moins important que le courant traversant les éléments du hacheur Boost élémentaire.
- Les pertes de conduction du hacheur boost entrelacée sont très petite par rapport à celle du hacheur boost élémentaire.
- Les pertes de commutation dans le hacheur boost entrelacée sont grande par rapport à celle du hacheur boost élémentaire.
- L'ondulation du courant dans la structure du hacheur boost entrelacé est moins importante par a celle du hacheur boost élémentaire.

Pour comparer le rapport de l'ondulation du courant de source, il suffit d'analyser la variation de rapport \hat{I}_s entrelacée sur \hat{I}_s élémentaire en fonction du rapport cyclique représentée sur la figure suivante [20]:

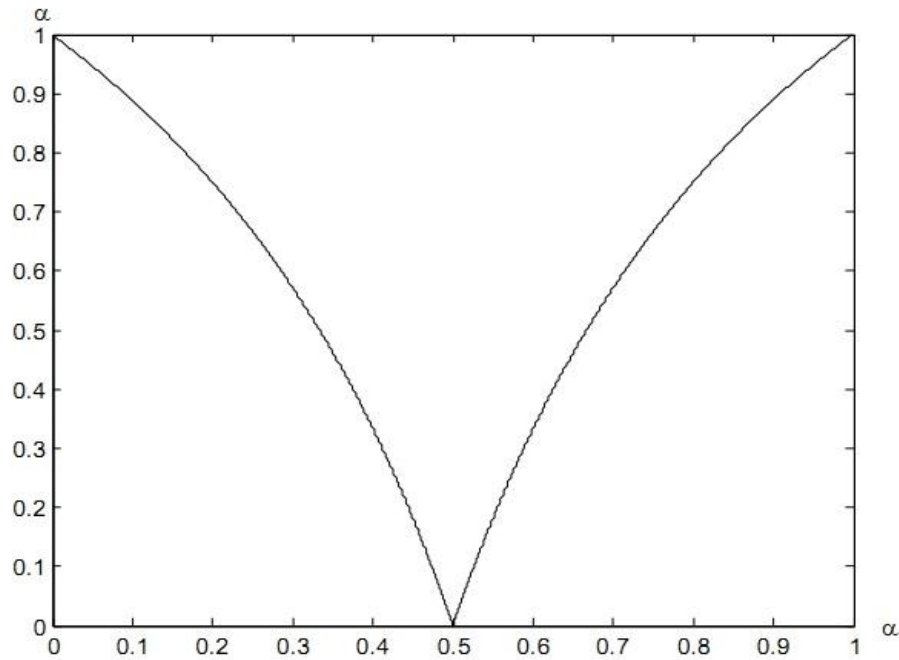


Figure II-14: Variation du rapport des ondulations du courant de charge en fonction de α [20]

Le rapport cyclique varie entre 0 et 1.

Pour α varie entre 0 et 0.5, le rapport de la variation de l'ondulation de courant de source diminue.

Pour α varie entre 0.5 et 1, le rapport de la variation de l'ondulation de courant de source augmente.

II.6. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons effectué un aperçu sur le convertisseur boost élémentaire et le boost entrelacé, ce dernier permet de diminuer l'ondulation et doubler la fréquence du courant de source et de diminuer les contraintes en courant sur les composants.

III.1. Introduction

A fin d'étudier le comportement d'un système photovoltaïque, nous allons modéliser les différents composants de ce système et simuler son fonctionnement sous l'environnement MATLAB-sumulink.

III.2. Système photovoltaïque

Le système que nous proposons pour l'étude et la simulation est schématisé par la Figure III.1.

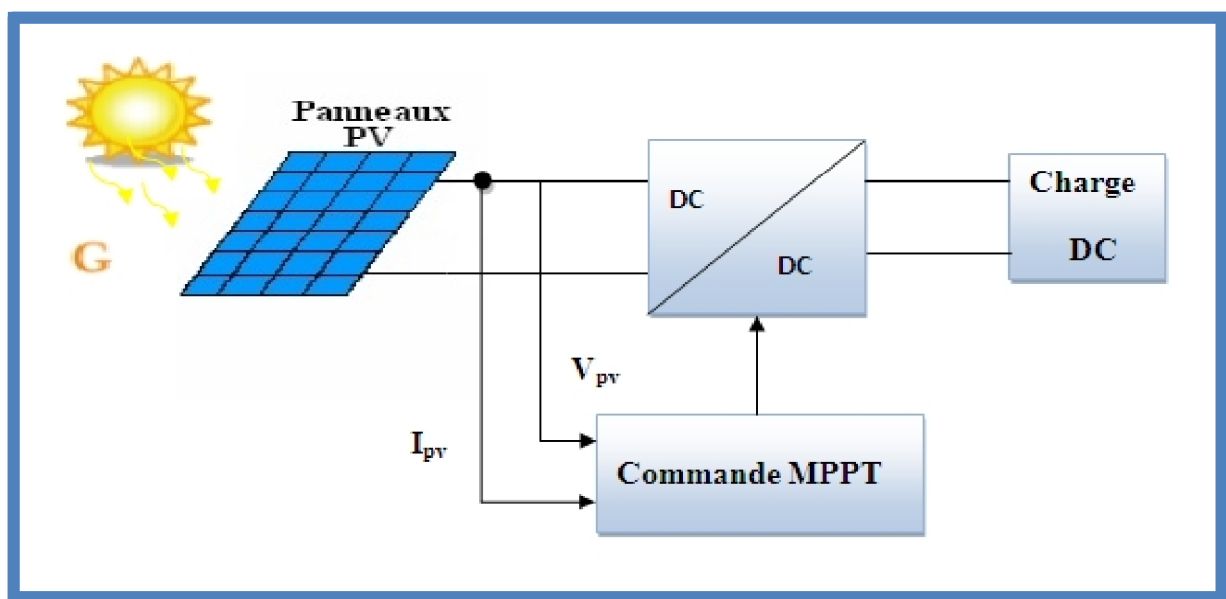


Figure III-1 : Schéma du système photovoltaïque à étudier

III.2.1. Présentation du système

Le système représenté dans la figure III-1 est constitués de :

III.2.1.1. Le générateur (PV)

Le module photovoltaïque choisi pour la modélisation contient 32 cellules solaires du silicium multi cristallines, et fournit une puissance maximale de 80W. Les caractéristiques physiques et électriques de ce module sont données par le tableau suivant :

Caractéristiques physiques (panneau du labo LATAGE)	
Nombre de cellules en série(N_s)	32
Nombre de cellules en parallèle(N_p)	1
Caractéristiques électriques ($G=1000W/m^2$, $T_a=25^\circ C$)	
Puissance maximale (P_{max})	80W
Courant de court-circuit (I_{cc})	4.96A
Tension du circuit ouvert (V_{co})	21.9V
Courant au point de MPP (I_{PPM})	4.7A
Tension au point de MPP (V_{PPM})	17.2V

**Tableau IV.1: Caractéristiques physiques et électriques
Du générateur PV choisi pour modélisation et la simulation.**



Figure III-2 : photo du panneau du laboratoire LATAGE « UMMTO »

III.2.1.2 Convertisseur Boost (Continu- Continu) entrelacé

Ce convertisseur est connu sous le nom d'élévateur de tension, qui est l'étage d'adaptation ($DC-DC$) entre le (GPV) et la charge de sortie. Dans notre système nous avons opté pour un convertisseur élévateur de type boost à deux bras.

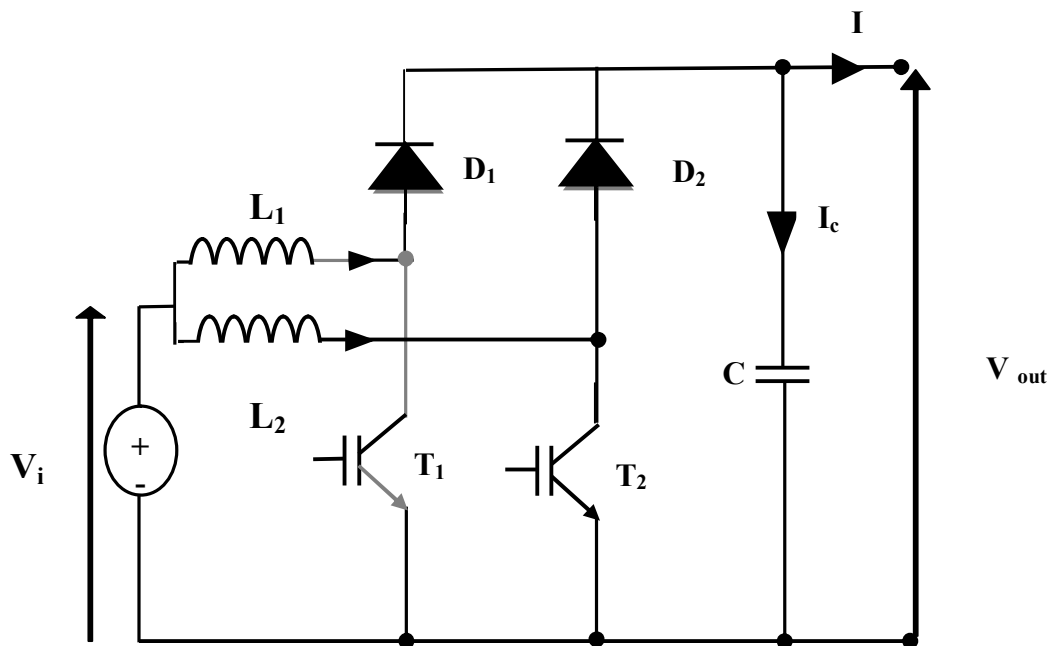


Figure III-3 : convertisseur boost a deux bras

III.2.1.3. La Commande MPPT

Le principe de cette commande est d'effectuer une recherche du point de puissance maximale tout en assurant une parfaite adaptation entre le générateur et sa charge de façon à transférer le maximum de puissance.

La figure III-4 présente l'organigramme de l'algorithme associé à une commande MPPT de type P et O, où l'évolution de la puissance est analysée après chaque perturbation du courant. Pour ce type de commande, deux capteurs (courant et tension du GPV) sont nécessaires pour déterminer la puissance du PV à chaque instant.

Si la valeur de la puissance actuelle $P(k)$ du générateur 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 [8].

Le bloc de cette commande sous Matlab-Simulink et son fonctionnement est donné à l'annexe B.

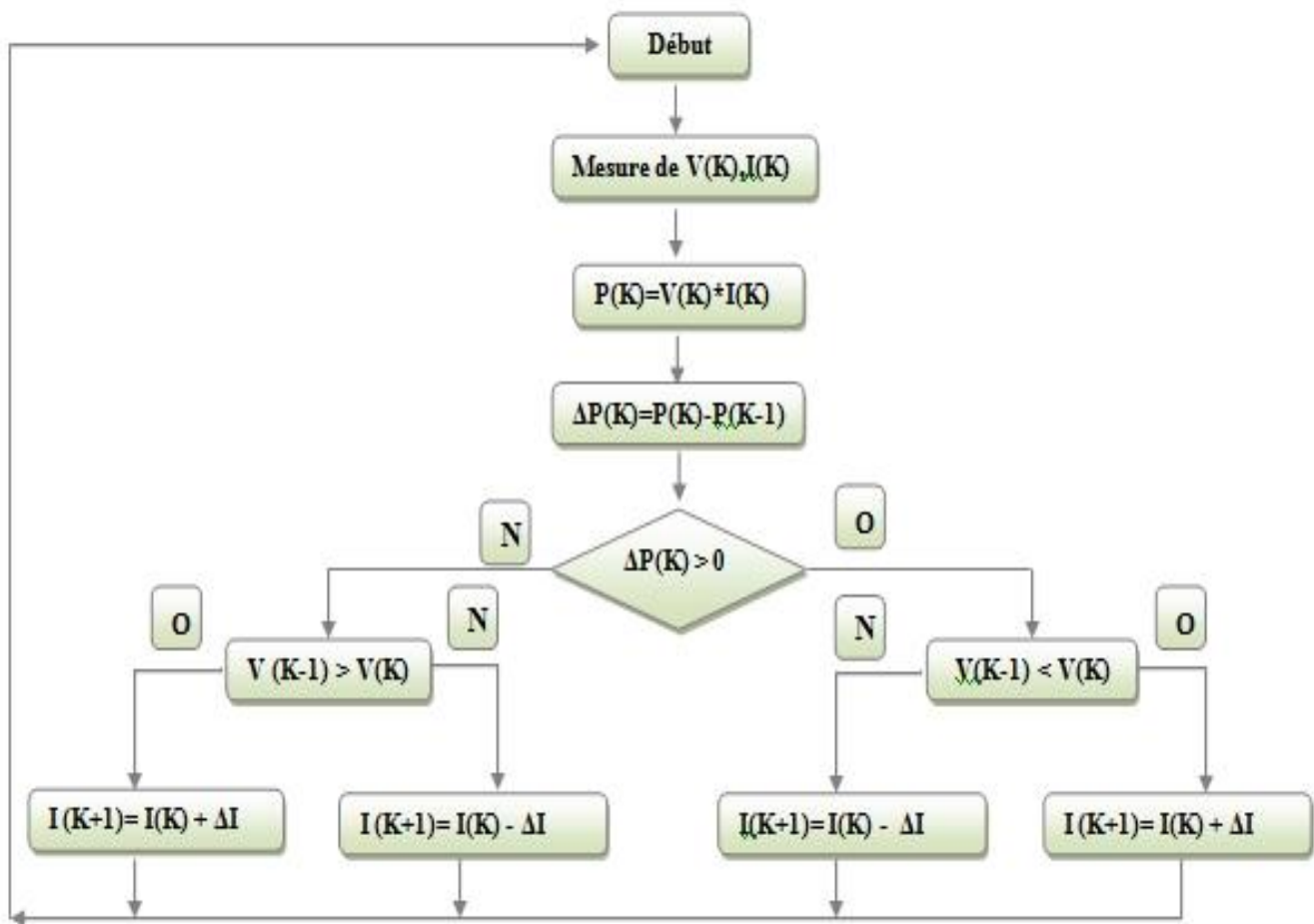


Figure III-4 : Organigramme de la commande MPPT de type P&O.

III.3.Modélisation et simulation du générateur photovoltaïque

La modélisation de la cellule photovoltaïque passe par un choix des circuits électriques équivalents. Dans notre étude nous avons opté pour le modèle représenté par la figure suivante :

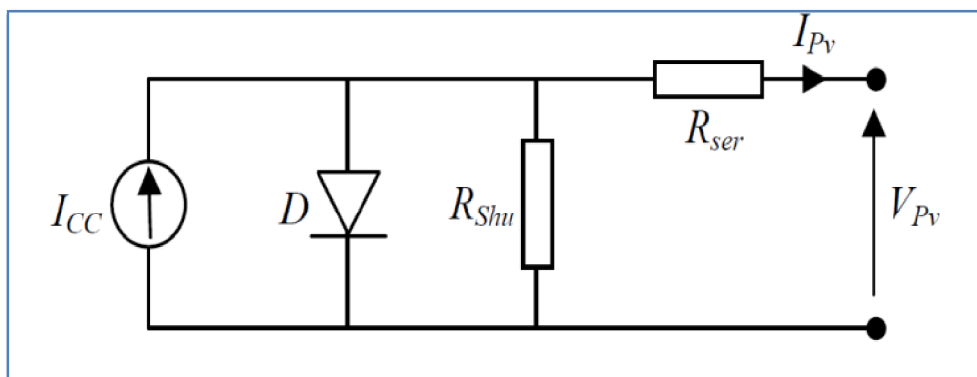


Figure III.5.Schéma électrique équivalent de la cellule photovoltaïque

III.3.1. Modélisation du générateur PV

$$I_{ph} = I_{sc} \left[1 - \frac{T - T_0}{T_0} \right] \exp \left[\frac{q(V - I R_s)}{n k T} \right] - I_0 \exp \left[\frac{q(V - I R_s)}{n k T} \right] \quad (1)$$

Avec :

I_{ph} : Le courant photo-généré [A].

I_{sc} : Eclairement ou flux de référence 1000 W/m².

n : Coefficient de température du courant de court-circuit.

I_{sc} : Courant de court-circuit.

T : Température de la cellule [kelvin].

T_0 : Température de référence [300.]Ko

N : Nombre de cellules connectées en parallèle.

Le courant de conduction de la diode dans le cas d'un module est donné par l'équation suivante [14] :

$$I_{diode} = I_0 \exp \left[\frac{q(V - I R_s)}{n k T} \right] - I_0 \exp \left[\frac{q(V - I R_s)}{n k T} \right] \quad (2)$$

Le courant de saturation de la diode est donné par l'équation suivante [14] :

$$I_0 = I_{s0} \exp \left[- \frac{q V_0}{n k T_0} \right] \exp \left[\frac{q(V - I R_s)}{n k T} \right] \quad (3)$$

Avec :

q :La charge de l'électron [1.6*10⁻¹⁹ J/°K]

V :Tension aux bornes de la charge.

k :Constante de Boltzmann [1.38*10⁻²³J/°K]

n Coefficient adimensionnel du matériau semi-conducteur.

N : Nombre de cellules connectées en série.

I_{s0} : Courant de saturation inverse de la diode à la température de référence

E_g : Le gap d'énergie du semi-conducteur, $E_g=1.1 eV$ pour le silicium cristallin. L'équation représentant la température de la cellule dépend fortement de l'éclairement et de la température ambiante.

D'après le schéma (III-5) l'équation mathématique du courant d'un module photovoltaïque est donnée comme suit:

$$I = I_{ph} - I_0 \left[\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right] - \frac{V}{R_p}$$

$$I_{ph} = G \cdot A \cdot \eta$$

Avec :

I_{ph} : Le courant traversant la résistance parallèle du circuit électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque. Le schéma du modèle du générateur photovoltaïque sous matlab-simulink est donné sur la figure III-6.

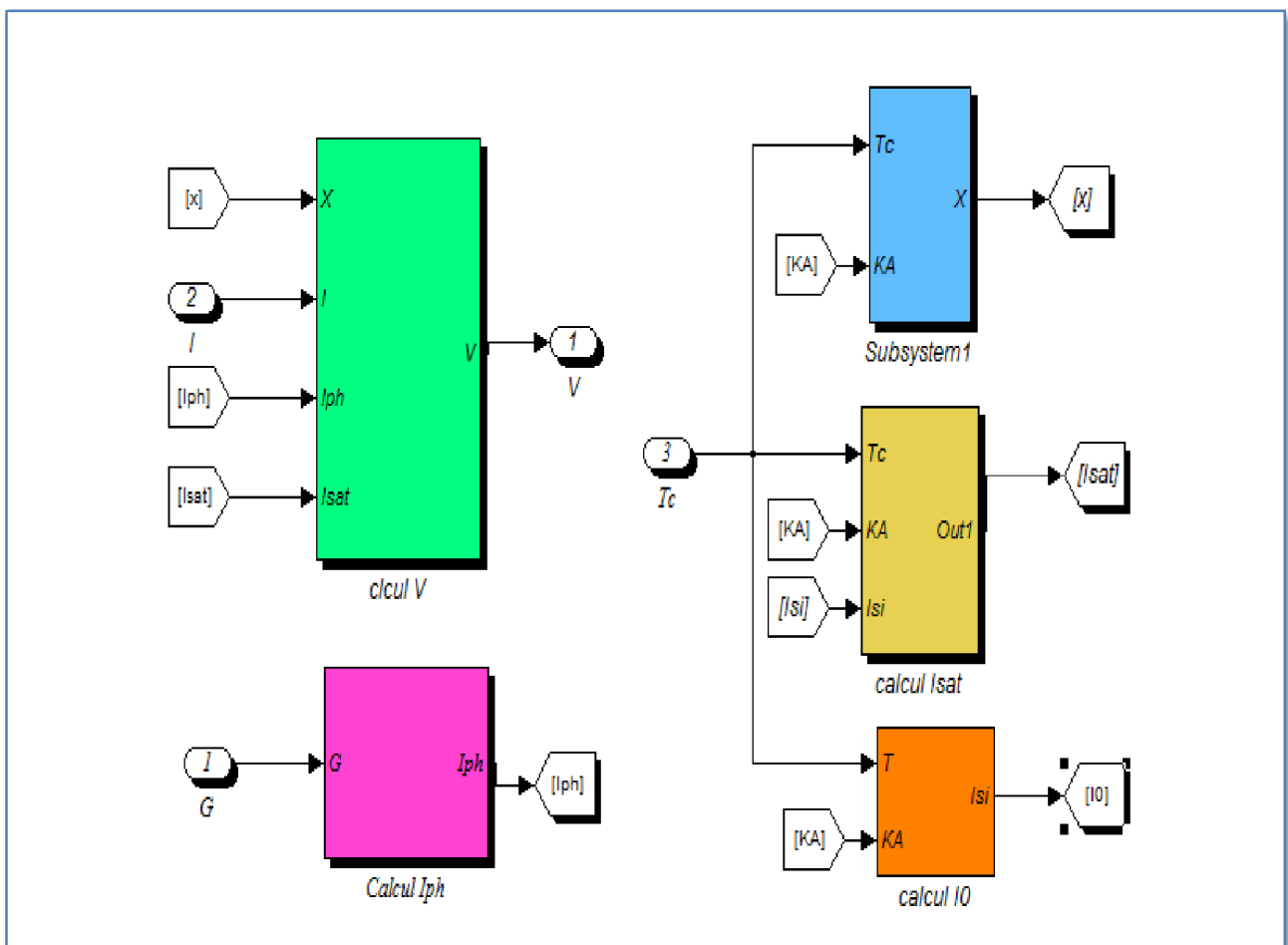


Figure III-6 : schéma du générateur photovoltaïque sous MATLAB-simulink

III.3.2. Simulation du générateur (GPV) soumis à éclairage et température constants

Après simulation du générateur PV, nous avons aboutit aux caractéristiques $I_{pv}=f(V_{pv})$ et $P_v=f(V_{pv})$.

La figure III.7 montre la caractéristique $I_{pv}=f(V_{pv})$ à une température T_a égale 25°C et un éclairage de $G=1000\text{W/m}^2$

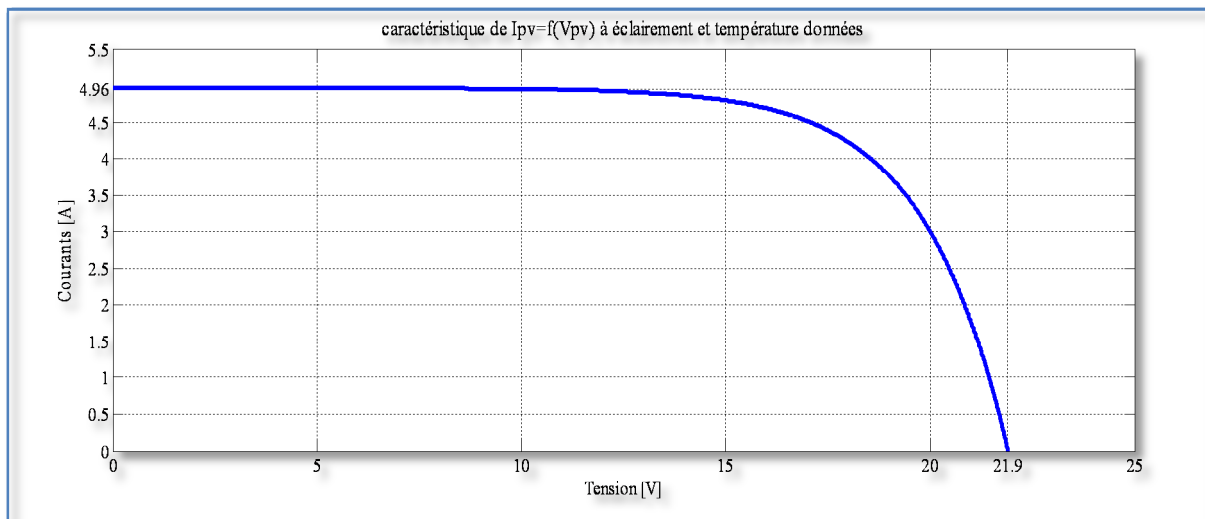


Figure III-7 : caractéristique de $I_{pv}=f(V_{pv})$ à éclairage et température donnés.

La figure III.8 montre la caractéristique $P_v=f(V_{pv})$ à une température T_a égale 25°C et un éclairage de $G=1000\text{W/m}^2$

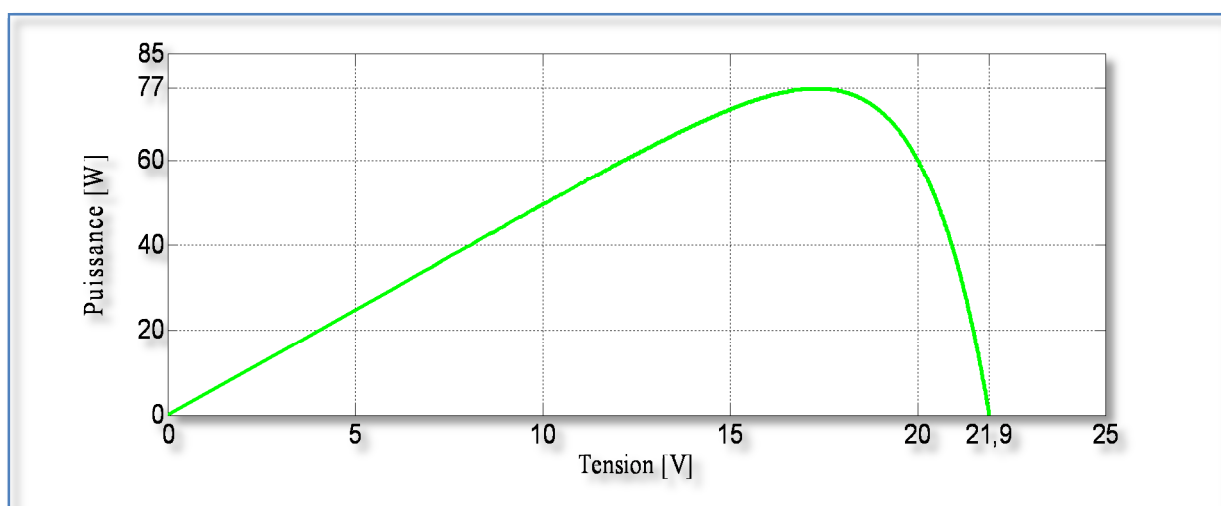


Figure III-8 : Caractéristique $P_v=f(V_{pv})$ à températures et éclairage donnés

III.3.3. Simulation du générateur (GPV) à éclairement et température variable

Afin de constater l'influence des conditions externes sur les caractéristiques $I_{pv}=f(V_{pv})$ et $P_v=f(V_{pv})$, nous avons adopté la méthode suivante :

- Pour visualiser l'influence de l'éclairement, on fixe la température ambiante à $T_a=25^\circ\text{C}$, et on fait varier l'éclairement en considérant les valeurs de G $[1000, 800, 600, 400] \text{ W/m}^2$.
- Pour un éclairement constant de $(G=1000 \text{ W/m}^2)$ nous faisons varier la température en considérant les valeurs de T_a égales $[0, 25, 50, 75]^\circ\text{C}$.

III.3.3.1. Influence de l'éclairement sur les caractéristiques $V_{pv}=f(I_{pv})$

En faisant varier l'éclairement entre 400 et 1000 avec un pas de 200 W/m^2

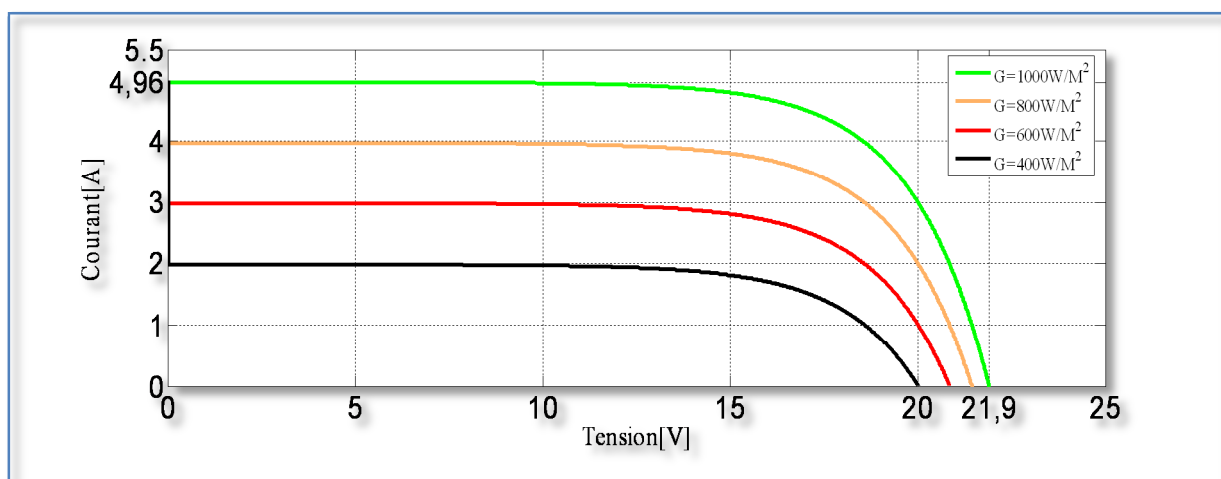


Figure III-9 : Caractéristique $I_{pv}=f(V_{pv})$ à température constantes « 25°C » et à éclairement variable

On remarque une forte diminution de courant de court-circuit par rapport à l'éclairement (G) et une faible diminution de tension de circuit-ouvert.

III.3.3.2. Influence de l'éclairement sur les caractéristiques $P_v=f(V_{pv})$

En faisant varier l'éclairement entre 400 et 1000 avec un pas de 200 W/m^2 , la caractéristique $P_v=f(V_{pv})$ est donnée par la figure III.10

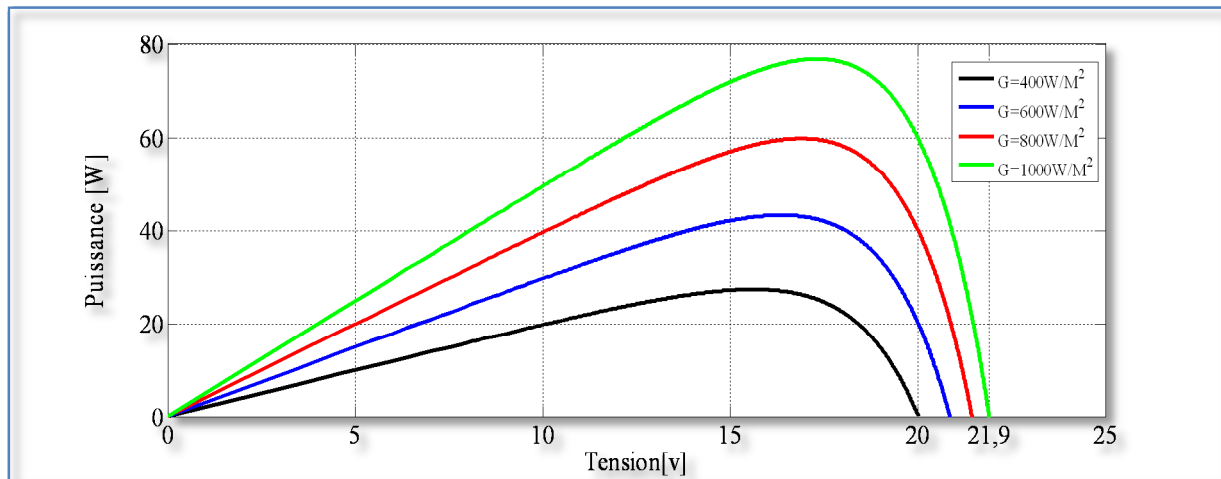


Figure III-10 : Caractéristique $P_v=f(V_{pv})$ à température constante « 25°C » et à éclairement variable

On constate ainsi de la figure III.10 que l'éclairement influence proportionnellement sur la puissance et la tension du générateur photovoltaïque.

III.3.3.3. Influence de la température sur la caractéristique ($V_{pv}=f(I_{pv})$)

En fait varier la température ambiante entre (0 et 75°C) avec un pas de 25°C, avec un éclairement $G=1000 \text{ W/M}^2$.

L'influence de la température sur la caractéristique est donnée par la Figure III.11.

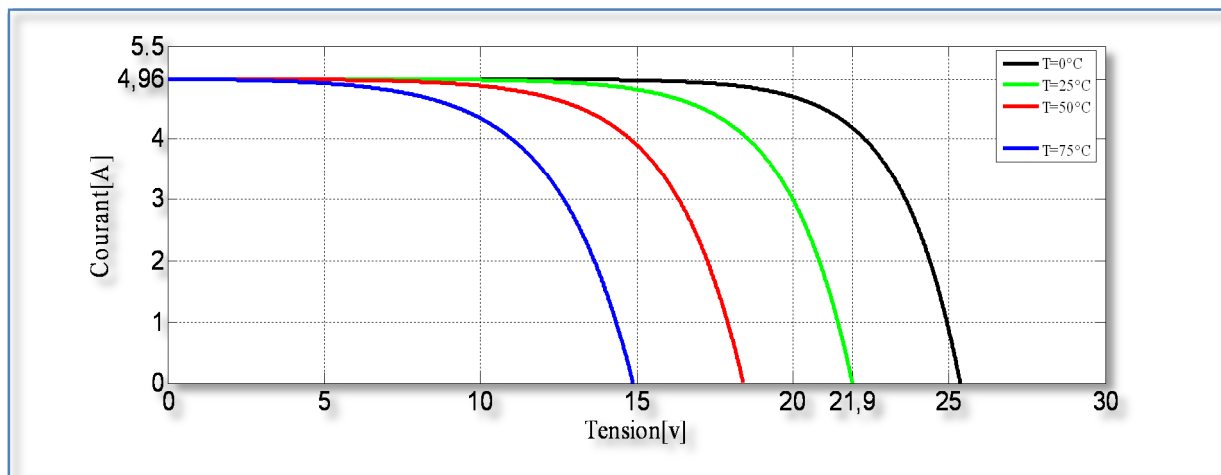


Figure III-11 : Caractéristique $V_{pv}=f(I_{pv})$ à température variable à éclairement constant « 1000 W/M² »

On constate d'après la Figure III-11 que l'effet de l'augmentation de la température fait diminuer la tension du circuit ouvert du générateur photovoltaïque, contrairement au courant de court-circuit qui reste constant.

III.3.3.4. Influence de la température sur la caractéristique ($P_v=f(V_{pv})$)

L'effet de l'augmentation de la température fait diminuer légèrement la puissance et la tension du circuit ouvert du générateur photovoltaïque. La caractéristique est donnée par la Figure III-12.

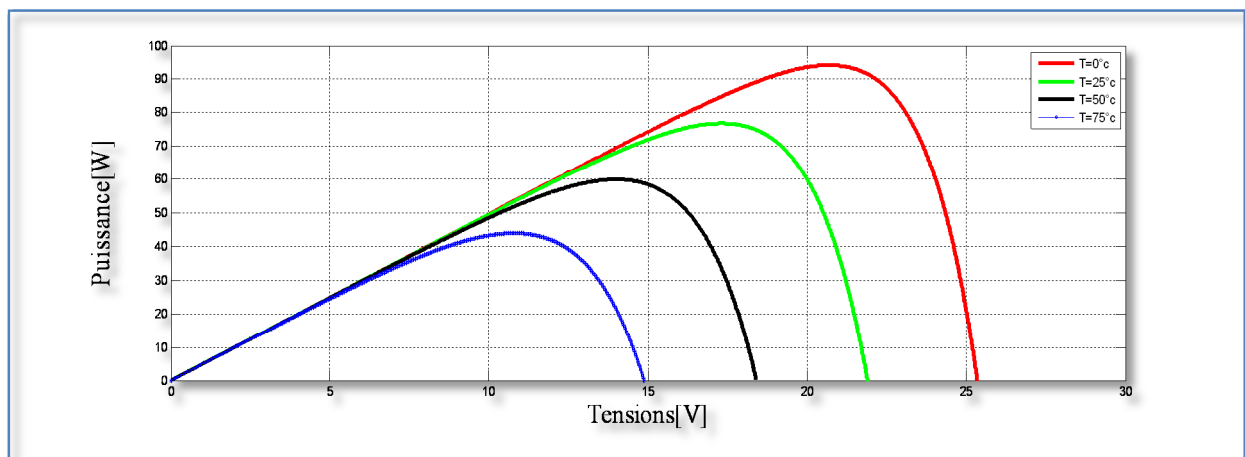


Figure III-12 : Caractéristique $P_v=f(V_{pv})$ à températures variables à éclairement constants « $1000\text{W}/\text{M}^2$ »

On remarque une forte diminution de courant de court-circuit par rapport à l'éclairement (G) et une faible diminution de tension de circuit-ouvert.

De la figure III-12 on constate que l'éclairement influe proportionnellement sur la puissance et la tension du générateur photovoltaïque.

III.3.3.5. Essais expérimentaux

Les courbes expérimentales des caractéristiques $V_{pv}=f(I_{pv})$ et de $P_v=f(V_{pv})$ obtenues lors des essais au niveau du laboratoire LATAGE confronté aux résultats de simulation sont données respectivement par la figures III-13 et la figure III-14.

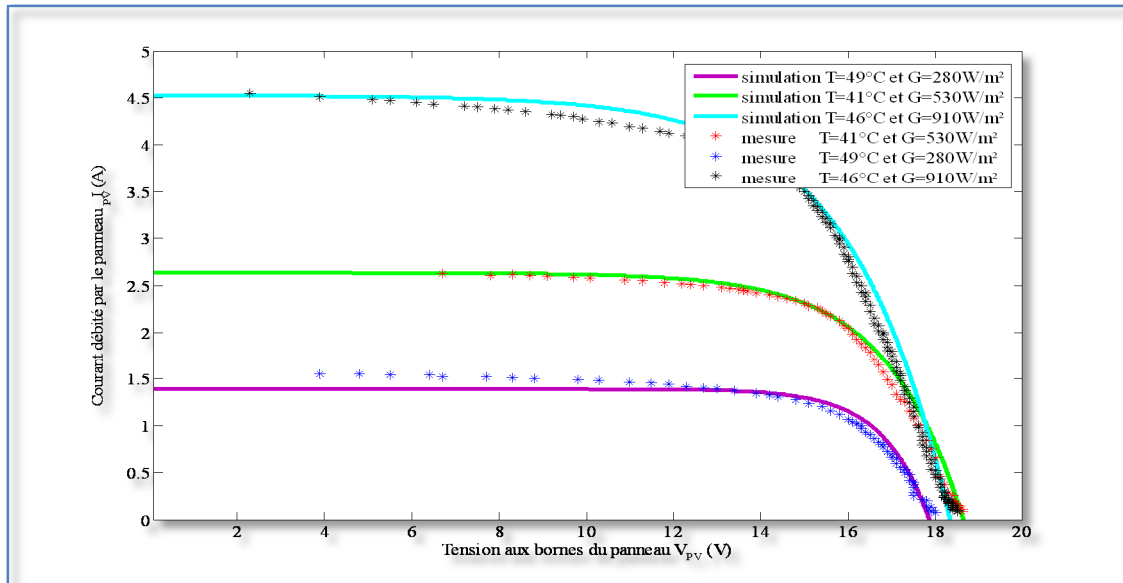


Figure III-13 : caractéristique de $V_{pv}=f(I_{pv})$ obtenues dans la pratique

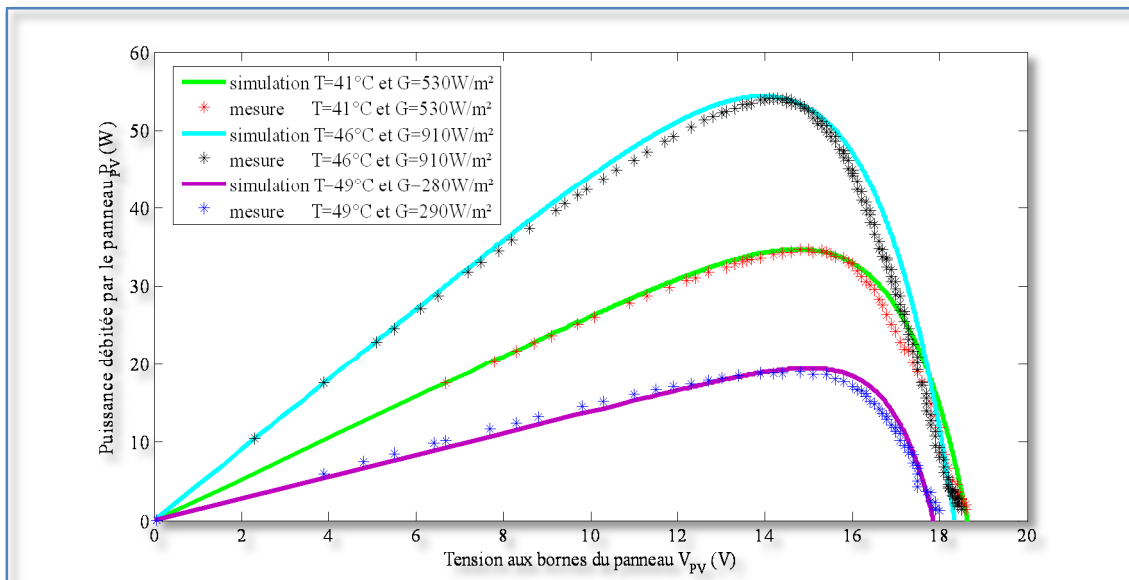


Figure III-14 : caractéristique de $P_v=f(V_{pv})$ obtenues dans la pratique

Le modèle choisi a donné des résultats concordant avec ceux obtenus dans la littérature et reflète bien le comportement physique d'une cellule (PV) vis-à-vis des variations de la température et de l'éclairement ce qui valide le modèle utilisé.

La méthode suivie pour avoir les caractéristiques du PV est données dans l'annexe A.

III.4.Modélisation du convertisseur DC-DC

III.4.1.Modélisation du convertisseur boost élémentaire « un seul bras »

La modélisation du convertisseur donnée par la figure II.1 passe par l'analyse des différentes séquences de fonctionnement que nous supposons de durées fixées par la commande α . Il apparaît deux séquences de fonctionnement selon l'état de l'interrupteur T, que nous pouvons représenter chacune par une équation différentielle.

Lorsque T est fermé :

$$\begin{cases} \frac{dV}{dt} = \frac{V_{in} - V}{C} & \text{1} \\ 0 = \frac{V - V_{out}}{L} - \frac{V_{out}}{L} & \text{2} \end{cases}$$

Lorsque T est ouvert :

$$\begin{cases} \frac{dV}{dt} = \frac{V_{in} - V}{C} & \text{3} \\ \frac{dI}{dt} = \frac{V - V_{out}}{L} & \text{4} \end{cases}$$

En posant $\alpha = 1$ lorsque l'interrupteur est fermé et $\alpha = 0$ pour T ouvert, nous pouvons représenter le convertisseur par un système d'équations unique, que nous qualifions de modèle instantané. Nous considérons que les interrupteurs sont parfaits.

$$\begin{cases} \frac{dV}{dt} = \frac{V_{in} - V}{C} + \alpha \frac{V - V_{out}}{C} & \text{5} \\ \frac{dI}{dt} = \frac{V - V_{out}}{L} - \alpha \frac{V_{out}}{L} & \text{6} \end{cases}$$

Paramètre :

V in: Tension d'entrée du convertisseur (V)

V out : Tension de sortie du convertisseur (V)

IL: Courant dans l'inductance (A).

L : Inductance de lissage (H)

C : capacité de filtrage (F)

α : Rapport cyclique

III.4.2.modélisation du convertisseur boost entrelace à deux bras

La modélisation du convertisseur donnée par la figure II.3 passe par l'analyse des différentes séquences de fonctionnement que nous supposons de durées fixées par la commande, et avec une commande décalée d'une demi-période. Il apparaît quatre séquences de fonctionnement selon l'état des interrupteurs T_1 et T_2 , que nous pouvons représenter par les équations différentielle.

Pour $t \in [0, \alpha_1 T]$

$$\begin{cases} V_{L1} = L_1 \frac{dI_{L1}}{dt} & \text{III. 7} \\ 0 = C \frac{dV_{C1}}{dt} - I & \text{III. 8} \end{cases}$$

Pour $t \in [\alpha_1 T, T/2]$

$$\begin{cases} V_{L1} = L_1 \frac{dI_{L1}}{dt} - V_{C1} & \text{III. 9} \\ I_{L1} = C \frac{dV_{C1}}{dt} + I & \text{III. 10} \end{cases}$$

Pour $t \in [T/2, \alpha_2 T]$

$$\begin{cases} V_{L1} = L_1 \frac{dI_{L1}}{dt} & \text{III. 11} \\ 0 = C \frac{dV_{C1}}{dt} - I & \text{III. 12} \end{cases}$$

Pour $t \in [\alpha_2 T, T]$

$$\begin{cases} V_{L1} = L_1 \frac{dI_{L1}}{dt} - V_{C1} & \text{III. 13} \\ I_{L1} = C \frac{dV_{C1}}{dt} + I & \text{III. 14} \end{cases}$$

On pose :

$$\begin{cases} u = 1 & T_1 \text{ fermé,} \\ h = 1 & T_2 \text{ fermé,} \end{cases} \qquad \begin{cases} u = 0 & T_1 \text{ ouvert} \\ h = 0 & T_2 \text{ ouvert} \end{cases}$$

Donc :

$$\begin{cases} V_{11} = L_1 \frac{di_1}{dt} + u_1 & \text{III.15} \end{cases}$$

$$\begin{cases} i_{L_2} = i_1 + u_2 C \frac{dV_{11}}{dt} & \text{III.16} \end{cases}$$

$$\begin{cases} V_{22} = L_2 \frac{di_2}{dt} + h_2 V_{11} & \text{III.17} \end{cases}$$

$$\begin{cases} i_{L_2} = h_2 C \frac{dV_{22}}{dt} + i & \text{III.18} \end{cases}$$

Pour le même rapport cyclique (u = h)

$$i_{L_2} = i_1 + u_2 C \frac{dV_{11}}{dt} \qquad \text{III.19}$$

$$i_{L_2} = i_1 + u_2 C \frac{dV_{11}}{dt} \qquad \text{III.20}$$

$$i_{L_2} = i_1 + u_2 C \frac{dV_{11}}{dt} \qquad \text{III.21}$$

$$i_{L_2} = i_{L_2} \qquad \text{III.21}$$

$$\hat{e} i_{L_2} = \Delta i_{L_2} + \frac{dV_{11}}{dt} \qquad \text{III.22}$$

Paramètres

V in: Tension d'entrée du convertisseur (V)

V out : Tension de sortie du convertisseur (V)

iL₁: Courant dans l'inductance L₁ (A).

iL₂: Courant dans l'inductance L₂ (A).

L₁ et L₂ : des Inductance de lissage (H)(L₁=L₂)

C : capacité de filtrage (F)

u et h: Rapport cyclique

III.5.Simulation du convertisseur boost entrelacé

Les résultats de simulation caractérisant les tensions d'entrée et de sortie avec ou sans décalage du signal de commande sont données par la figure III.15 (pour $V_{in}= 20V$, et le rapport cyclique de 0.5).

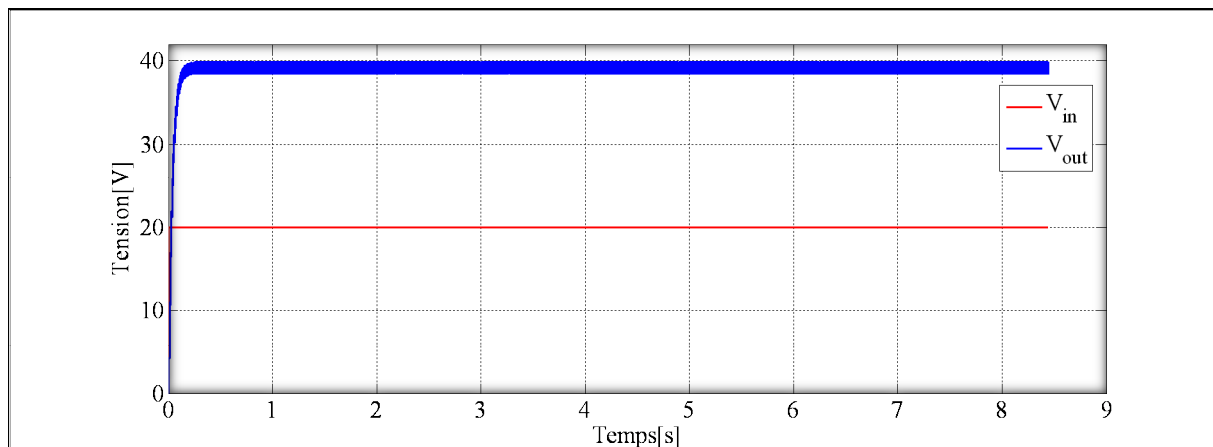


Figure III.15 : caractéristique de tension d'entrée et de sortie du convertisseur

On constate que la tension de sortie du convertisseur boost a augmenté par rapport à la tension d'entrée.

La simulation du convertisseur boost a deux bras avec et sans décalage de signal de commande.

III.5.1.Pour des commandes décalées

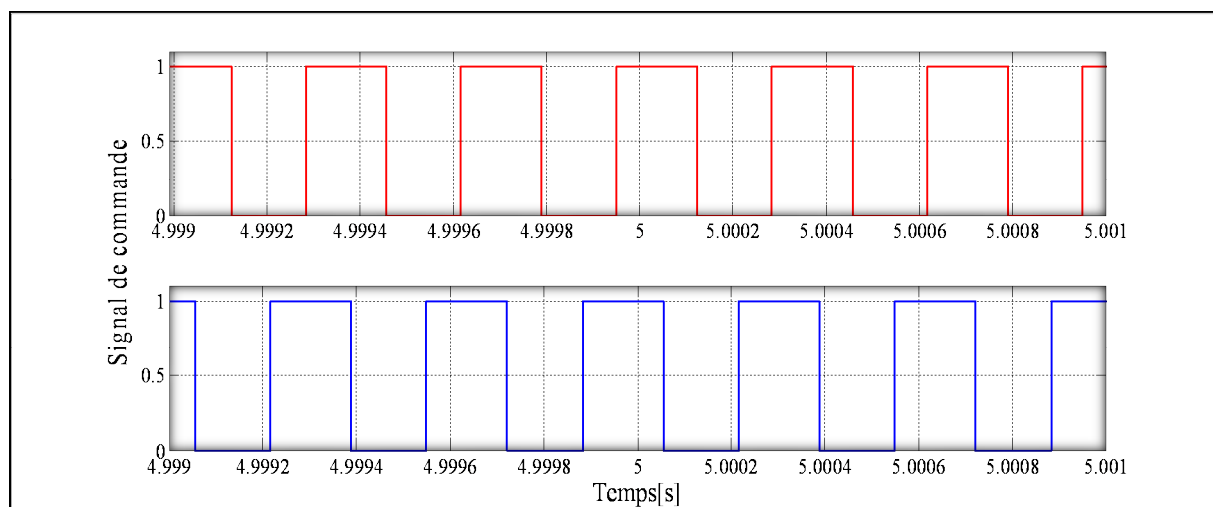


Figure III.16 : Signal de commande décalé d'une demi-période

- Zoom sur l'ondulation des courants

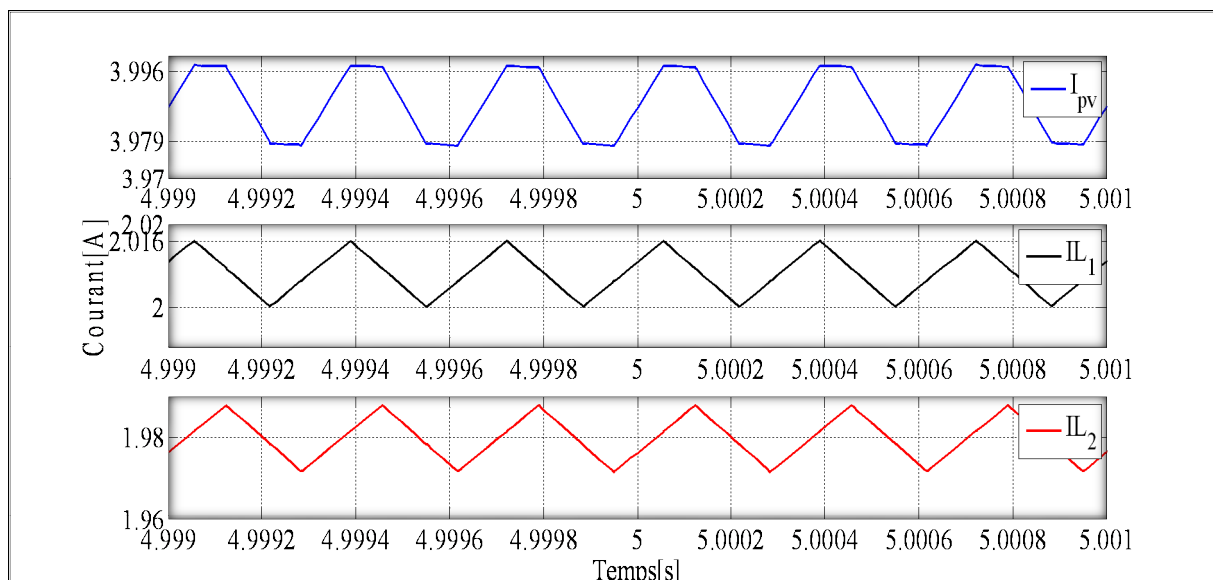


Figure III.17. Zoom de l'ondulation de courants

III.5.2. Pour des commandes non décalées (le même rapport cyclique)

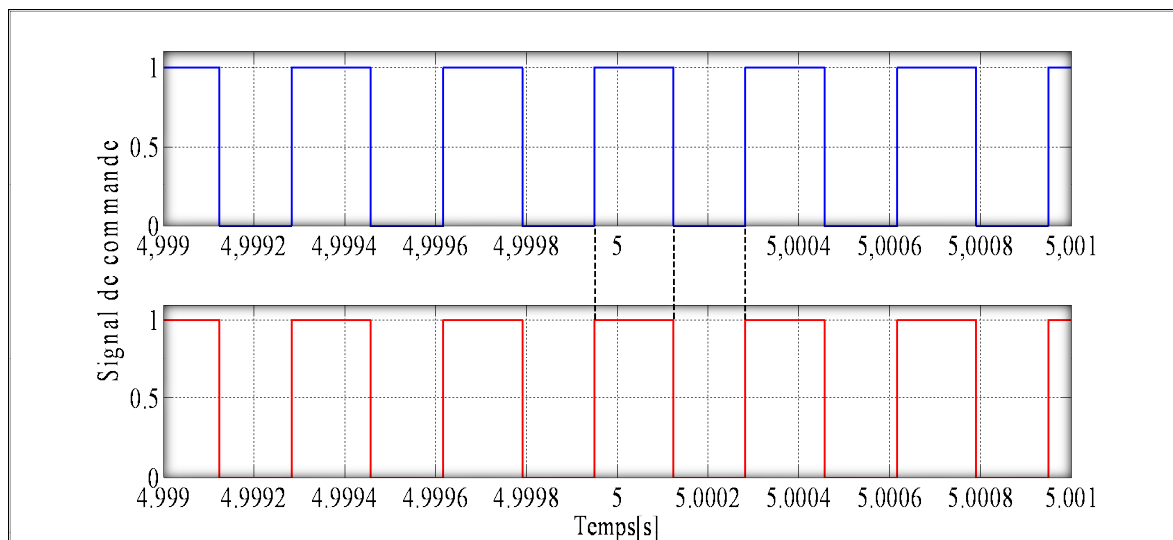


Figure III-18: Signal de commande sans décalage.

- **Zoom sur l'ondulation des courants**

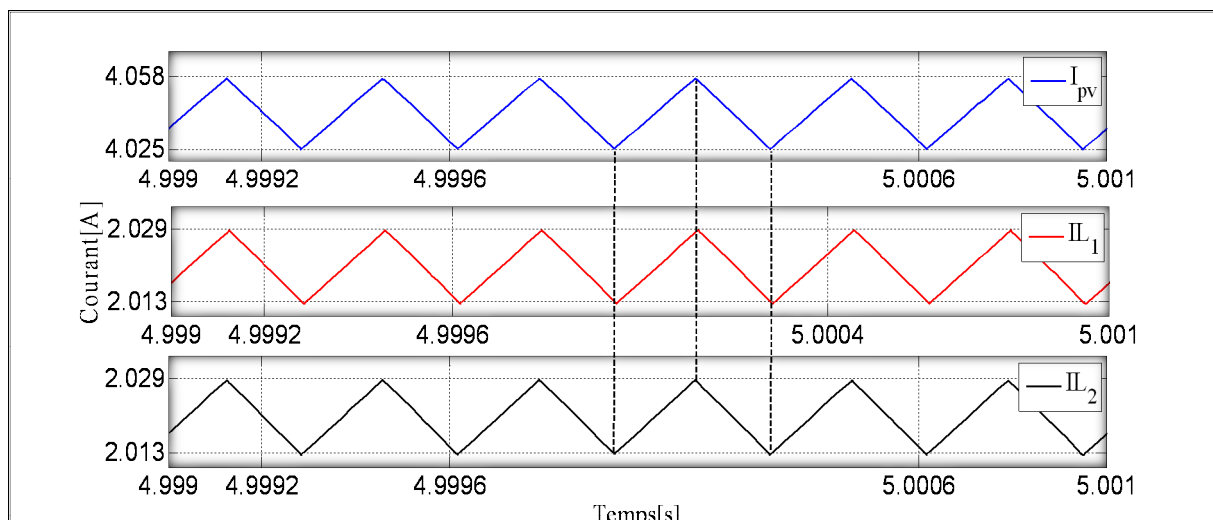


Figure III-19 : Zoom de l'ondulation de courants

Le courant moyen passant dans chaque cellule correspond à la moitié du courant d'entrée, Tant que les deux convertisseurs élémentaires sont identiques. Mais l'ondulation du courant de source diminue pour un décalage d'une demi-période pour le signal de commande, alors qu'elle double lorsque le signal de commande est le même (non décalé).

III.6.Conclusion

Dans ce chapitre on a présenté la modélisation du module photovoltaïque du labo et l'influence des paramètres externes. Les mesures effectuées dans les conditions réelles ont permis de tracer la famille des courbes $I(V)$ et $P(V)$ du panneau.

Une commande à MPPT est développée dans le but d'extraire et d'injecter le maximum de puissance du générateur photovoltaïque.

Un panneau photovoltaïque se comporte comme un générateur de tension près de la tension de circuit ouvert et comme un générateur de courant près du courant de court-circuit.

Nous avons montré l'importance de décalage dans la commande de convertisseur entrelacé à deux bras, pour minimiser l'ondulation du courant dans la source.

IV.1.Introduction

Dans ce chapitre nous présentons les différents résultats de simulation de la chaîne de conversion photovoltaïque globale, elle est composée du panneau PV, du convertisseur DC/DC(Boost) et du bloc de commande. Les Blocs de simulation du système étudié sont données dans l'annexe B.

IV.2 .Résultats de simulation et interprétations

Afin de vérifier le fonctionnement du programme MPPT, la figure IV.1 montre la variation de l'éclairement imposée au système.

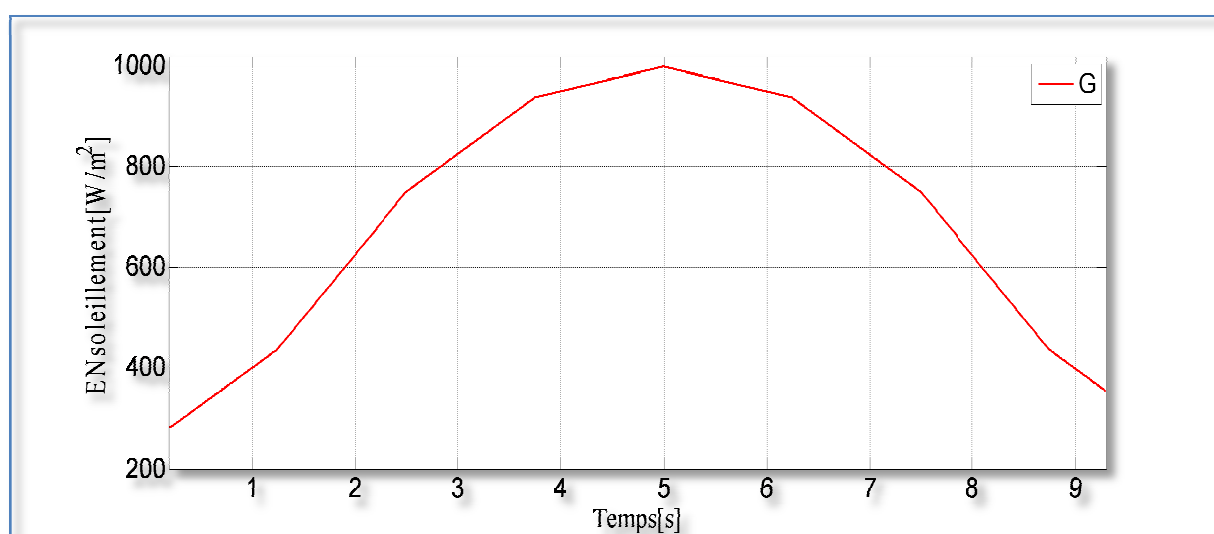


Figure IV.1 : Courbe de la variation de l'éclairement (ensoleillement) en fonction de temps

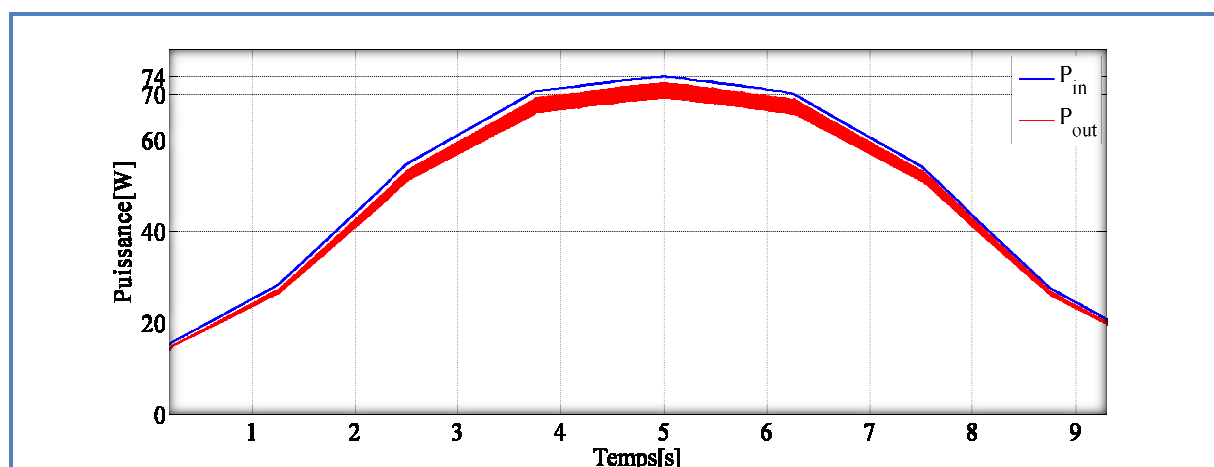


Figure IV.2 : Variation de la puissance en fonction du temps du PV pour un changement de l'éclairement

La figure IV.2 montre que la variation de la puissance est proportionnelle à celle de l'ensoleillement. Nous constatons aussi de cette figure que la puissance de sortie est légèrement inférieure à la puissance d'entrée, cela est dû aux pertes dans le convertisseur. Nous pouvons constater facilement sur la figure IV.2 que pour la puissance maximale de 74W, une irradiation de 1000 W/m² est constatée sur la figure IV.1.

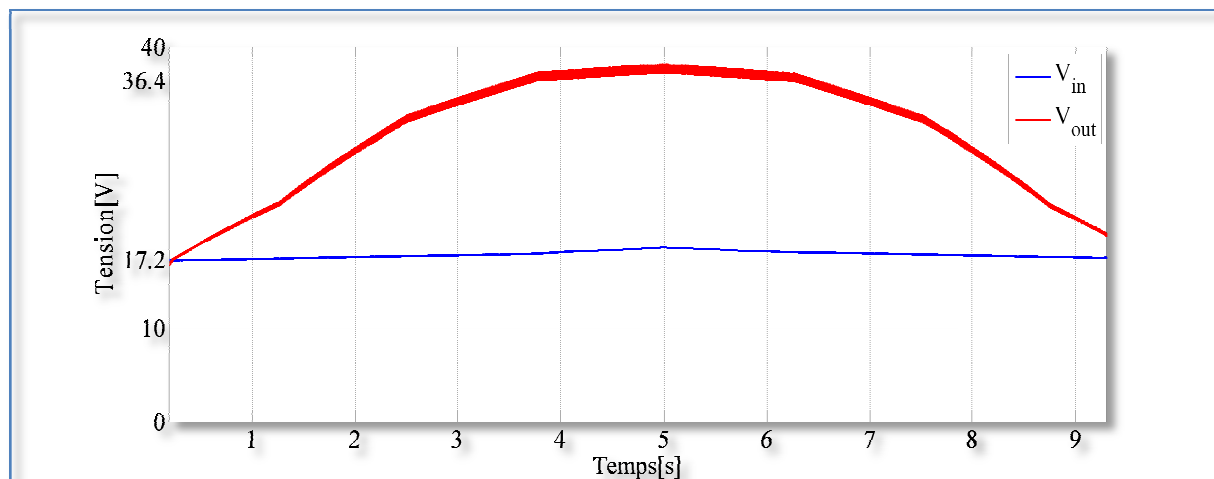


Figure IV.3 : Variation de la tension en fonction du temps pour un changement de l'éclairement

La figure IV.3 montre que la tension d'entrée du convertisseur est sensiblement constante ce qu'est concordant avec les propriétés d'un panneau photovoltaïques (l'ensoleillement influe légèrement sur la tension du PV). Par contre, La tension de sortie est plus élevée par rapport à celle d'entrée suivant l'évolution du rapport cyclique illustré dans la figure IV.4.

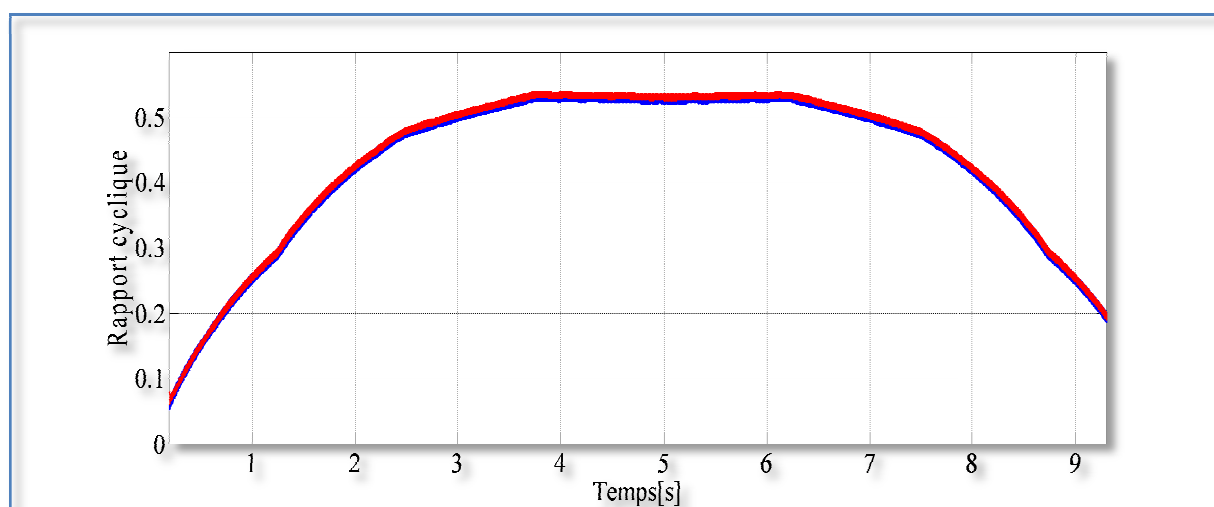


Figure IV.4. Variation du rapport cyclique en fonction du temps pour un changement de l'éclairement

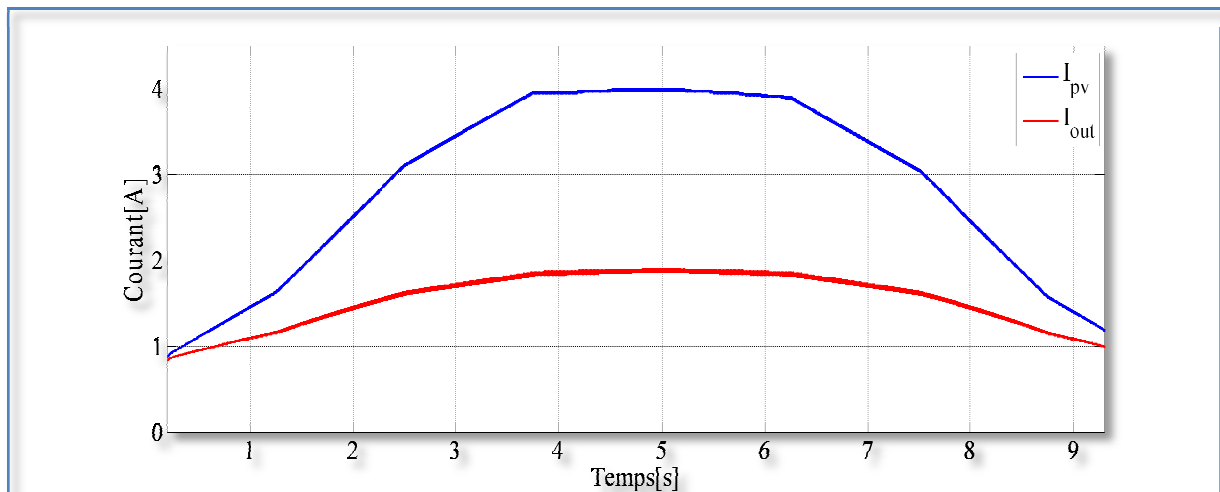


Figure IV.5 : Variation du courant d'entrée et de sortie du convertisseur en fonction du temps pour un changement de l'éclairement

Nous constatons de la figure IV.5 que les deux courbes de courants d'entrée et de sortie ont la même allure que celle de l'ensoleillement. Les courants au niveau des deux bras du convertisseur et leur résultante sont montrés dans la figure IV.6

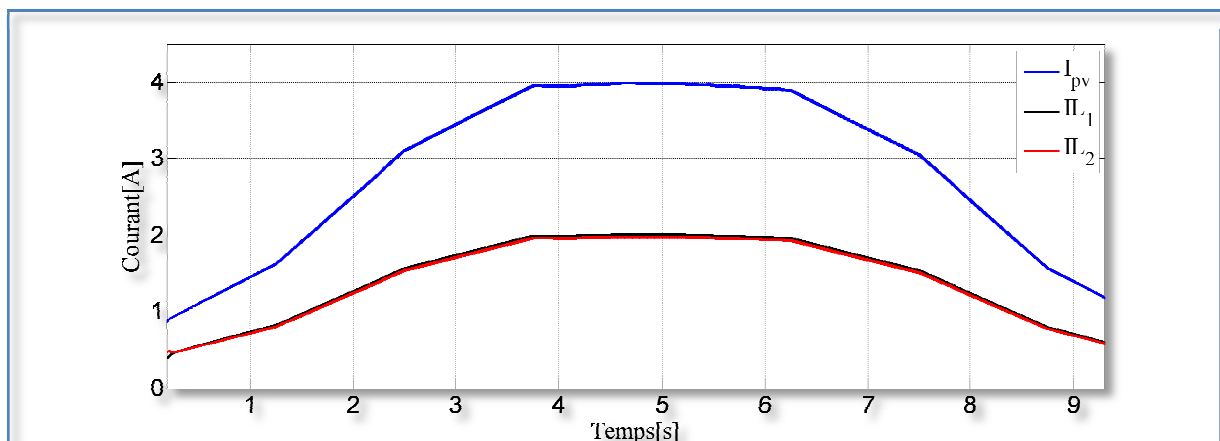


Figure IV.6. Variation des courants en fonction du temps pour un changement de l'éclairement

L'impact de la variation de l'ensoleillement est très important sur la variation du courant PV contrairement à la tension. Nous avons remarqué d'après la première série des résultats de simulations que chaque bras du convertisseur est parcouru par la moitié du courant du PV. Nous constatons que le courant moyen du PV est très près de sa valeur optimale de 4.7A

IV.3. Ondulation du courant I_{pv}

IV.3.1. Signal de commande décalé d'une demi-période

La figure suivante illustre le signal de commande décalé d'une demi-période.

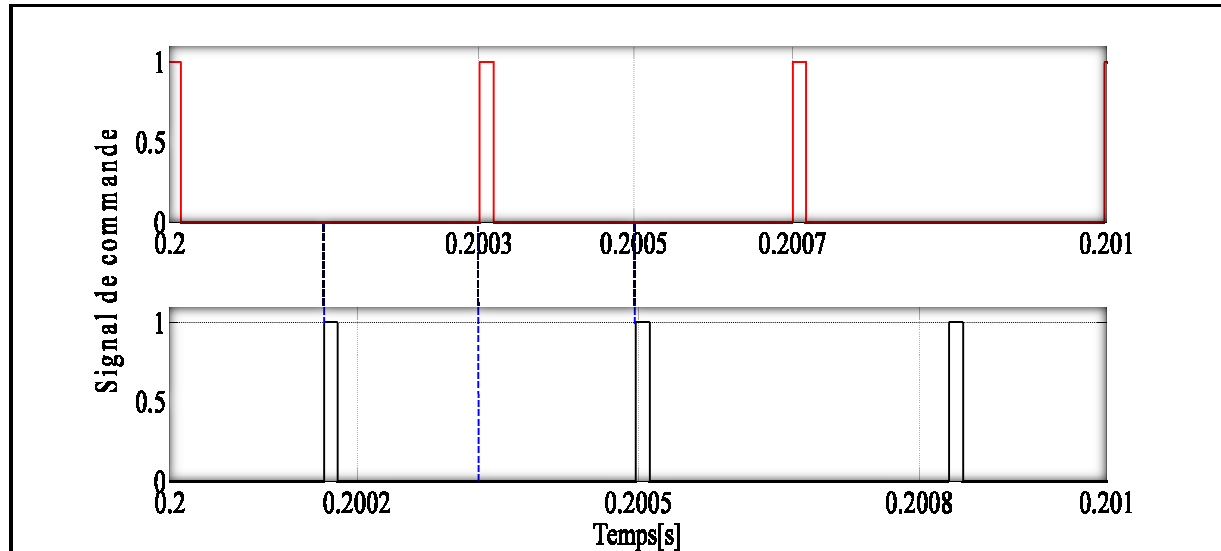


Figure IV.7. Signal de commande décalé d'une demi-période

Le zoom sur les courants est donné dans la figure suivante

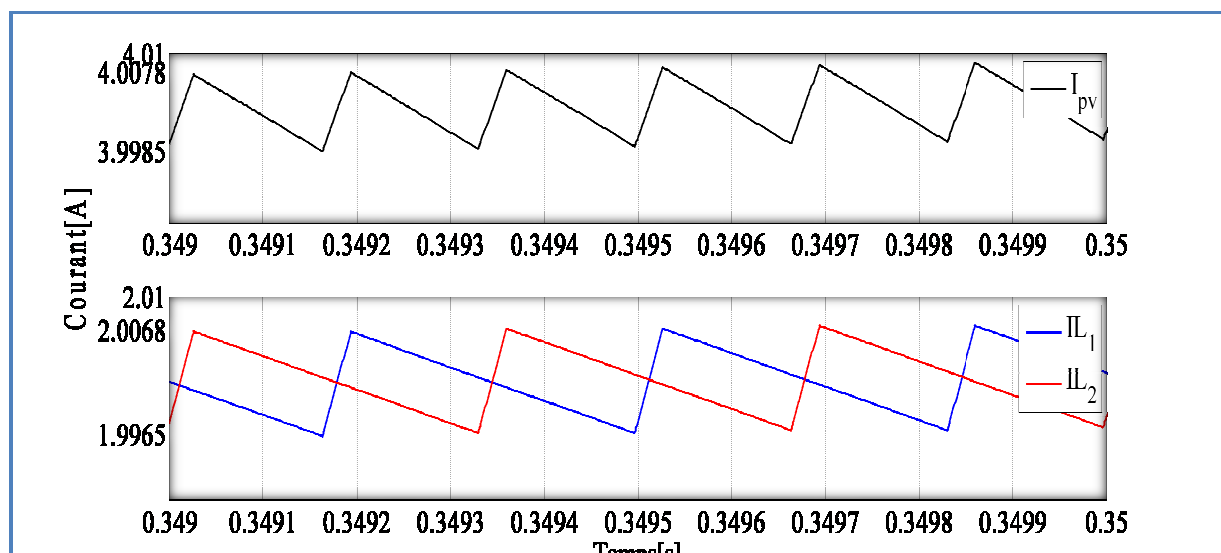


Figure. IV.8. Ondulation du courant I_{pv} avec un boost entrelacé

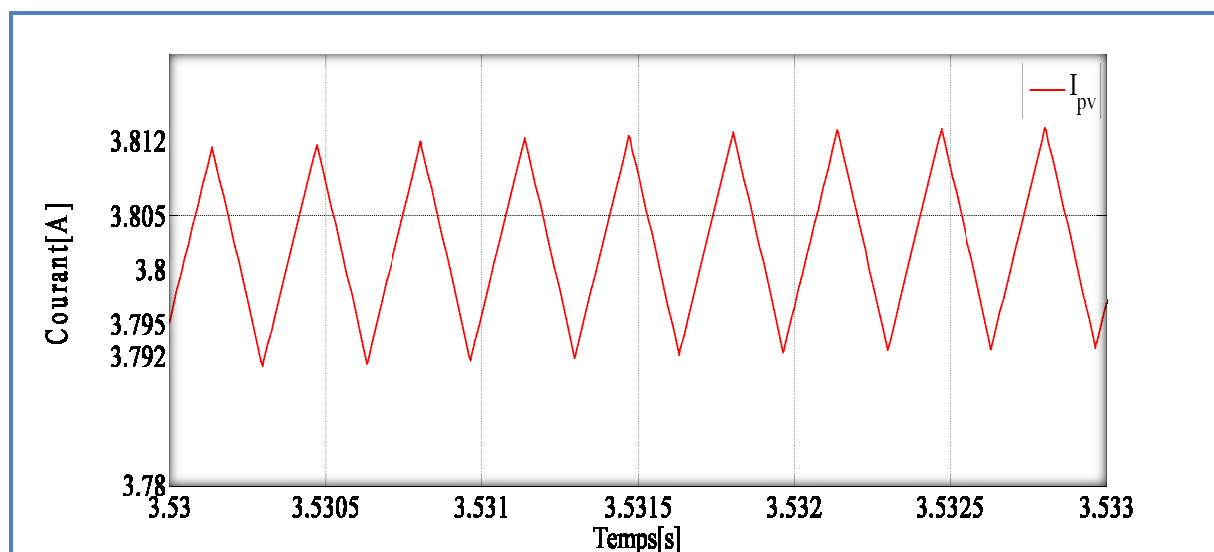


Figure IV.9. Ondulation du courant I_{pv} avec un boost élémentaire

Les figures ci-dessus illustrent l'ondulation du courant I_{pv} avec un boost élémentaire et entrelacé.

Il est à noter que l'ondulation du courant avec le boost élémentaire est supérieure à celle obtenues avec un boost entrelacé. Il s'agit là de l'un des avantages de la structure du hacheur entrelacé.

IV.3.2. Avec un signal de commande non décalé

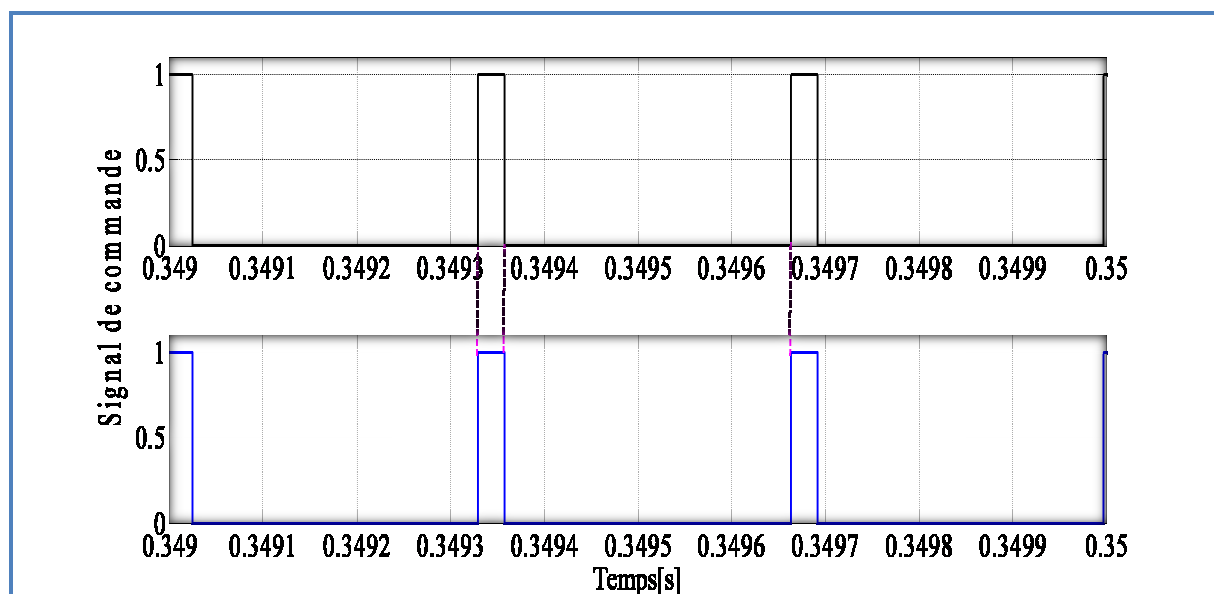


Figure IV.10. Signal de commande non décalé

Le zoom sur les courants est donné dans la figure suivante

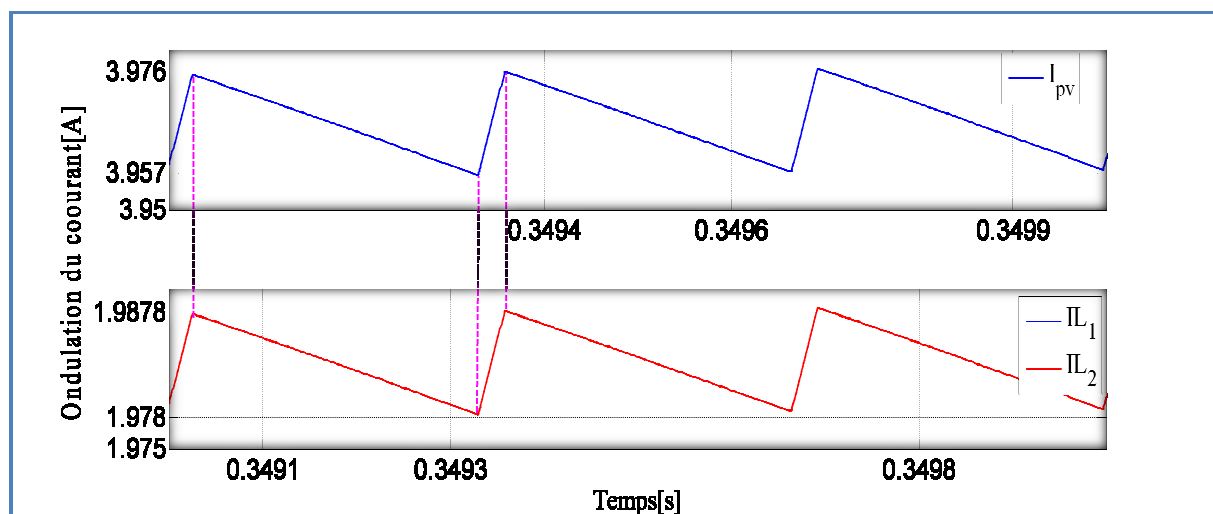


Figure IV.11. Ondulation du courant I_{pv} avec un boost entrelacé sont décalage

Comparativement aux résultats illustrés à la figure IV.8, on constate que les amplitudes d'ondulation enregistrées au sein de la figure IV.11, sont nettement doublées par rapport aux ondulations des courants dans les bars.

Les valeurs de l'ondulation du courant I_{pv} pour les trois cas précédent sont données dans le tableau suivant :

Tableau IV.1. Tableau des valeurs de l'ondulation du courant I_{pv}

	Commande	L'amplitude de l'ondulation du courant I_{pv} [A]
Boost entrelacé	Décalée d'1/2 période	0.0093
	Non décalée	0.0190
Boost élémentaire	Un seul bras	0.0210

IV.4. Influence de la fréquence de fonctionnement

IV.4.1. Sur l'ondulation de courant

➤ Pour un bras

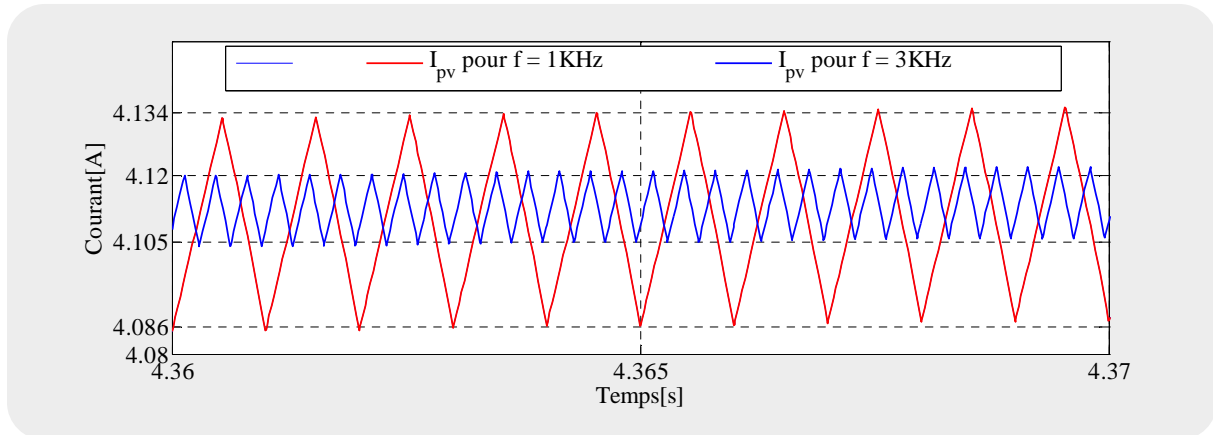


Figure IV.12. Ondulation du courant I_{pv} pour un système muni d'un convertisseur à un seul bras à une fréquence de fonctionnement variable (1KHz, 3KHz)

➤ Pour deux bras

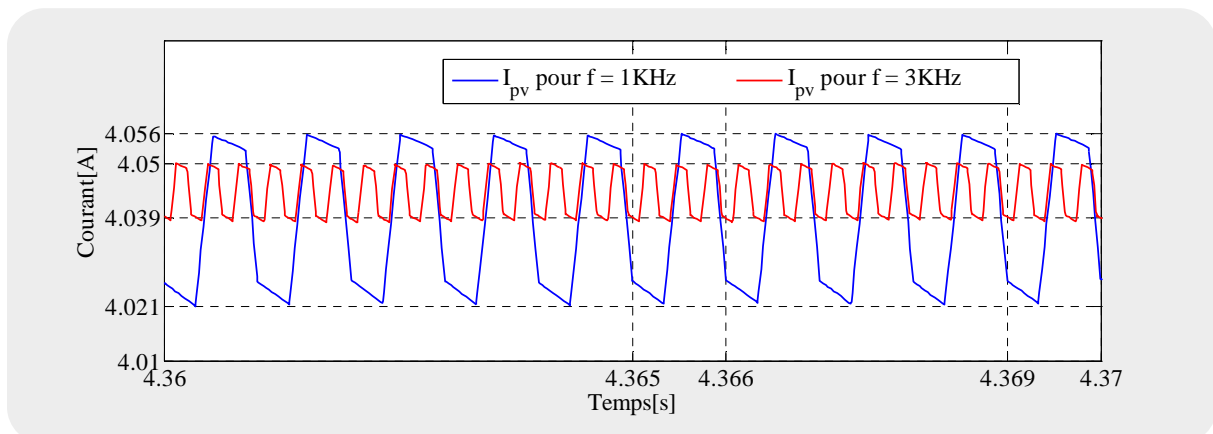


Figure IV.13. Ondulation du courant I_{pv} pour un système muni d'un convertisseur à deux bras à une fréquence de fonctionnement variable (1KHz, 3KHz)

Nous constatons des figures IV.13 et IV.14 que l'ondulation du courant dans les deux cas est inversement proportionnelle à la fréquence de fonctionnement.

En effet, L'amplitude de l'ondulation de courant dans le système à deux bras est très petite par rapport à celle du système à un seul bras.

IV.4.2. Sur l'ondulation de tension

➤ Pour un bras

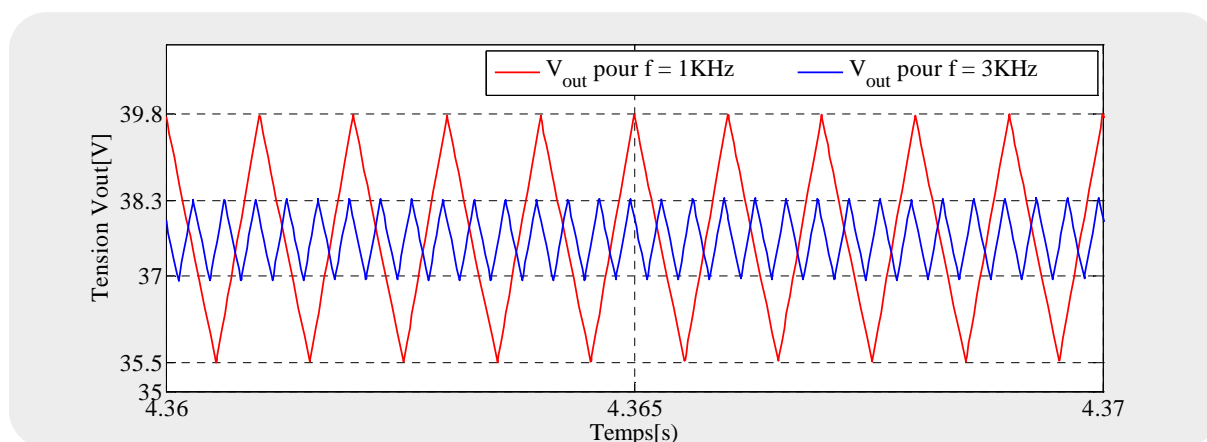


Figure IV.14. Ondulation de la tension V_{out} muni d'un convertisseur élémentaire à une fréquence de fonctionnement variable (1KHz, 3KHz)

➤ Pour deux bras

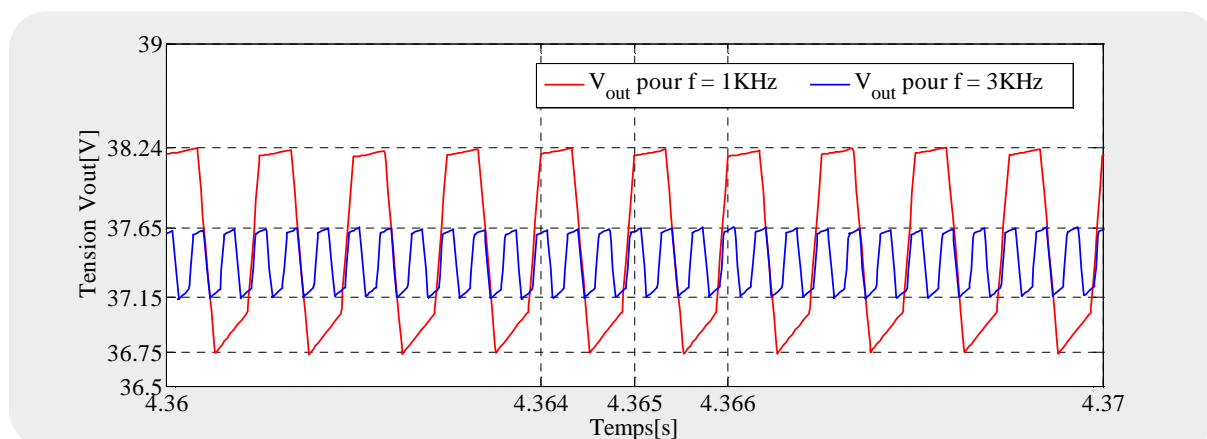


Figure IV.15. Ondulation de la tension V_{out} muni d'un convertisseur à deux bras à une fréquence de fonctionnement variable (1KHz, 3KHz)

La figure IV.14 et la figure IV.15 illustrent respectivement l'ondulation de tension pour un système muni d'un convertisseur un seul bras et à deux bras.

On constate que l'ondulation de tension est inversement proportionnelle à la fréquence de fonctionnement.

En effet, L'amplitude de l'ondulation de tension dans le système à deux bras est très petite par rapport à celle du système à un seul bras.

Les valeurs de l'ondulation du courant I_{pv} et de tension V_{out} sont données dans le tableau IV.2:

Tableau IV.2. Tableau des valeurs de l'ondulation du courant I_{pv} et de la tension V_{out}

	Un système muni d'un convertisseur à un seul bras		Un système muni d'un convertisseur à deux bras	
	$f = 1 \text{ KHZ}$	$f = 3 \text{ KHZ}$	$f = 1 \text{ KHZ}$	$f = 3 \text{ KHZ}$
Ondulation du courant (A)	0.052 A	0.015 A	0.035 A	0.010 A
Ondulation de tension (V)	4.3 V	1.3 V	1.49 V	0.5 V

IV.6. Influence de la capacité de filtrage sur l'ondulation de la tension V_{out}

a) Pour $C = 250 \cdot 10^{-6} \text{ F}$

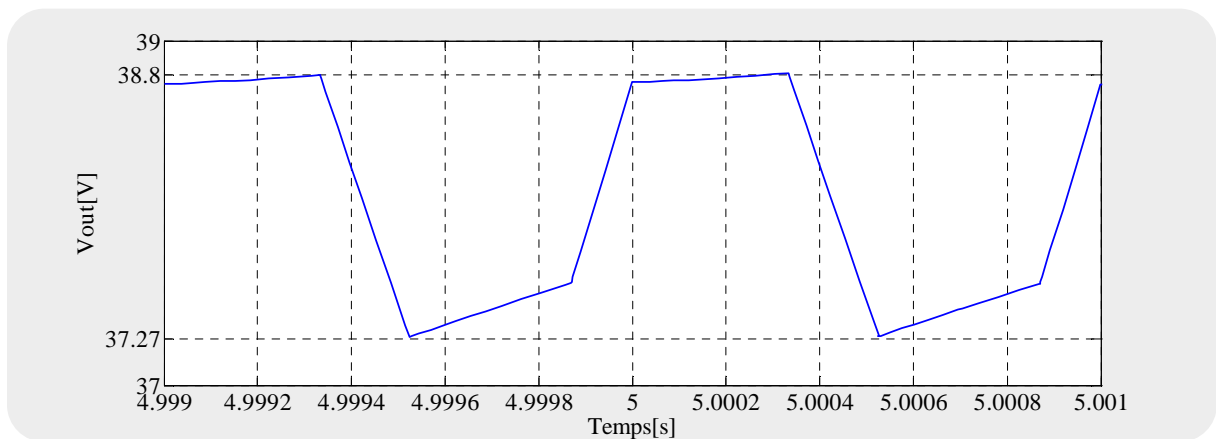


Figure IV.16. Ondulation de tension V_{out}

b) Pour $C = 750 \cdot 10^{-6} \text{ F}$

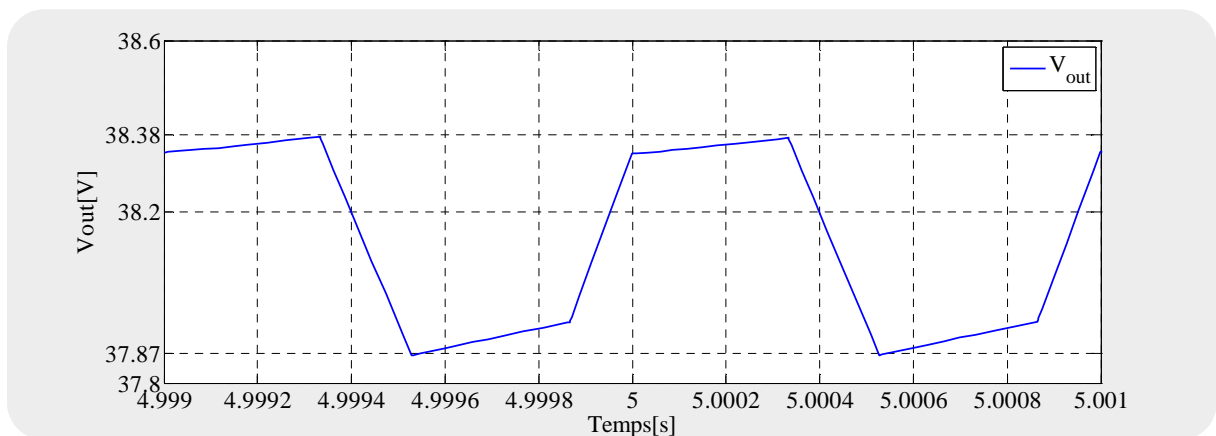


Figure IV.17. Ondulation de tension V_{out} pour $c = 750 \cdot 10^{-6} \text{ f}$

Les présentes figures montrent l'effet de la capacité sur l'ondulation de tension de sortie. En effet, l'ondulation de tension est inversement proportionnelle à la valeur de la capacité de filtrage. (Pour $C=250.10^{-6}F$, l'ondulation de tension vaut 1.53V, et pour $C=750.10^{-6}F$, l'ondulation de tension vaut 0.51V).

Conclusion

Les résultats de simulation obtenus dans ce chapitre nous ont permis de conclure que la puissance fournie par notre système est approximativement égale à la puissance générée par le générateur PV. Avec la commande MPPT utilisée le GPV peut fonctionner sur sa courbe de puissance électrique optimale sur toute la plage de variation de l'éclairement.

Le convertisseur boost entrelacé, élévateur de tension, assure des performances appréciables sur la diminution de l'ondulation du courant du PV avec une commande décalée.

Conclusion Générale

La production d'énergie électrique à l'aide du panneau photovoltaïque présente un point de fonctionnement où la puissance est maximale. Ce point maximal a la particularité de varier avec l'éclairement et la température. Pour dépister ce point de fonctionnement qui varie avec le rayonnement et la température, un traqueur du point maximal (MPPT) est utilisé. Il est conçu à base de convertisseurs statiques qui sont l'élément de base pour l'optimisation de la puissance du générateur photovoltaïque.

L'efficacité énergétique étant le facteur prépondérant dans le choix du convertisseur statique qui donne des meilleures performances. Le choix est porté sur un convertisseur statique de type hacheur survolteur à structure entrelacée vu ces multiples avantages.

Le modèle mathématique du panneau photovoltaïque a été présenté et simulé sous Matlab-SIMULINK. Nous avons montré l'effet de l'irradiation et de la température sur les caractéristiques du panneau, une validation expérimentale a été effectuée par des essais pratiques validant le modèle mathématique obtenu. Ensuite, une étude détaillée du hacheur élévateur entrelacé démontrant l'intérêt de ce dernier pour les applications photovoltaïques. Enfin, des essais de simulations ont été effectués en variant plusieurs paramètres à savoir l'éclairement, la fréquence de fonctionnement et le nombre de bras du convertisseur. Les résultats de simulations obtenus confirment l'intérêt porté sur cette chaîne de conversion, qui ne nous permet pas seulement de réduire le nombre de modules photovoltaïques lorsqu'il s'agit de grandes puissances, mais prolonger aussi la durée de vie du panneau.

En perspectives,

Compléter ce travail par une étude en détails des éléments majeurs du convertisseur à savoir l'inductance de lissage, la cellule de la commutation et la capacité de filtrage pour établir un bilan de pertes de puissance.

Bibliographies

- [1] DOUADI Ali, « étude et simulation d'un traqueur de puissance maximale d'un système photovoltaïque », mémoire d'ingénieur d'état, option modélisation des machines électriques, université Mentouri Constantine, 2009 .
- [2] M. Dahbi « Etude et optimisation d'une installation Hybride PV-Eolienne Autonome », mémoire de magister, option physique énergétique 2007.
- [3] Anne Labouret. Michel Viloz « Energie solaire photovoltaïque » Dunod 3ème édition 2006.
- [4] P. Rueda, E. Fernandez, "Multi junction Ga/As Solar Cell Capacitance and its impact upon Solar Array Regulators", 6th European Space Power Conference, Porto, Portugal, 6-10 May 2002, pp. 29-34, 2002.
- [5] Y. Pankow, « Etude de l'intégration de la production décentralisé dans un réseau basse tension ». Thèse de doctorat de l'école National supérieure d'Art et Métiers, décembre 2004.
- [6] A. Oi, «Design and simulation of photovoltaic water pumping system ». Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Master of Science in Electrical Engineering, Faculty of California Polytechnic State University, San Luis Obispo September 2005.
- [7] A. Mabrouk, «Etude et conception d'une stratégie de commande d'un onduleur connecté au réseau électrique». Mémoire de magister en électricité solaire de l'école Nationale Polytechnique El Harrach, ALGER, 2008.
- [8] S. Petibon, «Nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques». Thèse de doctorat de l'université de Toulouse, Janvier 2009.
- [9]F. Bouchtouche cherfa «Etude et réalisation d'une centrale photovoltaïque connectée au réseau de distribution électrique BT». Mémoire de magister, Ecole National Polytechnique Elharach, 2004.
- [10] B.Mehimmedetsi « application du formalisme Bond Graph à une chaîne de conversion d'énergie photovoltaïque. Mémoire de magister, université MENTOURI Constantine, 2007.

- [11] ABBASSEN Lyes « Etude de la connexion au réseau électrique d'une centrale photovoltaïque ». Mémoire de magister, université Mouloud MAMMARI DE TIZI-OUZOU, 2011.
- [12] M. Angel Cid Pastor « Conception et réalisation de modules photovoltaïques électriques, thèse doctorat 2006 « Université de Toulouse »
- [13] Bruno Allard, Hervé Morel 'Utilisation des Graphes de Liens en Electronique de Puissance', Techniques de l'ingénieur, D3064. Algorithms For Stand-Alone Photovoltaic Systems', science direct 2006.
- [14] H.N. Zainudin, S. Mekhilef «Comparison Study of Maximum Power Point Tracker Techniques for PV Systems ». Proceedings of the 14th International Middle East Power Systems Conference (MEPCON'10), Cairo University, Egypt, December 19-21, 2010.
- [15] B. Multon, O. Gergaud, H. Ben Ahmed, X. Roboam, S. Astier, B. Dakyo, C. Nikita, "Etat de l'art des aérogénérateurs », L'électronique de puissance, vecteur d'optimisation pour les énergies renouvelables, Ed. Novelect-ecrin, pp. 97-154, 2002.
- [16] Yannick LOUVRIER, Etude et optimisation d'un convertisseur DC/DC à canaux Multiples entrelacés, thèse de doctorat ÉCOLE POLYTECHNIQUE FÉDÉRALE DE LAUSANNE, 2010.
- [17] Jérôme LACHAIZE, Etude des stratégies et des structures de commande pour le pilotage des systèmes énergétiques à Pile à Combustible (PAC) destinés à la traction, thèse de doctorat, L'INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE TOULOUSE, année 2004.
- [18] H. Bühler, "Electronique de puissance", Presses Polytechniques Romandes, 1989
- [19] Y. TIAMTAN "Impact on the power system with a large penetration of photovoltaic generation ", These Doctor of philosophy Department of Electrical Engineering and Electronics UMIST february 2004.
- [20]. S-A. BELHARRAT, Production et gestion de l'énergie solaire photovoltaïque adaptée à une maison, thèse d'ingénieur d'état en électrotechnique, option machine électrique de l'université Mouloud MAMMARI de Tizi-Ouzou, année 2011.

Annexe A

Mesure des caractéristiques du panneau solaire

Les principaux essais sont :

a) Mesure du courant de court-circuit

Le courant [A] en court circuit, dans ce cas la tension est de 0 V.

b) Mesure de la tension en circuit-ouvert

La tension [V] en circuit ouvert, dans ce cas l'intensité est de 0 A.

Méthode de définition des caractéristiques de I-V de sortie

La méthode la plus simple pour tracer une caractéristique I(V) d'un panneau PV est de connecter directement à ses bornes une résistance variable pour permettre d'étudier l'évolution de la tension en fonction de l'intensité à différents niveaux d'ensoleillement.

Lorsque la résistance est faible, le rhéostat doit supporter le courant de court-circuit du panneau. Pour l'autre côté de la caractéristique I(V), une valeur de résistance suffisamment grande est nécessaire pour se rapprocher du circuit ouvert. Pour satisfaire ces deux contraintes, on doit placer deux rhéostats en série.

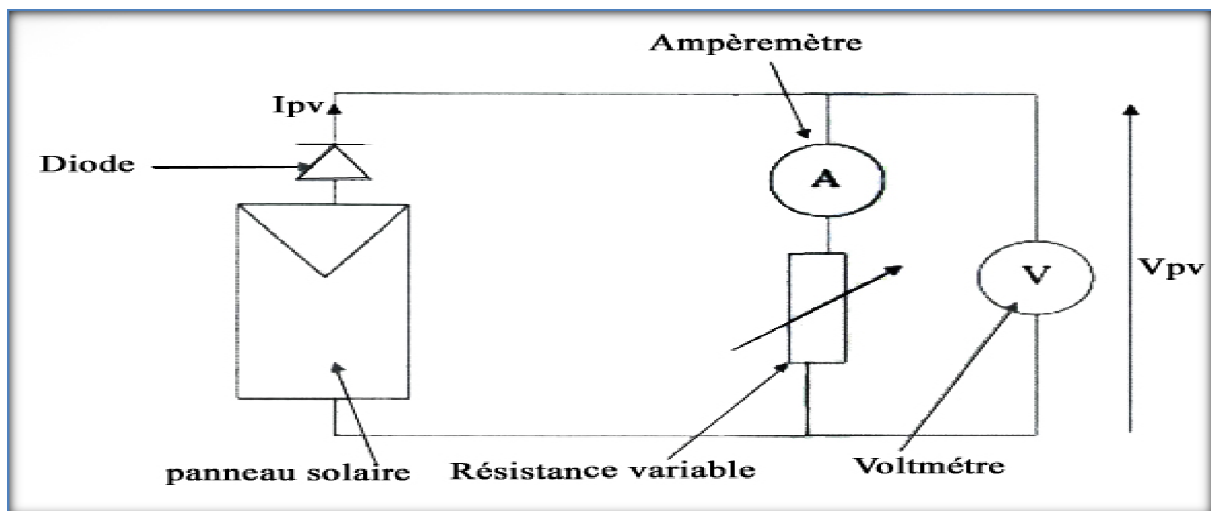


Figure. A.1 : schéma de câblage des essais expérimentaux

Au démarrage, les deux rhéostats ont leur valeur maximale (l'ouverture du circuit permet de mesurer la tension de circuit ouvert), on diminue progressivement le rhéostat B de forte valeur (la tension diminue, on surveille le courant pour avoir des points à intervalles réguliers).

Une fois B complètement court circuit, on diminue alors progressivement le rhéostat A.

Si le ciel est sans nuage, cette méthode peut s'utiliser très simplement avec des appareils portatifs (ampèremètre, voltmètre). En revanche si le ciel est nuageux, l'irradiation change parfois en quelques secondes et sur de grandes amplitudes même si l'on ne le ressent pas à l'œil. Il faut alors réaliser les mesures rapidement.

Annexe B

Dans notre programme nous avons besoin de déterminer en permanence la dérivée de la puissance fournie par le module PV pour savoir si nous nous approchons ou nous nous éloignons du PPM. Pour ce faire, nous devons mesurer la tension et le courant du module PV pour effectuer la multiplication. Pour obtenir une bonne valeur de la puissance moyenne nous effectuons plusieurs échantillons de la puissance instantanée.

Pour chercher le point de puissance maximale, nous comparons un point de puissance P_2 mesuré à l'instant (K) avec un point de puissance P_1 mesuré à l'instant (K-1).

Si $P_1 < P_2$, la dérivée est positive, cela signifie que nous nous rapprochons du point de puissance maximale il faut injecter un ΔI pour s'approcher du PPM.

Si la dérivée de puissance est négative, cela veut dire que nous avons dépassé le point de puissance maximale il faut soustraire un ΔI pour s'approcher du PPM.

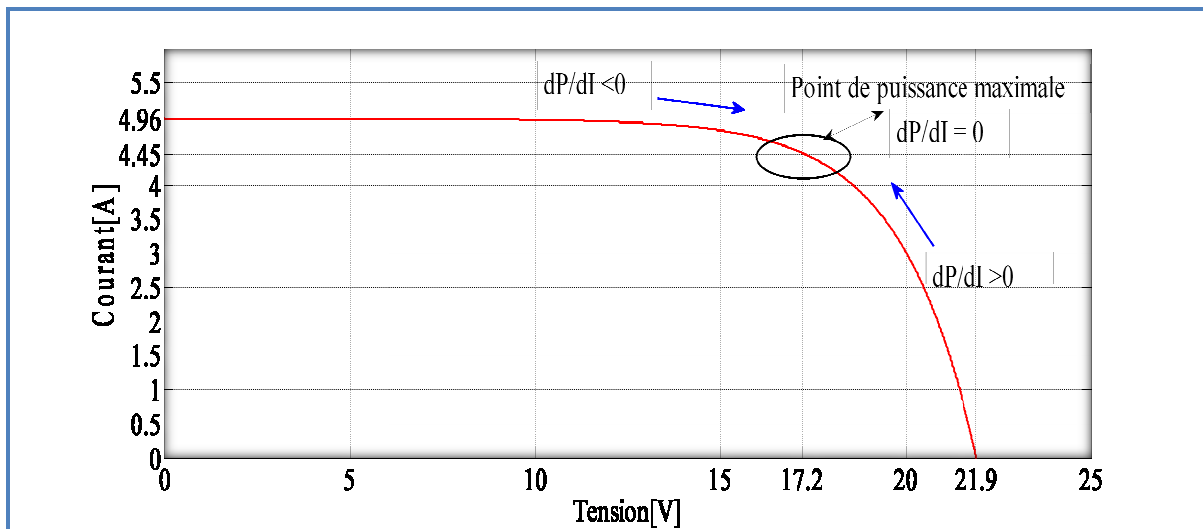


Figure. B.1 : caractéristique $I_{pv}=f(V_{pv})$

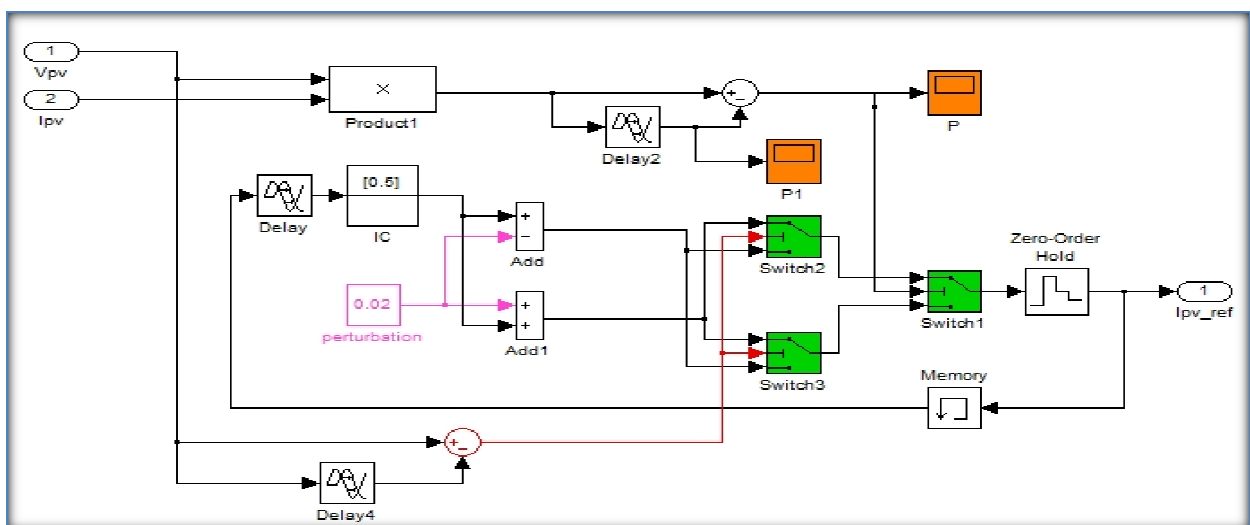


Figure. B.2 : schéma bloc de la commande MPPT de type P&O sous Matlab-Simulink

Annexe B

Dans notre programme nous avons besoin de déterminer en permanence la dérivée de la puissance fournie par le module PV pour savoir si nous nous approchons ou nous nous éloignons du PPM. Pour ce faire, nous devons mesurer la tension et le courant du module PV pour effectuer la multiplication. Pour obtenir une bonne valeur de la puissance moyenne nous effectuons plusieurs échantillons de la puissance instantanée.

Pour chercher le point de puissance maximale, nous comparons un point de puissance P_2 mesuré à l'instant (K) avec un point de puissance P_1 mesuré à l'instant (K-1).

Si $P_1 < P_2$, la dérivée est positive, cela signifie que nous nous rapprochons du point de puissance maximale il faut injecter un ΔI pour s'approcher du PPM.

Si la dérivée de puissance est négative, cela veut dire que nous avons dépassé le point de puissance maximale il faut soustraire un ΔI pour s'approcher du PPM.

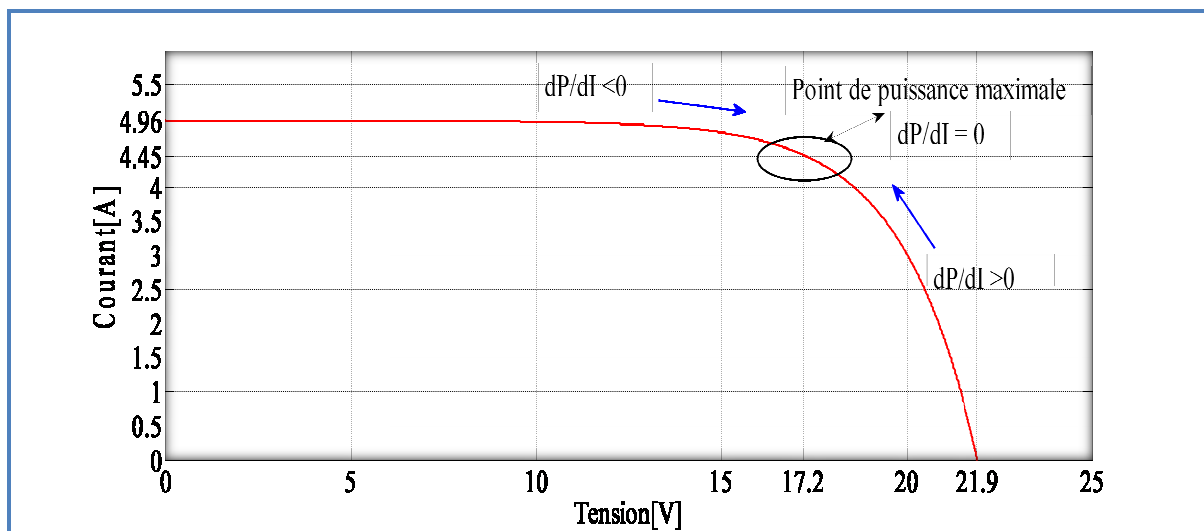


Figure. B.1 : caractéristique $I_{pv}=f(V_{pv})$

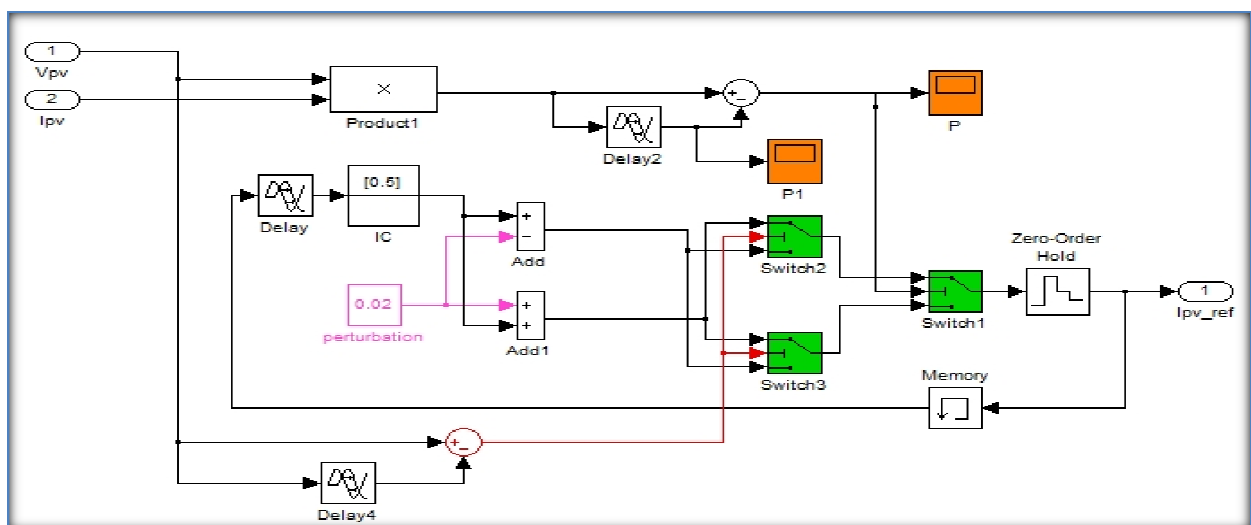


Figure. B.2 : schéma bloc de la commande MPPT de type P&O sous Matlab-Sumilink

Annexe C

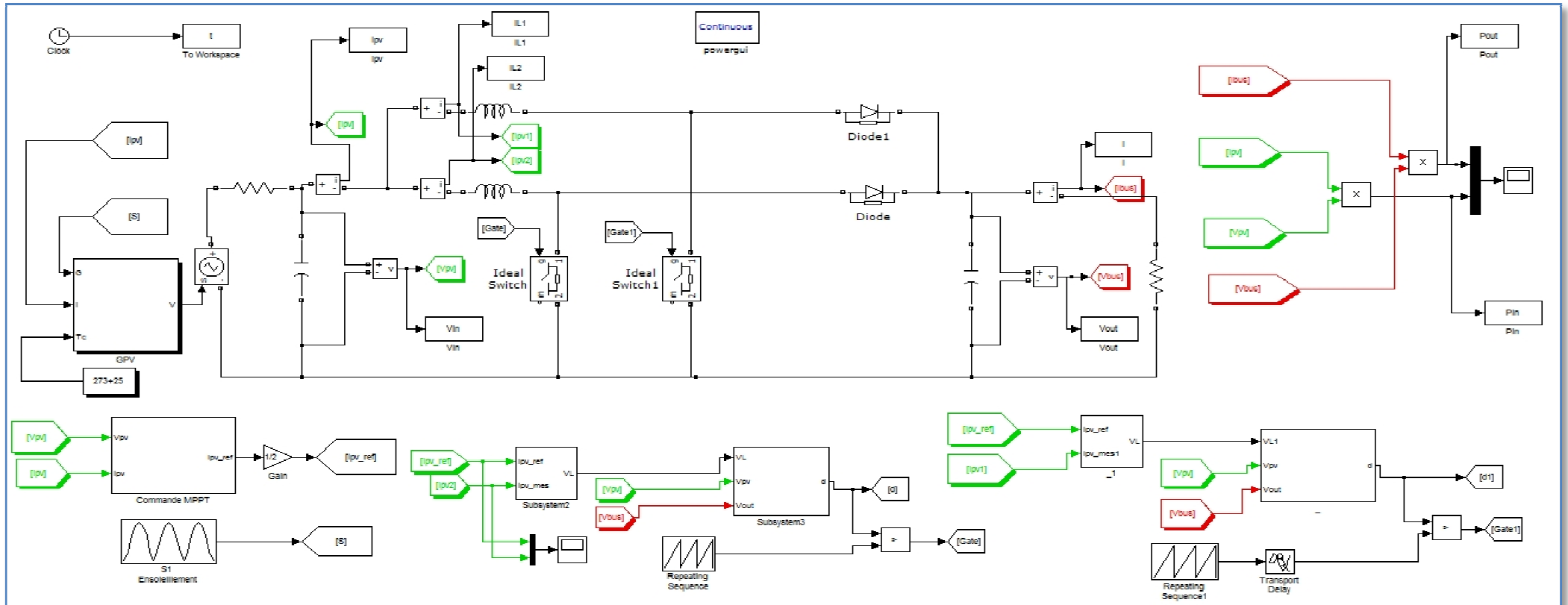


Figure. C. 2 : Block de simulation du système avec un Boost entrelacé

Paramètres de simulation			
Inductance L	$200 \cdot 10^{-3} \text{H}$	Charge résistive R	20Ω
Capacité de filtrage C	$250 \cdot 10^{-6} \text{F}$	Fréquence de découpage f	3KHz

Annexe C

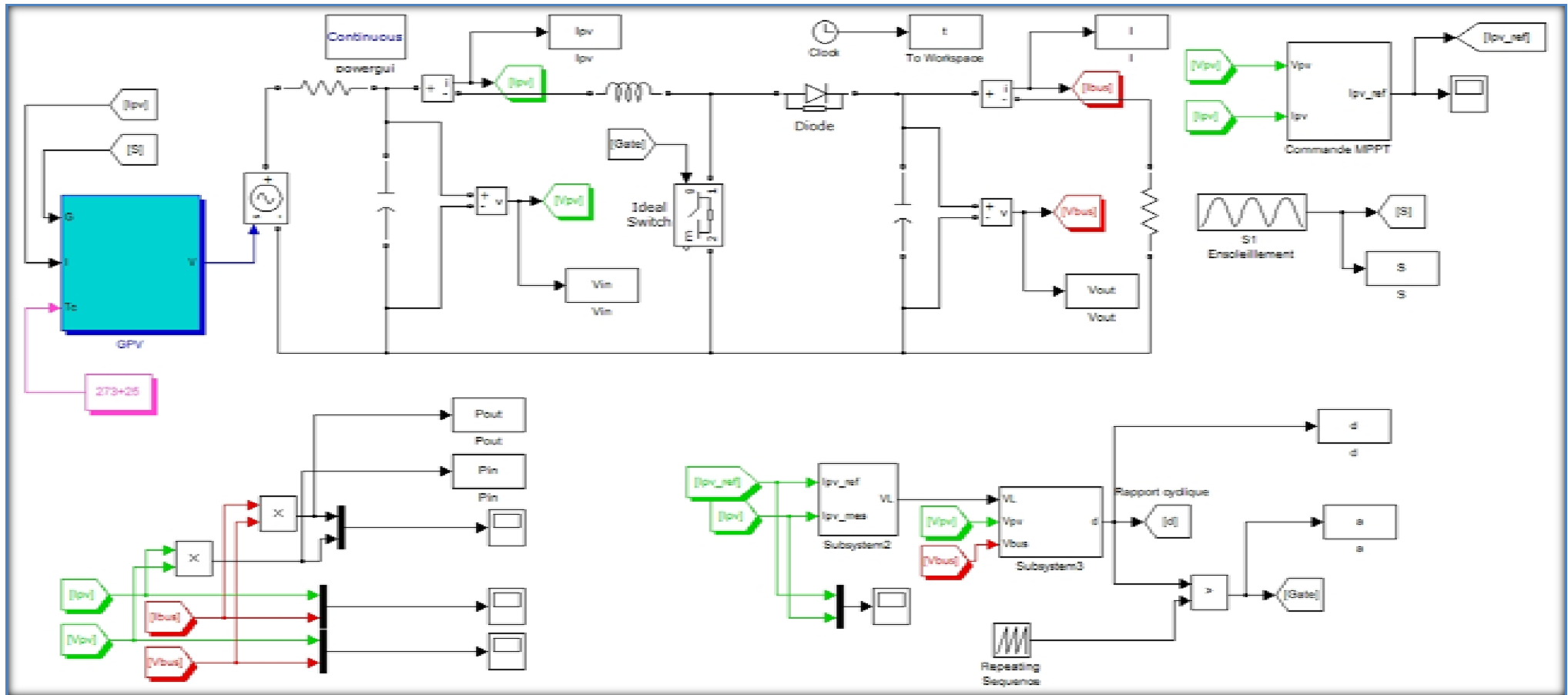


Figure .C.1 : Block de simulation de système avec un Boost élémentaire

Paramètres de simulation			
Inductance L	$200 \cdot 10^{-3} \text{H}$	Charge résistive R	20Ω
Capacité de filtrage C	$250 \cdot 10^{-6} \text{F}$	Fréquence de découpage f	3KHz

Annexe D

L'énergie dissipée au blocage du transistor est estimée à l'aide de la forme idéalisée des signaux de tension et courant représentés sur la figure D1. Partant des signaux idéalisés, l'énergie dissipée est égale à l'intégrale du produit courant tension aux bornes du transistor durant l'intervalle de temps t_{off} exprimé par la somme des temps t_{if} et t_{vr} .

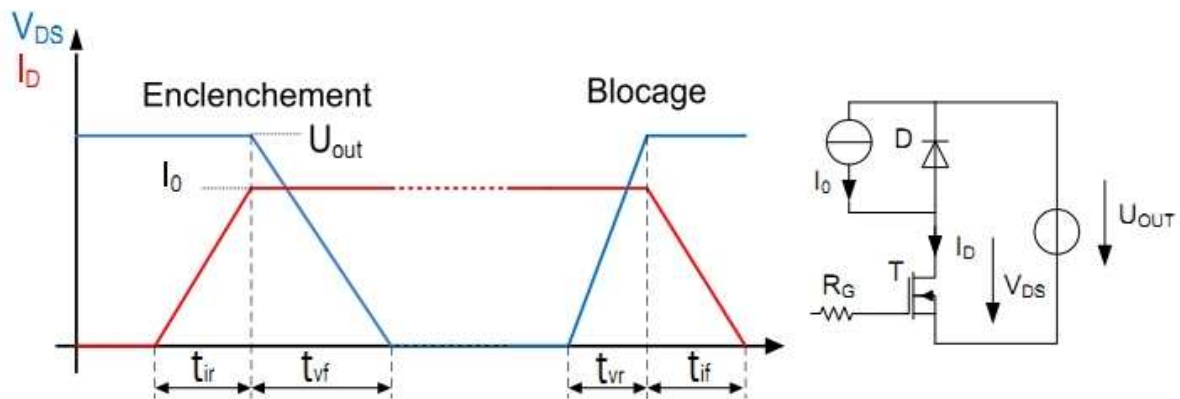


FIGURE. D1: Transistor Mosfet en commutation [16]

La puissance dissipée au blocage du transistor P_{off} n'est rien d'autre que l'énergie dissipée durant la phase d'extinction du transistor multipliée par la fréquence de pulsation [16].

$$P_{off} = f \cdot \int V_{DS} I_D dt$$

Résumé

L'objet de notre travail est orienté vers l'optimisation de la puissance du générateur PV, sous différents paramètres « éclairage, température », par l'incorporation d'un convertisseur continu-continu de type « boost » entrelacé commandé par un algorithme de recherche du point de la puissance maximale (MPPT).

Le modèle mathématique du panneau photovoltaïque a été présenté et simulé sous Matlab-SIMULINK. Nous avons montré l'effet de l'irradiation et de la température sur les caractéristiques du panneau, une validation expérimentale a été effectuée par des essais pratiques validant le modèle mathématique obtenu. Ensuite, une étude détaillée du hacheur élévateur entrelacé démontrant l'intérêt de ce dernier pour les applications photovoltaïques. Enfin, des essais de simulations ont été effectués en variant plusieurs paramètres à savoir l'éclairage, la fréquence de fonctionnement et le nombre de bras du convertisseur. Les résultats de simulations obtenus confirment l'intérêt porté sur cette chaîne de conversion, qui ne nous permet pas seulement de réduire le nombre de modules photovoltaïques lorsqu'il s'agit de grandes puissances, mais prolonger aussi la durée de vie du panneau.