

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Mohamed Seddik Ben Yahia - Jijel
Faculté des Sciences et de la Technologie



جامعة محمد الصديق بن يحيى - جيجل
كلية العلوم والتكنولوجيا

Département D'Électrotechnique

Mémoire

Présenté en vue de l'obtention du diplôme

Master en Electrotechnique

Option : Energies Renouvelables

Thème

**Commande en MPPT d'une chaine photovoltaïque à base d'un
hacheur multiniveaux**

Par :

Mr / SARRI Sofiane

Et

Mr / BOUTEFAHA Hocine

Travail proposé et dirigé par :

Dr / LALILI Djafer

Promotion 2020

Université Mohamed Seddik Ben Yahia - Jijel
PB 98, Ouled Aissa. 18000. Algérie. Tél : +213 34 50 11 89
<http://www.univ-jjel.dz>

Dédicaces

Au nom d'ALLAH tout puissant pour tous les bienfaits qu'il ne cesse d'accomplir dans nos vies

Que la paix et le salut soient son messager Mohamed, sa famille et ses compagnons.

Je dédie ce travail

A mes parents

A mes frères

Mes dédicaces vont également à mes amis et mes collègues particulièrement

A mon binôme HOCINE qui a partagé avec moi ce travail

A tous mes proches de la famille SARRI et A tous ceux qui ont m'enseigné tout au long de ma vie scolaire

SOFIANE

Dédicaces

Je dédie cet humble travail

A mes chers parents ma mère et mon père

Pour leur patience, leur amour, leur soutien inconditionnel et leurs encouragements

A mes amis et mes camarades

A tous les personnes qui ont cru en moi -ou pas - et qui grâce à elles je suis arrivé aujourd'hui là.

A tous mes professeurs du primaire, collègue, lycée et enseignement supérieur.

A mon binôme SOFIANE, avec qui je partage cet événement grandiose.

HOCINE

Remerciements

Nos remerciements vont tout d'abord à dieu tout puissant pour la volonté, la santé et la patience qu'il nous a donné durant toutes ces longues années.

*Nous exprimons notre profonde gratitude au Directeur de ce mémoire monsieur **LALILI Djafer**, doctorant à l'université Mohamed Seddik Ben Yahia - Jijel pour son encadrement, ses directives et sa disponibilité tout au long de la réalisation de ce travail.*

Nous tenons à remercier également tous les membres du jury qui ont accepté de juger notre travail et pour l'intérêt qu'ils portent à ce dernier

Nous remercions également tous les enseignants de département d'électrotechnique de l'université Mohamed Seddik Ben Yahia - Jijel qui ont participé à notre formation pendant tout le cycle universitaire.

Nous ne pouvons pas oublier de remercier nos amis et nos collègues d'étude

Et enfin, à toutes les personnes qui ont contribués, de près ou de loin à la réalisation de ce modeste travail.

Jijel, le 02/11/2020

SOFIANE - HOCINE

Sommaire

INTRODUCTION GENERALE	XIV
<i>Chapitre 01</i>	<i>1</i>
GENERALITES SUR LES CONVERTISSEURS ET LES SYSTEMES PHOTOVOLTAÏQUES	1
1.1. Introduction	1
1.2. L'énergie solaire photovoltaïque.....	1
1.2.1. Définition	1
1.2.2. La conversion de la lumière en électricité	1
1.3. Cellule photovoltaïque	2
1.3.1. Définition	2
1.3.2. Principe de l'effet photovoltaïque	2
1.3.3. Les différentes technologies des cellules photovoltaïques	3
1.4. Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque	6
1.5. Caractéristiques électriques d'une cellule photovoltaïque	8
1.5.1. Caractéristiques (courant / tension)	8
1.5.2. Caractéristiques (puissance / tension).....	9
1.6. Grandeurs caractéristiques d'une cellule photovoltaïque.....	10
1.6.1. Tension en circuit ouvert V_{co}	10
1.6.2. Courant de court-circuit I_{cc}	10
1.6.3. Point du fonctionnement P_m (V_m, I_m)	10
1.6.4. Facteur de forme.....	11
1.6.5. Rendement photovoltaïque	11
1.7. L'influence de la variation des conditions météorologiques sur les caractéristiques d'un module photovoltaïque	11
1.7.1. L'influence de l'irradiation	11
1.7.2. Influence de la température	12
1.7.3. Influence des résistances série et parallèle	13
1.8. Modules photovoltaïques	13
1.8.1. Association en Série	13
1.8.2. Association en Parallèle	14
1.8.3. Association série-parallèle	15
1.9. Champ photovoltaïque.....	15
1.9.1. Circuit équivalent d'un champ photovoltaïque	16
1.9.2. Différentes structures des systèmes photovoltaïques.....	16
1.9.3. Systèmes autonomes	16

1.9.4. Système connecté au réseau.....	17
1.9.5. Systèmes hybrides.....	18
1.10. Avantages et inconvénients de l'énergie solaire photovoltaïque.....	19
1.10.1. Avantages.....	19
1.10.2. Inconvénients.....	19
1.11. Conclusion.....	20
 <i>Chapitre 02.....</i>	 <i>21</i>
CONVERTISSEUR DC-DC.....	21
2.1. Introduction.....	21
2.2. Définition.....	21
2.3. Type des hacheurs.....	22
2.3.1. Hacheur abaisseur « Buck ».....	22
2.3.2. Hacheur élévateur « Boost».....	24
2.3.3. Hacheur abaisseur-élévateur «Buck- Boost».....	27
2.4. Commande par modulation de largeur d'impulsion (MLI) des hacheurs.....	29
2.4.1. Cas d'un hacheur abaisseur.....	30
2.4.2. Principe de la modulation.....	30
2.4.3. Schéma du hacheur et de sa commande.....	31
2.4.4. Schéma Simulink.....	31
2.4.5. Résultats de simulation.....	32
2.5. Hacheurs multiniveaux.....	36
2.5.1. Structure d'un hacheur à trois niveaux (FC).....	37
2.5.2. Configurations du hacheur à trois niveaux.....	37
2.5.3. Commande en MLI du hacheur à trois niveaux.....	37
2.5.4. Simulation numérique.....	39
2.6. Conclusion.....	44
 <i>Chapitre 03.....</i>	 <i>45</i>
SYSTEME PHOTOVOLTAÏQUE A BASE D'UN CONVERTISSEUR DC-DC.....	45
3.1. Introduction.....	45
3.2. Système photovoltaïque à base d'un hacheur.....	45
3.3. Commande MPPT.....	45
3.3.1. Principe de la MPPT.....	46
3.3.2. Algorithme de contrôle MPPT.....	48
3.4. Simulation d'un système photovoltaïque à base d'un hacheur à deux niveaux.....	50

3.5. Simulation d'un système photovoltaïque à base d'un hacheur à trois niveaux	55
3.6. Conclusion.....	59
CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVE.....	60

Liste des figures

Figure 1.1 Conversion de l'énergie solaire en électricité.....	2
Figure 1.2 Schéma simplifié de principe de jonction PN	3
Figure 1.3 Cellule photovoltaïque monocristalline	4
Figure 1.4 Cellule photovoltaïque poly cristallin.....	4
Figure 1.5 Silicium amorphe	5
Figure 1.6 Les cellules à couches minces	6
Figure 1.7 Circuit électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque.....	6
Figure 1.8 Caractéristique (courant-tension) d'un module photovoltaïque	9
Figure 1.9 Caractéristique (puissance-tension) d'un module photovoltaïque.....	9
Figure 1.10 (a) Caractéristique $I(V)$ et (b) Caractéristique PV d'un module photovoltaïque.....	12
Figure 1.11 (a) Caractéristique $I(V)$ et (b) Caractéristique PV d'un module photovoltaïque.....	12
Figure 1.12 (a) Influence la résistance parallèle (b) Influence la résistance série.	13
Figure 1.13 Caractéristique courant tension de N_s cellule en série.....	14
Figure 1.14 Caractéristique courant tension de (N_p) cellule en parallèle	14
Figure 1.15 Caractéristique courant-tension d'un regroupement série et parallèle des cellules photovoltaïque.....	15
Figure 1.16 Constitution d'un champ photovoltaïque.....	15
Figure 1.17 Circuit équivalent d'un champ photovoltaïque	16
Figure 1.18 Système autonome.....	17
Figure 1.19 Système connecté au réseau	17
Figure 1.20 Système hybride.....	18
Figure 2.1 Symbole et signaux du convertisseur dc-dc.....	21
Figure 2.2 Schéma électronique de convertisseur abaisseur « Buck »	22
Figure 2.3 Convertisseur Buck durant l'état On	23
Figure 2.4 Convertisseur Buck durant l'état Off.....	23
Figure 2.5 Formes d'onde des Courants et des Tensions d'un convertisseur abaisseur	24
Figure 2.6 Schéma de convertisseur Boost.....	25
Figure 2.7 Schéma équivalent de la phase 1.....	25
Figure 2.8 Circuit équivalent pour TOff.....	26
Figure 2.9 Formes d'onde des courants et des tensions d'un convertisseur boost	27
Figure 2.10 Schéma de convertisseur inverseur Buck-Boost.....	27
Figure 2.11 Convertisseur Buck-Boost Durant l'état On.....	28

Figure 2.12	Convertisseur Buck-Boost Durant l'état Off.....	28
Figure 2.13	Formes d'onde des courants et des tensions d'un convertisseur Buck-Boost.....	29
Figure 2.14	Structure du hacheur série (Buck).....	30
Figure 2.15	Principe du command en MLI d'un hacheur.....	31
Figure 2.16	Montage du hacheur abaisseur et de sa commande.....	31
Figure 2.17	schéma de simulation d'un hacheur deux niveaux et sa commande.....	32
Figure 2.18	Allure de tension de charge ($\alpha=0.25$).....	32
Figure 2.19	Courant de charge ($\alpha=0.25$).....	33
Figure 2.20	Tension de l'interrupteur S_1 et de la diode D ($\alpha=0.25$).....	33
Figure 2.21	Tension entrée et sortie de hacheur deux niveaux ($\alpha = 0.5$).....	34
Figure 2.22	Le courant sortie de hacheur deux niveaux ($\alpha = 0.5$).....	34
Figure 2.23	La tension de diode et l'interrupteur S_1 ($\alpha = 0.5$).....	34
Figure 2.24	La tension de entrée et sortie ($\alpha=0.75$).....	35
Figure 2.25	Le courant de sortie ($\alpha=0.75$).....	35
Figure 2.26	La tension borne d'interrupteur S_1 et diode ($\alpha=0.75$).....	36
Figure 2.27	Hacheur trois niveaux et sa commande.....	37
Figure 2.28	Principe de la modulation command mli a trois niveaux.....	38
Figure 2.29	Tension sortie et entre rapport cycle = 0.25.....	40
Figure 2.30	Courant de sortie I_s (rapport cyclique = 0.25).....	40
Figure 2.31	Tension et courant de capacité (rapport = 0.25).....	41
Figure 2.32	La tension des interrupteurs (rapport = 0.25).....	41
Figure 2.33	Tension de charge (rapport = 0.75).....	42
Figure 2.34	Courant de charge (rapport = 0.75).....	42
Figure 2.35	Tension de capacité flottante (rapport = 0.75).....	42
Figure 2.36	Courant de la capacité flottant (rapport = 0.75).....	43
Figure 2.37	Tension des interrupteurs (rapport = 0.75).....	43
Figure 3.1	Schéma simplifié d'un système photovoltaïque à base d'un hacheur.....	46
Figure 3.2	Schéma de principe de la commande MPPT d'un système photovoltaïque.....	47
Figure 3.3	Recherche et recouvrement du Point Puissance Maximale.....	47
Figure 3.4	Illustration de la méthode P&O.....	48
Figure 3.5	Algorithme de MPPT à base de la méthode P&O.....	49
Figure 3.6	Schéma représente le bloc de simulation d'un système PV à base de hacheur buck deux niveaux.....	51
Figure 3.7	Tension de sortie du générateur photovoltaïque.....	52
Figure 3.8	Courant de sortie du générateur photovoltaïque.....	52

Figure 3.9 Puissance de sortie du générateur photovoltaïque	53
Figure 3.10 Tension charge	53
Figure 3.11 Courant de charge	53
Figure 3.12 Puissance de charge	54
Figure 3.13 Tension aux bornes de l'interrupteur (Mosfet)	54
Figure 3.14 Tension à la borne de la diode	54
Figure 3.15 Schéma de simulation d'un système PV à base de hacheur à trois niveaux	55
Figure 3.16 Tension de sortie du générateur photovoltaïque	56
Figure 3.17 Courant de sortie du générateur photovoltaïque	57
Figure 3.18 Puissance de sortie du générateur photovoltaïque	57
Figure 3.19 Tension de charge	57
Figure 3.20 Courant de charge	58
Figure 3.21 Puissance charge	58
Figure 3.22 Tension à la borne du condensateur flottant (U_c)	58
Figure 3.23 Tension aux bornes de l'interrupteur (Mosfet)	59
Figure 3.24 Tension aux bornes de la diode	59

Liste des tableaux

Tableau 1.1 Valeurs des paramètres du module photovoltaïque.....	8
Tableau 3.1 Caractéristiques d'un panneau solaire.....	50
Tableau 3.2 Les différents paramètres du circuit du système.....	50

Listes des abréviations

Isc, 0 : Le courant de court-circuit

V oc, 0 : la tension de circuit ouvert.

Pmax, 0 : la puissance maximale

NOCT : Nominal Operating Cell Temperature

STC: Standard test conditions

Iph: Photo-courant.

T : Température absolue en °K.

K : Constant de Boltzmann (1.38.10⁻²³ J / K).

FF: Facteur de forme.

η : Rendement.

P : Puissance.

V : Tension.

I : Courant.

α : Rapport cyclique.

PV : Photovoltaïque.

GPV : Générateur photovoltaïque.

MPPT: Maximum Power Point Tracking.

MLI : La modulation de largeur d'impulsions

P&O : Perturbation et Observation.

DC: Courant Continu.

AC : Courant Alternatif.

CS : convertisseur statique

PPM : Point de Puissance Maximale.

P&O : Perturb And Observe (Perturbation et Observation).

MOSFET : Métal Oxide Silicon Field Effect Transistor

DC/DC : Hacheur Courant Continu/Courant Continu.

I-V : Courant-tension

P-V : Puissance-tension

n : Le nombre de cellule

Ns : Le nombre de module en série

Np : Le nombre de module en parallèle

N : Le nombre de niveau de tension de sortie

P_m : Puissance maximale(W)

q : La charge électrique 1.6 10⁻¹⁹(C)

R_S : Résistance série de la cellule

R_{sh} : Résistance parallèle de la cellule

T : Température de la cellule (c)

T_n : Température nominal (298°K)

V_{oc} : La tension du circuit ouvert (V)

V_{ref} : La tension de signal de référence

ΔT : La variation de température (°C)

R : Charge

L : L'inductance

C_{in} : Condensateur de l'entrée du système

C_{out} : Condensateur de la sortie du système

C : Condensateur flottant

V_{PV} : Tension du module (V)

P_{PV} : Puissance du module (W)

INTRODUCTION GENERALE

Depuis le début de la révolution industrielle, le besoin énergétique, sous ses diverses formes, a rencontré une augmentation très significative, ce qui a obligé les scientifiques de chercher de nouvelles solutions pour fournir et développer, et même de rationaliser l'exploitation des énergies. Jusqu'à maintenant, l'énergie électrique est la source la plus utilisée dans les différents domaines, dans les plus grandes usines aux plus petits appareils électroniques, Pour générer cette énergie, plusieurs techniques sont utilisées, on trouve notamment les Générateurs, basés sur l'énergie fossile, particulièrement le pétrole, ou bien qui utilisent l'énergie nucléaire. Ces types d'énergie posent des problèmes environnementaux et même économiques, ce qui oblige à penser sérieusement aux énergies renouvelables. Parmi les énergies les plus modernes, qui ont un brillant avenir, car ils sont propres et écologiques : « l'énergie solaire ». Il existe plusieurs façons d'utiliser cette énergie pour produire de l'électricité, mais la méthode la plus importante, et celle qui nous concerne dans ce mémoire, est la méthode basée sur le principe de la photovoltaïque, elle a l'avantage d'être non polluante, souple et fiable La première cellule photovoltaïque a été réalisée en 1954, à basse du silicium, aujourd'hui il reste encore le matériau le plus couramment utilisé. La modélisation mathématique des cellules solaires est indispensable pour toute opération d'optimisation du rendement ou de diagnostic du générateur photovoltaïque [1].

La chose connue sur l'énergie solaire c'est que rendement réel de la conversion d'un module photovoltaïque est faible. Il faut donc exploiter la plus grande puissance d'énergie fournie par le module solaire. Autrement dit, il faut faire fonctionner le système photovoltaïque dans son point de puissance maximale.

Le suivi du point de puissance maximale peut être obtenu en utilisant plusieurs méthodes, telles que la méthode de perturbation et d'observation de la méthode de conductance incrémentale et des méthodes intelligentes. Ces méthodes varient dans leur simplicité, leur vitesse de convergence et leur implémentation matérielle.

Les systèmes photovoltaïques se relient à leurs charges à travers des convertisseurs de puissances. Ces convertisseurs permettent de conditionner la puissance fournie par le champ photovoltaïque aux caractéristiques de la charge. Si cette charge est une charge continue, on doit utiliser un convertisseur continu-continu. La commande de ce hacheur assure la poursuite du point de puissance maximale.

Habituellement on utilise des hacheurs à deux niveaux dans les systèmes photovoltaïques. Ce type des hacheurs présentent des inconvénients tels que la tension de blocage élevée des

interrupteurs dans le cas d'un système de forte puissance. L'utilisation des convertisseurs multiniveaux permet de contourner ces inconvénients.

Dans ce mémoire, on va étudier un système photovoltaïque autonome, alimentant une charge continue, constitué à la base d'un hacheur à trois niveaux.

Ce mémoire est organisé en trois chapitres. Dans le premier chapitre, on présente le principe et les variantes de la conversion photovoltaïque. Dans le deuxième chapitre, nous étudions les différents types des convertisseurs statiques dc-dc (abaisseur (Buck), élévateur (Boost) et abaisseur-élévateur (Buck-Boost) et leur modélisation, nous nous intéressons essentiellement au hacheur multi niveaux. Le troisième chapitre est consacré à la simulation du système photovoltaïque à base d'un hacheur à deux niveaux, et à base d'un hacheur à trois niveaux.

Chapitre 01

GENERALITES SUR LES CONVERTISSEURS ET LES SYSTEMES PHOTOVOLTAÏQUES

1.1. Introduction

L'énergie solaire photovoltaïque provient de la transformation directe d'une partie du Rayonnement solaire en énergie électrique. Cette conversion d'énergie s'effectue par le biais d'une cellule dite photovoltaïque (PV) basée sur un phénomène physique appelé effet photovoltaïque.

Dans ce chapitre, nous nous concentrerons sur l'étude de la cellule solaire et de son principe de fonctionnement. Nous parlerons également des types de cellules solaires avec leurs différentes caractéristiques et des matériaux de base utilisés. Nous nous concentrerons également sur le schéma électrique de la cellule photovoltaïque et l'effet des conditions météorologiques sur la production d'énergie. Nous verrons également l'effet des connexions des panneaux solaires en parallèle ou en série sur la tension (U) et le courant (I).

1.2. L'énergie solaire photovoltaïque

1.2.1. Définition

L'énergie solaire photovoltaïque est une forme d'énergie renouvelable. Elle permet de produire de l'électricité par transformation d'une partie du rayonnement solaire grâce à une cellule photovoltaïque.

1.2.2. La conversion de la lumière en électricité

Le terme « photovoltaïque » désigne le processus physique qui consiste à transformer l'énergie lumineuse en énergie électrique par le transfert de l'énergie des photons aux électrons d'un matériau. La préfixe photo vient de grec « phos » qui signifie lumière. « Volt » vient de patronyme d'Alessandro volta (1745-1827), physicien qui a contribué aux recherches sur l'électricité. Photovoltaïque (PV) signifie donc littéralement électricité lumineuse [2].

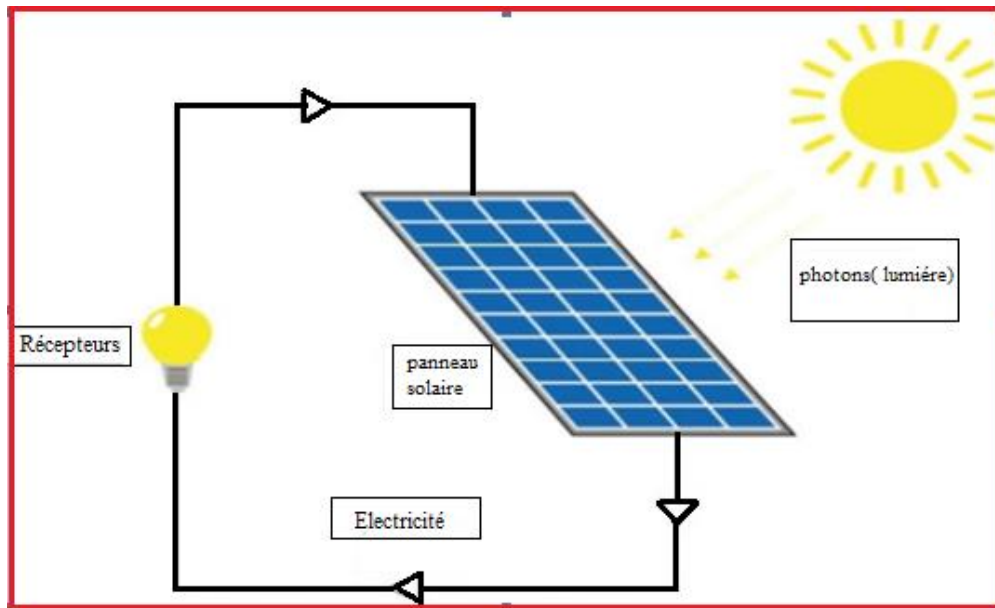


Figure 1.1 Conversion de l'énergie solaire en électricité

1.3. Cellule photovoltaïque

1.3.1. Définition

La cellule PV est le plus petit élément d'une installation photovoltaïque. Elle est composée de matériaux semi-conducteurs de type P-N qui produisent un courant électrique sous l'effet des photons lumineux. Cette transformation est basée sur les trois mécanismes suivants :

- Absorption des photons par le matériau constituant le dispositif
- Conversion de l'énergie du photon en énergie électrique, ce qui correspond à la création des paires d'électrons/trous dans le matériau semi-conducteur
- Collecte des particules générées dans le dispositif.

1.3.2. Principe de l'effet photovoltaïque

C'est la conversion de l'énergie que transportent les photons de la lumière lorsqu'ils rentrent en collision avec des matériaux semi-conducteurs convenablement traités, en énergie électrique capable de créer un courant d'électron à travers un circuit extérieur, en réalisant un travail utile. La clé pour produire un courant électrique utile est d'arriver à extraire les électrons libérés. Un procédé pour faire cela est d'introduire dans les matériaux semi-conducteurs de l'élément chimique qui contribue à produire un excès d'électrons et de trous. Ces éléments, qui altèrent notablement les propriétés intrinsèques du semi-conducteur, s'appellent les dopants et le matériau est dit dopé lorsque le processus d'incorporation au semi-conducteur est achevé. Un dopant approprié pour le silicium est le bore, la structure créée s'appelle un semi-conducteur de type P (positif).

Un autre dopant possible pour le silicium est le phosphore. Le semi-conducteur est dit de type N (négatif). Si les photons de la lumière incidente communiquent de l'énergie aux électrons du semi-conducteur, quelques électrons peuvent traverser la barrière de potentiel, en étant expulsés hors du semi-conducteur dans un circuit extérieur. Ceci génère un courant électrique. Les électrons, après avoir parcouru le circuit externe, retournent dans le semi-conducteur par la face opposée. La physique quantique prédit un rendement théorique pour la cellule de silicium de 26%, mais les cellules commerciales obtenues de manière industrielle ne montent pas au-dessus de 17%, ces valeurs impliquant une limitation sur la puissance électrique pouvant être obtenue, montrent que seulement une petite partie de l'énergie solaire peut générer de l'électricité. [3]

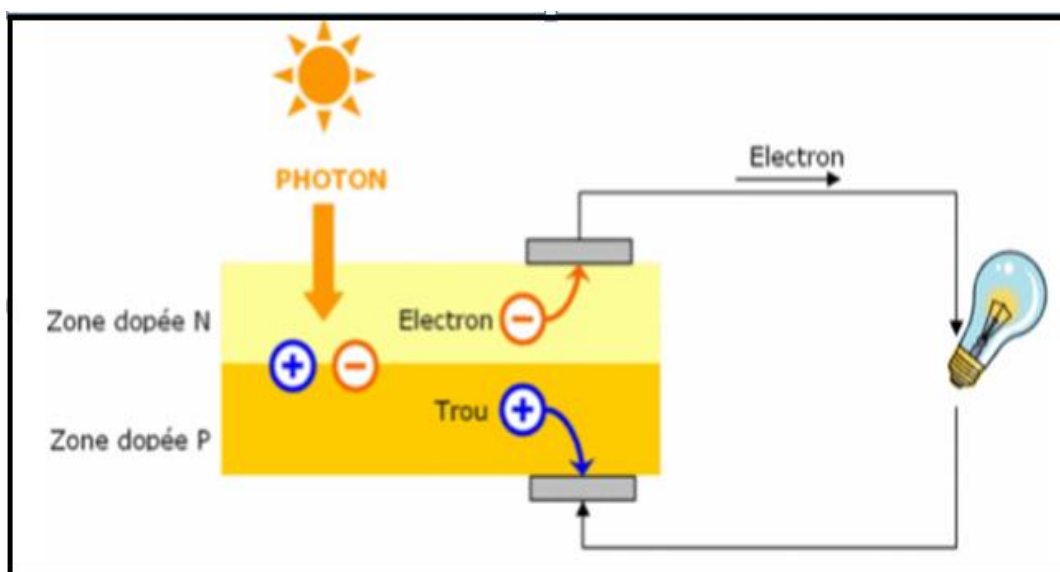


Figure 1.2 Schéma simplifié de principe de jonction PN

1.3.3. Les différentes technologies des cellules photovoltaïques

On distingue plusieurs types des cellules photovoltaïques selon la propriété et le type de matériaux utilisés parmi lesquelles :

➤ Le silicium

La filière silicium représente aujourd'hui l'essentiel de la production mondiale des Panneaux photovoltaïques. Il s'agit d'un matériau extrêmement abondant, stable et non Toxique. Cette filière est elle-même subdivisée en plusieurs technologies distinctes de par la Nature du silicium employé et/ou sa méthode de fabrication. Cette filière comporte deux Technologies : le silicium monocristallin et le silicium multi cristallin. [4]

➤ **Cellule en silicium monocristallin :**

Lors du refroidissement, le silicium fondu se solidifie en ne formant qu'un seul cristal de grande dimension. On découpe ensuite le cristal en fines tranches qui donneront les cellules. Ces cellules sont en général d'un bleu uniforme, intense et brillant. Elles sont utilisées, mais ne sont pas majoritaires sur le marché de l'énergie photovoltaïque. Le rendement du silicium monocristallin est le plus élevé, il est compris entre 12 et 20% pour les cellules industrielles. Son coût élevé est aujourd'hui un handicap et le silicium monocristallin perd du terrain devant le silicium multicristallin. [5]



Figure 1.3 Cellule photovoltaïque monocristalline.

➤ **Cellule en silicium poly cristallin :**

Le silicium multicristallin (Poly cristallin) est devenu aujourd'hui la technologie la plus utilisée. A elle seule elle représente près de 50% du marché. Ces cellules sont obtenues par coulage de cristaux de silicium, ce qui rend sa structure hétérogène. Son rendement est légèrement inférieur au silicium monocristallin il est compris entre 10 et 14% selon les fabricants. En revanche sa fabrication est beaucoup plus simple, les coûts de production sont donc plus faibles. [5]



Figure 1.4 Cellule photovoltaïque poly cristallin

➤ **Cellules Silicium amorphe :**

Le silicium intégré dans les cellules a-Si n'a pas fait l'objet d'une cristallisation. Ses atomes sont donc agencés sans réelle organisation, ce qui leur permet de mieux capter la lumière (par rapport au silicium cristallin). Problème : les charges générées ont plus de difficultés pour se déplacer à cause de la désorganisation de la matière, ce qui se traduit par un mauvais coefficient de conversion. Par conséquent, leur rendement est faible. La désorganisation atomique a d'autres conséquences : les électrons de valence des atomes de Si ne forment pas toujours des liaisons covalentes au sein du semi-conducteur. Il apparaît alors des liaisons pendantes qui peuvent agir sur les propriétés électroniques du matériau. Pour limiter ce phénomène, les couches de silicium sont régulièrement passivées avec de l'hydrogène (a – Si: H). Des atomes d'hydrogène établissent des liaisons avec les électrons restés libres, et réduisent ainsi le nombre de liaisons pendantes.



Figure 1.5 Silicium amorphe

➤ **Les cellules à couches minces :**

Le principal frein au développement du photovoltaïque à très grande échelle reste encore aujourd'hui. Malgré la baisse de ces dernières années, le prix trop élevé du kilo Watt crête KWc. Le kilo Watt crête (KWc) est l'unité qui définit la puissance d'un générateur PV aux conditions de test standards ($1000\text{W}/\text{m}^2$ et 25°C).

La majorité du prix d'un générateur photovoltaïque provient du silicium et du procédé de purification. Plusieurs types de cellules photovoltaïques visant à diminuer la quantité de matière nécessaire à leur fabrication sont aujourd'hui développés et commencent à être industrialisés. Ces technologies appelées couches minces font appel à des procédés de fabrication (dépôt sur ruban) visant la diminution de l'épaisseur des cellules. La technologie à couche mince dont la plus mûre est celle du silicium amorphe (a-Si) représentait en 2008 plus de 7% du marché mondial. L'avantage de cette technique est l'utilisation des substrats à bas coûts. Le silicium est déposé à basse température sur un substrat en verre. De plus, il est possible de déposer ces cellules sur des substrats souples (figure 1.8) et fabriquer des cellules souples. Son prix est plus faible que celui des cellules

cristallines, il est d'environ 7%.

D'autres matériaux sont également utilisés dans les filières à couches minces comme le Tellure de Cadmium (CdTe), le di sélénure de cuivre et d'indium (CIS) et de gallium (CIGS). Ces technologies possèdent de bons rendements, pouvant aller jusqu'à 19% [6].



Figure 1.6 Les cellules à couches minces

1.4. Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque

Le schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque comprend un générateur de courant qui modélise l'éclairement et une diode en parallèle qui modélise la jonction PN. Mais le schéma équivalent réel tient compte de l'effet résistifs parasites dus à la fabrication, il est représenté sur le schéma équivalent par deux résistances. [7]

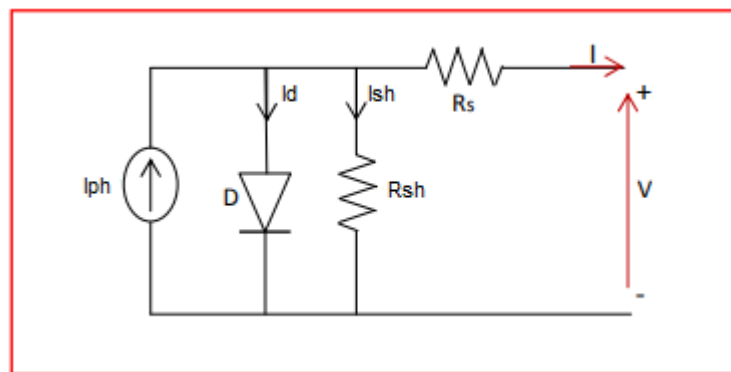


Figure 1.7 Circuit électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque

-Le courant de sortie d'une cellule photovoltaïque se met sous la forme mathématique Suivante.

$$I = I_{ph} - I_d - I_{sh} \quad (1.1)$$

Avec :

I: courant disponible; [A]

I_{ph} : Courant produit par la photopile ; [A] Ce courant est proportionnel au flux lumineux (ϕ)

I_d : Courant de polarisation de la diode; [A]

I_{sh} : Courant de la résistance shunt; [A]

Avec :

$$I_d = I_s \left[\exp \left(\frac{V_{PV} + (R_s \cdot I_{PV})}{A \cdot V_t} - 1 \right) \right] \quad (1.2)$$

I_s : Le courant de saturation [A]

R_s : La résistance série $[\Omega]$

$V_t = N A_s K T / q$, N_s : nombre de cellule en série

A : coefficient d'idéalité de la diode

T : La température ambiante [K]

V_{PV} : La tension de sortie de PV [v].

On a:

$$I_s = I_{s.n} \left(\frac{T}{T_n} \right)^3 \cdot \left[\frac{q \cdot E_g}{A \cdot K} \left(\frac{1}{T_n} - \frac{1}{T} \right) \right] \quad (1.3)$$

$$I_{s.n} = \frac{I_{cc.n}}{\exp \left(\frac{V_{oc.n}}{A \cdot V_t.n} \right) - 1} \quad (1.4)$$

$I_{s.n}$: Le courant de saturation dans les conditions (STC) (1000w/m^2 ; 25°c) [A]

T_n : La température dans les conditions (STC)

E_g : Energie de Gap de la cellule. (Silicium cristallin $E_g = 1.12 \text{ eV}$, Silicium amorphe $E_g = 1.7 \text{ eV}$,

CIS = 1.03 eV , CdTe = 1.5 eV).

$I_{cc.n}$: Le courant de court-circuit nominal [A]

$V_{oc.n}$: Tension de circuit ouvert nominale [V]

K : Constante de Boltzmann = $1.38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$

q : Charge de l'électron = $1.602 \cdot 10^{-19} \text{ Coulomb}$

On a :

$$I_{sh} = \frac{V_{PV} + I_{PV} R_s}{R_{sh}} \quad (1.5)$$

R_{sh} : La résistance parallèle $[\Omega]$

$$I_{ph} = (I_{ph.n} + K_I \Delta T) \frac{G}{G_n} \quad (1.6)$$

$I_{ph.n}$: Le courant produit dans les conditions (STC) [A]

$\Delta T = T - T_n$ [K]

K_T : Coefficient de température de courant de court circuit

G : Ensoleillement (w/m^2)

G_n : Ensoleillement dans les conditions(STC)

Alors l'équation d'une cellule photovoltaïque peut se mettre comme suit :

$$I = I_{ph} - I_s \left[\exp \left(q \cdot \frac{V_{PV} + R_s \cdot I_{PV}}{A \cdot K \cdot T} - 1 \right) \right] - \frac{V_{PV} + I_{PV} R_s}{R_{sh}} \quad (1.7)$$

1.5. Caractéristiques électriques d'une cellule photovoltaïque

Après un rappel de la physique de la cellule photovoltaïque, cette partie traite de ses caractéristiques électriques principales.

1.5.1. Caractéristiques (courant / tension)

Le courant produit par un module varie conformément aux diagrammes courant/tension.

Il dépend de l'éclairement solaire et de la température des cellules.

Les paramètres sont donnés dans le tableau (1.1) :

Tableau 1.1 Valeurs des paramètres du module photovoltaïque

Puissance nominale [P_{mpp}]	190[W]
Tension nominale [V _{mpp}]	36.14 [V]
Courant nominale [I _{mpp}]	5.26 [A]
Tension en circuit-ouvert Voc [V]	43.66 [V]
Courant de court-circuit I _{cc} [A]	5.7 [A]
Coefficient de température de tension [k _v]	-0.35%
Coefficient de température de courant [k _i]	-0.04%
Coefficient de température de puissance [k _p]	-0.45%
Le nombre de cellule en série N _s	72

La figure (1.8) représente la caractéristique (courant-tension) pour un éclairement $E= 1000\text{W}/\text{m}^2$ et une température de 25°C :

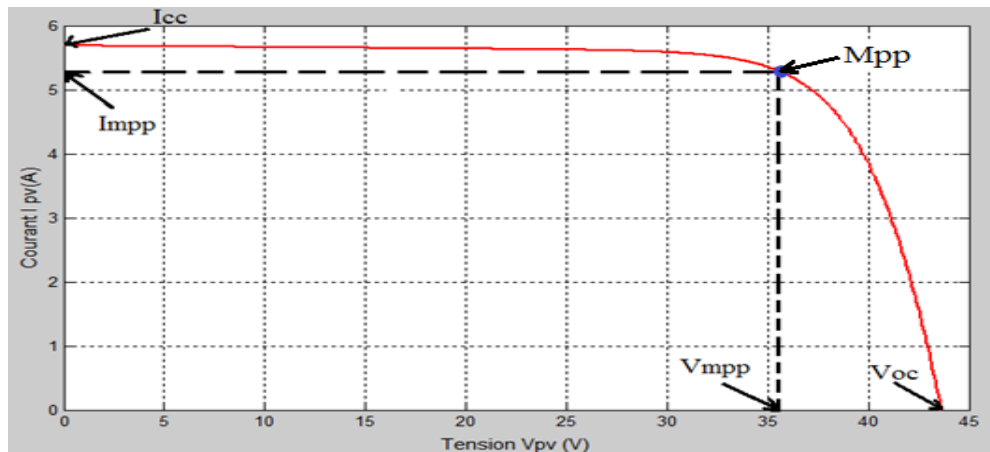


Figure 1.8 Caractéristique (courant-tension) d'un module photovoltaïque pour $G=1000\text{ W}/\text{m}^2$ et $T=25^\circ\text{C}$.

1.5.2. Caractéristiques (puissance / tension)

La puissance délivrée par la cellule a pour expression :

$$P_{PV} = V_{PV} \cdot I_{PV} \quad (1.8)$$

Pour chaque point. On peut calculer la puissance P_{PV} et tracer la courbe $P_{PV} = f(V_{PV})$ qui est représentée sur la figure (1.9).

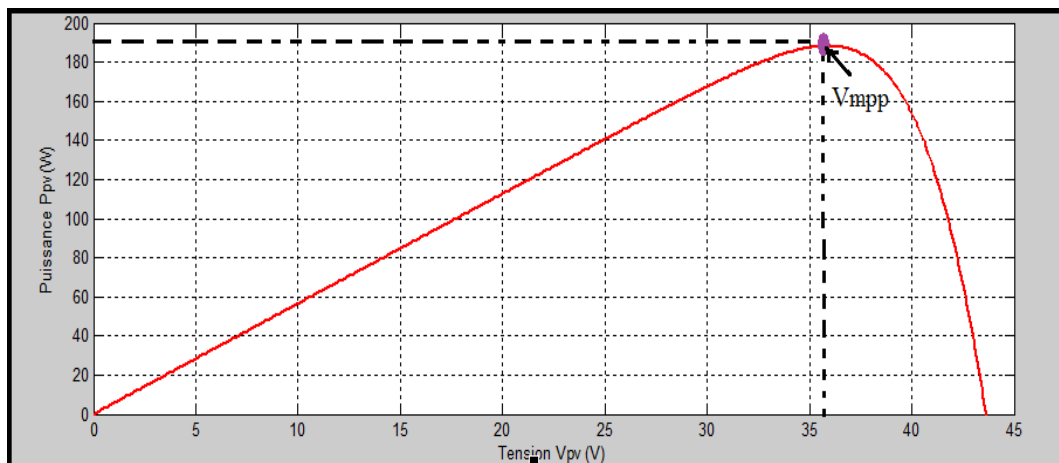


Figure 1.9 Caractéristique (puissance-tension) d'un module photovoltaïque pour $G=1000\text{W}/\text{m}^2$ et $T=25^\circ\text{C}$.

1.6. Grandeurs caractéristiques d'une cellule photovoltaïque

Les caractéristiques d'une cellule solaire photovoltaïque sont caractérisées par un certain nombre de paramètres extraits de la caractéristique courant-tension.

1.6.1. Tension en circuit ouvert V_{co}

C'est la tension mesurée aux bornes de la cellule et pour laquelle le courant débité par la cellule solaire est nul, elle est donnée par la relation :

$$V_{co} = \frac{KT_c}{q} \log \left(\frac{I_{ph}}{I_s} + 1 \right) \quad (1.9)$$

Avec :

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

T_c : est la température absolue

K : Constante de Boltzmann = $1,38 \cdot 10^{-23}$ J/K

q : Constante de charge d'électron, $1,602 \cdot 10^{-19}$ C

I_{ph} : Le courant photonique.

I_s : Le courant de saturation.

1.6.2. Courant de court-circuit I_{cc}

En court-circuit $V=0$:

$$D'où \quad I_{cc} = I_{ph} \quad (1.10)$$

1.6.3. Point de fonctionnement $P_m (V_m, I_m)$

La puissance maximale d'une cellule photovoltaïque éclairée est la grandeur essentielle pour évaluer sa performance ; elle est donnée par la relation :

$$P_m = V_m \cdot I_m \quad (1.11)$$

Elle traduit sur la caractéristique (I, V) le point de fonctionnement $P_m (V_m, I_m)$ qui est situé au coude de la caractéristique I-V et dit point de puissance maximale où les valeurs de tension (V_m) et du courant (I_m) appelées également tension et courant maximums respectivement [8].

1.6.4. Facteur de forme

Le facteur de forme FF indique le degré d'idéalité de la caractéristique correspondant au rapport suivant :

$$FF = \frac{P_m}{V_{co} \cdot I_{cc}} \quad (1.12)$$

Avec :

FF : facteur de forme qui indique le degré d'idéalité de la caractéristique.

P_m : Puissance maximale mesurée dans les conditions de référence (STC).

V_{co} : Tension du circuit correspondant à la tension qui apparaît aux bornes de la cellule quand le courant débite est nul (V).

I_{cc} : Courant de court-circuit correspondant au courant débite par la cellule quand la tension à ses bornes est nulle. (A).

1.6.5. Rendement photovoltaïque

Le rendement énergétique (η) d'une cellule est défini par le rapport entre la puissance maximale (P_m) et la puissance du rayonnement solaire qui arrive sur la cellule photovoltaïque

$$\eta = \frac{P_m}{E \cdot S} \quad (1.13)$$

Avec :

- η : rendement énergétique,
- E : éclairement (W/m^2),
- S : surface active de la cellule (m^2)

1.7. L'influence de la variation des conditions météorologiques sur les caractéristiques d'un module photovoltaïque

1.7.1. L'influence de l'irradiation

Les caractéristiques de figure (1.10) montrent bien la variation du courant du module photovoltaïque ainsi que de la puissance en fonction de la tension pour différents niveaux d'éclairement. On peut voir aussi sur le graphe l'existence de maximum sur les courbes de puissance. Ces points correspondent aux points de puissances maximales lorsque l'irradiation varie pour une température donnée. On peut voir que le courant de court-circuit I_{sc} varie proportionnellement à l'irradiation.

De même, la tension de circuit ouvert V_{oc} (à vide) varie très peu.

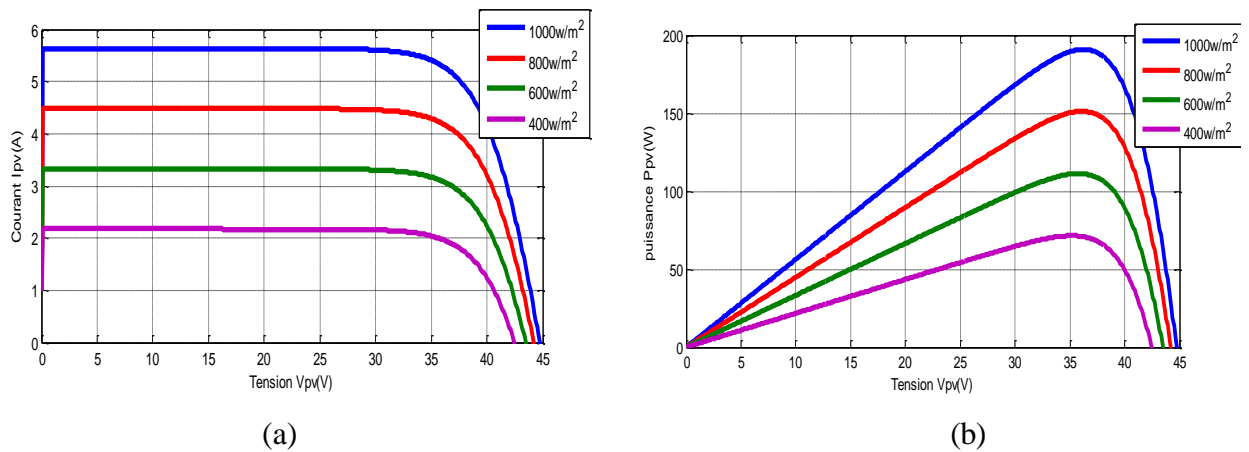


Figure 1.10 (a) Caractéristique $I(V)$ et (b) Caractéristique $P(V)$ d'un module photovoltaïque pour une variation de l'irradiation ($W=400, 600, 800, 1000 \text{ W/m}^2$).

1.7.2. Influence de la température

La figure (1.11) ci-dessous montre que la tension à vide d'un module photovoltaïque diminue avec l'augmentation de la température du module PV. Le courant de court-circuit, par contre, augmente légèrement avec la température du module PV (de la cellule solaire). Ces figures montrent clairement la baisse du rendement causée par l'augmentation de la chaleur sur la cellule. On peut remarquer que l'augmentation de la température se traduit aussi par une diminution de la puissance maximale disponible.

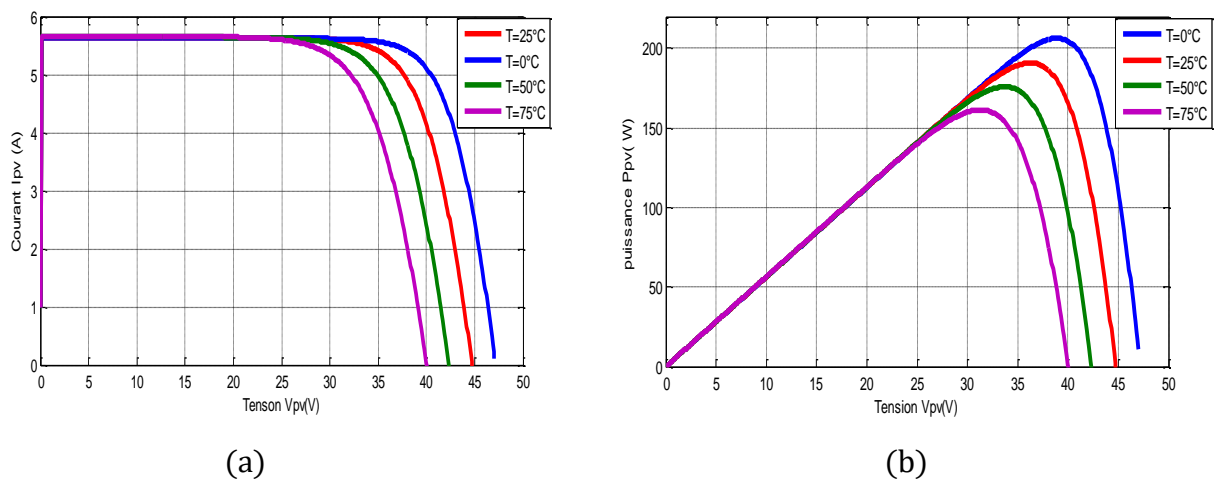


Figure 1.11 (a) Caractéristique $I(V)$ et (b) Caractéristique $P(V)$ d'un module photovoltaïque pour une variation de température ($T_c=0, 25, 50, 75^\circ\text{C}$).

1.7.3. Influence des résistances série et parallèle

Les performances d'une cellule photovoltaïque sont d'autant plus dégradées que la résistance série est grande ou que la résistance shunt est faible. La figure .a montré l'influence de R_s sur la caractéristique $I(V)$. Cette influence est traduite par une diminution de la pente de la courbe la cellule fonctionne comme source de tension. La chute de tension correspondante est liée au courant généré par la cellule. Quant à la R_{sh} est liée directement au processus de fabrication, son influence pour de très faibles valeurs de courant. La figure montre que cette influence se traduit par une augmentation de la pente de la courbe de puissance de la cellule dans la zone correspond à un fonctionnement comme source de courant.

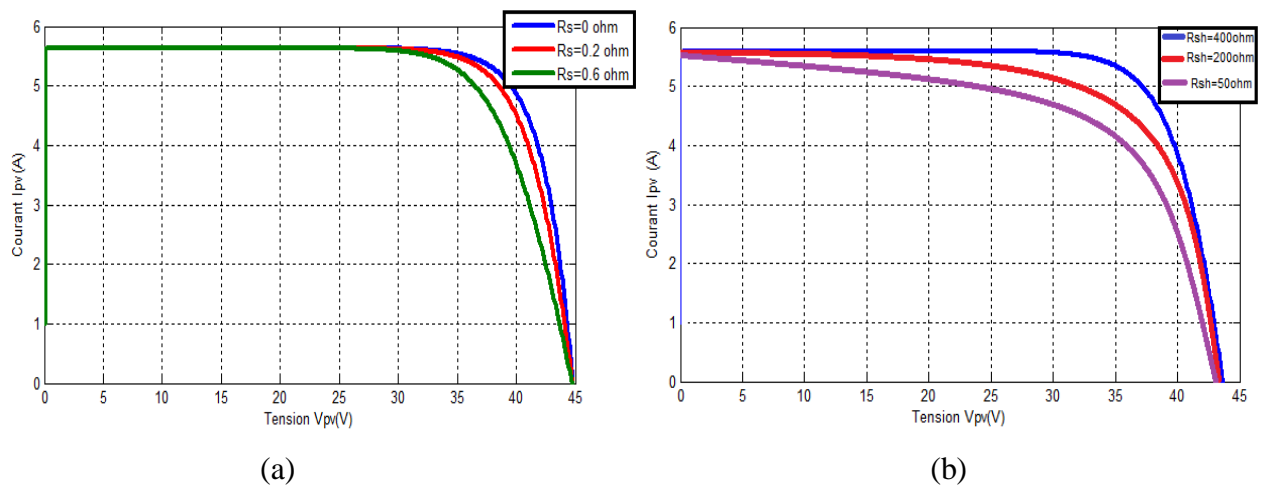


Figure 1.12 (a) influence la résistance parallèle (b) influence la résistance série.

1.8. Modules photovoltaïques

La cellule photovoltaïque élémentaire constitue un générateur électrique de très faible puissance au regard des besoins de la plupart des applications domestiques ou industrielles. En effet, une cellule élémentaire de quelques dizaines de centimètres carrés délivre, au maximum, quelques watts sous une tension très faible, puisqu'il s'agit d'une tension de jonction. Les générateurs photovoltaïques sont, par conséquent, réalisés par association d'un grand nombre de cellules élémentaires.

1.8.1. Association en Série

Une association de (N_s) cellule en série figure (1.13) permet d'augmenter la tension du générateur photovoltaïque. 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. L'équation résume les caractéristique électriques d'une association série de (N_s) cellules [9].

$$V_{CONS} = V_{co} \times N_s \tag{1.14}$$

$$I_{cc} = I_{CCNS} \tag{1.15}$$

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

I_{CCNS} : Courant de court-circuit de N_s cellules en série.

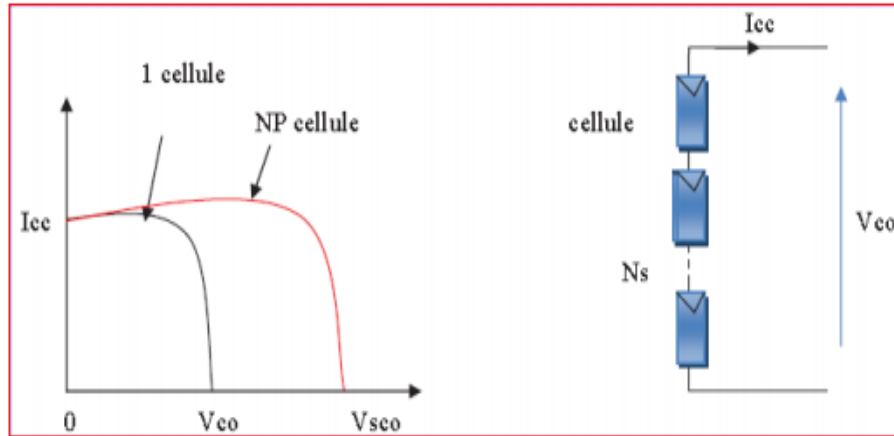


Figure 1.13 Caractéristique courant tension de N_s cellule en série

1.8.2. Association en Parallèle

Une association parallèle de (NP) cellule figure (1.14) 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 résultante du groupement est obtenue par addition des courants [10].

Avec :

$$I_{CCNP} = N_p \times I_{CC} \tag{1.16}$$

$$V_{CO} = V_{CONP} \tag{1.17}$$

I_{CCNP} : La somme des courants de cout circuit de (N_p) cellule en parallèle

V_{CONP} : Tension du circuit ouvert de (N_p) cellules en parallèle

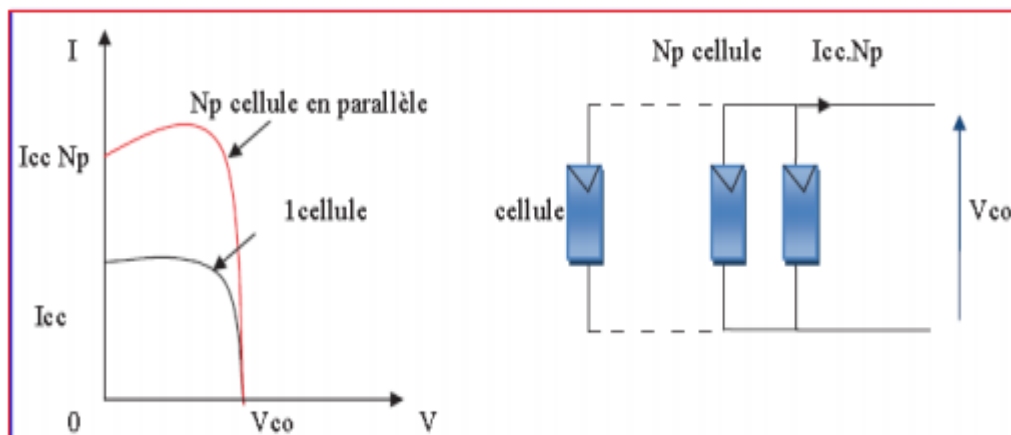


Figure 1.14 Caractéristique courant tension de (N_p) cellule en parallèle

1.8.3. Association série-parallelle

Afin d'obtenir des puissances de quelque kW à quelque MW, sous une tension convenable, il est nécessaire d'associer les modules en panneaux, et de les monter en rangées de panneaux série et parallèle pour former ce que l'on appelle un générateur photovoltaïque ou sous-station

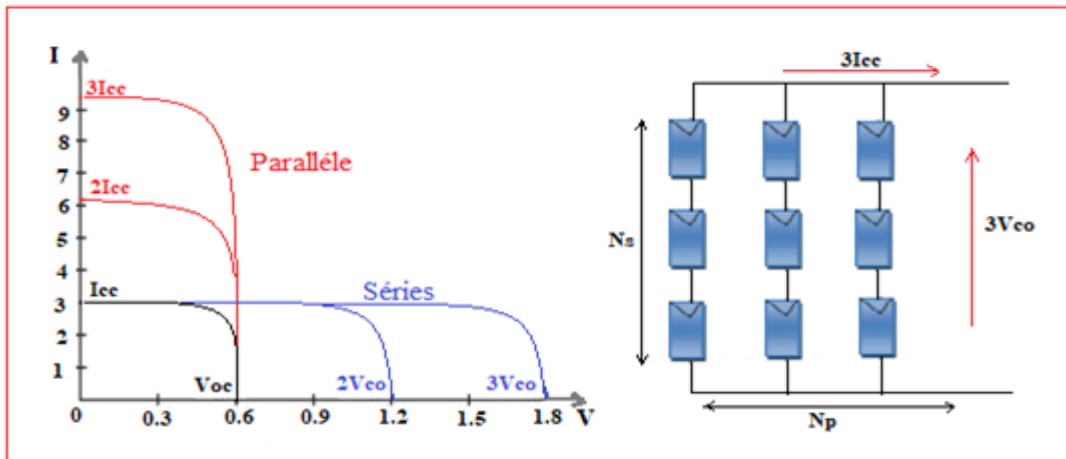


Figure 1.15 Caractéristique courant-tension d'un regroupement série et parallèle des cellules photovoltaïques

1.9. Champ photovoltaïque

Un champ photovoltaïque se compose d'un groupe de panneaux photovoltaïques sont connectés en série. Ils forment alors une chaîne de modules ou string.

Les chaînes sont ensuite associées en parallèle et forment un champ photovoltaïque (champ PV).

La figure suivante représente la constitution d'un champ photovoltaïque [11].

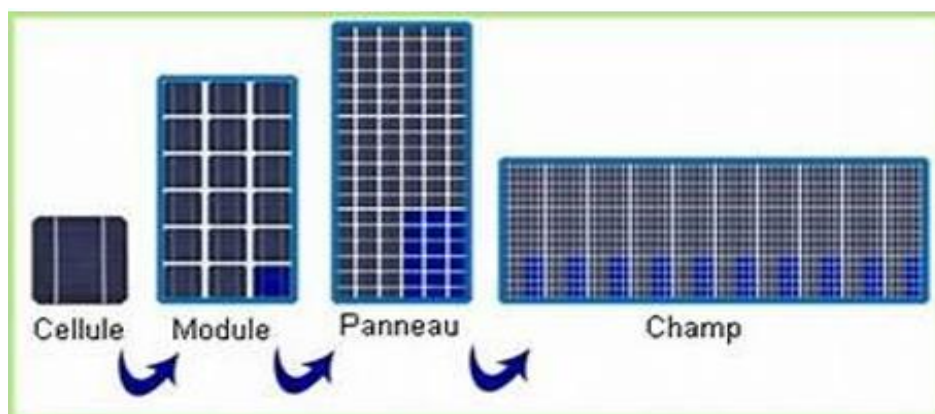


Figure 1.16 Constitution d'un champ photovoltaïque

1.9.1. Circuit équivalent d'un champ photovoltaïque

Un champ photovoltaïque avec N_{pp} panneau en parallèles et N_{ss} panneau en séries est représenté dans la figure

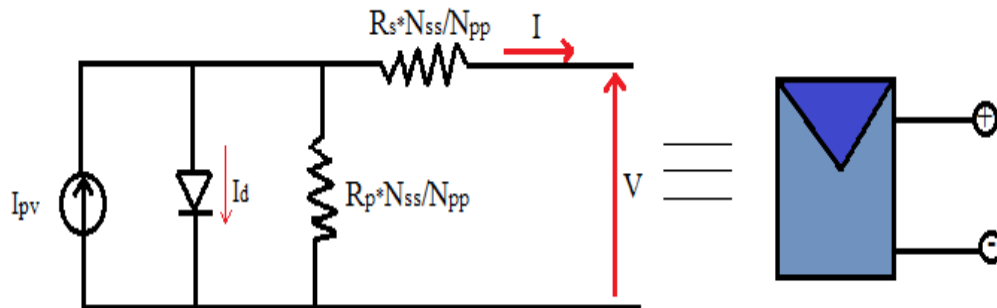


Figure 1.17 Circuit équivalent d'un champ photovoltaïque

Le courant de sortie est alors :

$$I = I_{PV} \times N_{pp} - I_0 \times N_{pp} \left[\exp \left(\frac{V + R_s \times \left(\frac{N_{ss}}{N_{pp}} \right) \times I}{V_t \times a \times N_{ss}} \right) - 1 \right] - \frac{V + R_s \times \left(\frac{N_{ss}}{N_{pp}} \right) \times I}{R_p \times \left(\frac{N_{ss}}{N_{pp}} \right)} \quad (1.18)$$

1.9.2. Différentes structures des systèmes photovoltaïques

On rencontre généralement deux types de systèmes photovoltaïques, les systèmes autonomes, les systèmes et les systèmes connectés à un réseau. Les deux sont indépendants du système de distribution d'électricité, en les retrouvant souvent dans les régions éloignées.

1.9.3. Systèmes autonomes

Ces systèmes photovoltaïques sont installés pour assurer un fonctionnement autonome sans recours à d'autres sources d'énergie. Généralement, ces systèmes sont utilisés dans les régions isolées et éloignées du réseau. Les différents types de systèmes photovoltaïques autonomes ont les possibilités de couplage direct à une charge adaptée ou couplage avec adaptateur d'impédance MPPT (Maximum Power Point Tracking), fonctionnement au fil du soleil ou avec stockage d'énergie électrique. Le couplage direct implique un fonctionnement au fil du soleil, donc à puissance essentiellement variable au cours de la journée. Les charges typiques à courant continu qui peuvent satisfaire le critère (tension constante à puissance variable) sont les accumulateurs électrochimiques. Les charges alternatives sont les pompes à eau, c'est le pompage au fil du soleil, le stockage est néanmoins présent sous la forme d'eau emmagasinée (dans un réservoir). Dans la plus part des cas

une adaptation d'impédance doit être réalisée en insérant entre le générateur et sa charge électrique un dispositif électronique qui permet de forcer le système à fonctionner à sa puissance maximale.

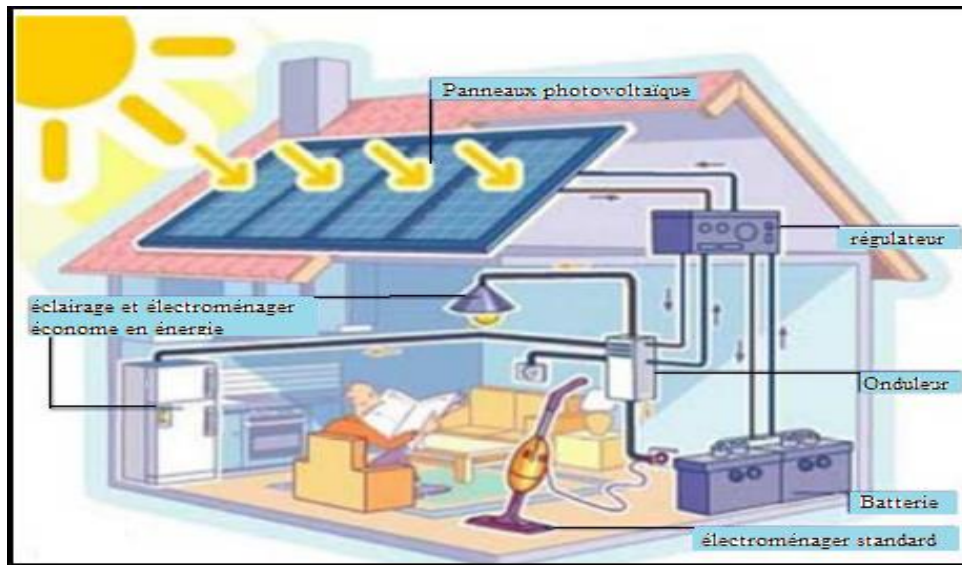


Figure 1.18 Système autonome

1.9.4. Système connecté au réseau

Les systèmes de production d'énergie photovoltaïque connectée à un réseau sont une résultante de la tendance à la décentralisation du réseau électrique. L'énergie est produite plus près des lieux de consommation. Les systèmes connectés à un réseau réduisent la nécessité d'augmenter la capacité des lignes de transmission et de distribution.

Il produit sa propre électricité et achemine son excédent d'énergie vers le réseau, auprès duquel il s'approvisionne au besoin, ces transferts éliminent le besoin d'acheter et d'entretenir une batterie. Il est toujours possible d'utiliser ceux systèmes pour servir d'alimentation d'appoint lorsque survient une panne de réseau. [11]

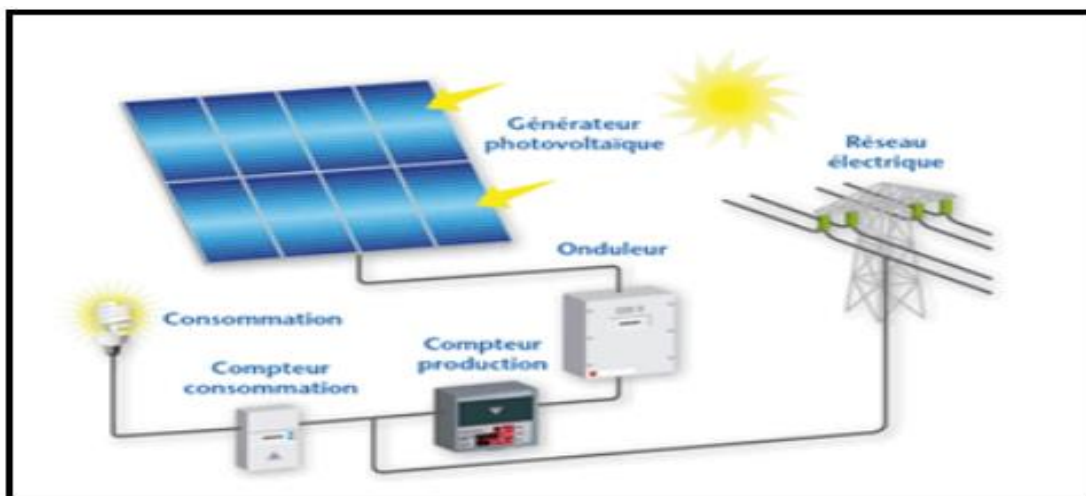


Figure 1.19 Système connecté au réseau

1.9.5. Systèmes hybrides

Les systèmes d'énergie hybride associent au moins deux sources d'énergie renouvelable aussi une ou plusieurs sources d'énergie classiques. Les sources d'énergie renouvelable, comme le photovoltaïque et l'éolienne ne délivrent pas une puissance constante, mais vu leurs complémentarités, leur association permet d'obtenir une production électrique continue. Les systèmes d'énergie hybrides sont généralement autonomes par rapport aux grands réseaux interconnectés et sont souvent utilisés dans les régions isolées. Les différentes sources dans un système hybride peuvent être connectées en deux configurations, architecture à bus continu et architecture à bus alternatif. Dans la première configuration, la puissance fournie par chaque source est centralisée sur un bus continu. Ainsi, les systèmes de conversion d'énergie à courant alternatif (AC) fournissent d'abord leur puissance à un redresseur pour être convertie ensuite en courant continu (CC). Les générateurs sont connectés en série avec l'onduleur pour alimenter les charges alternatives.

L'onduleur doit alimenter les charges alternatives à partir du bus continu et doit suivre la consigne fixée pour l'amplitude et la fréquence. La fonction spécifique du système de supervision est la commande de mise en marche et arrêt des générateurs et du système de stockage. L'avantage de cette topologie est la simplicité de commande. Dans la seconde configuration tous les composants du système hybride sont reliés à la charge alternative.

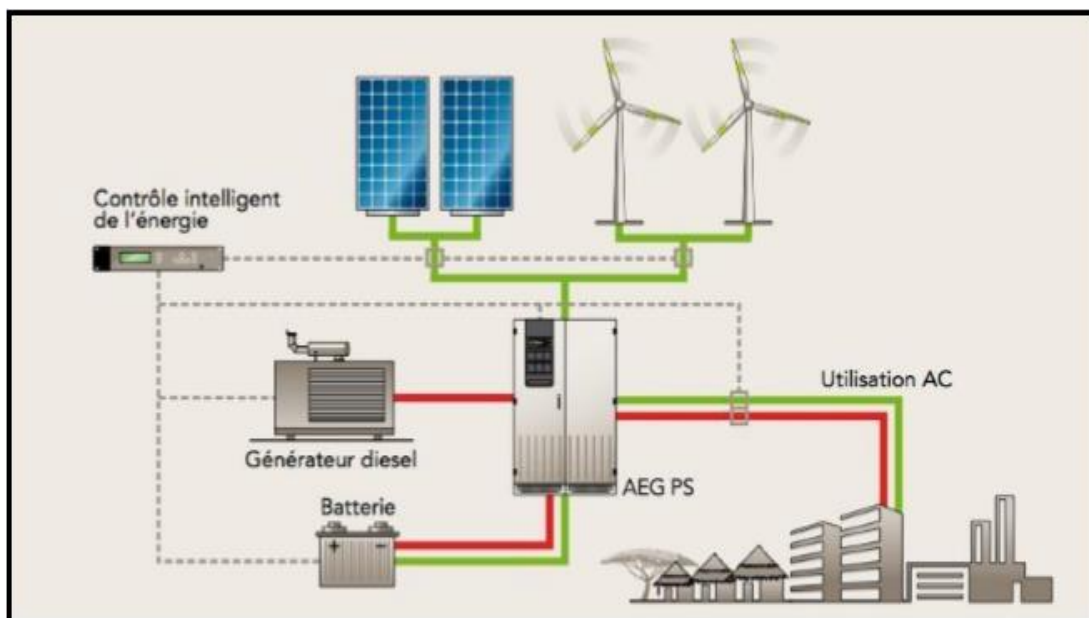


Figure 1.20 Système hybride

1.10. Avantages et inconvénients de l'énergie solaire photovoltaïque

1.10.1. Avantages

- Conversion directe de l'énergie solaire gratuite et inépuisable en électricité [12].
- Absence de bruit, de pollution et d'émissions.
- Maintenance réduite (pas de pièces en mouvement ; durée de vie des modules = 20 ans).
- Rentabilité assurée pour les applications de faible puissance (moins de 3–5 kWh/jour).
- Possibilité d'adaptation de la taille de l'installation aux besoins existants, avec possibilité d'extension à la demande, au fur et à mesure que le besoin énergétique augmente.
- Le risque de choc électrique est réduit en 12 ou 24 Vcc et le risque d'incendie est moindre qu'avec les groupes électrogènes alimentés au kérosène ou au fuel.

1.10.2. Inconvénients

- Le cout d'investissement des panneaux photovoltaïques est élevé.
- Production d'énergie qui dépend de l'ensoleillement, toujours variable.
- Le faible rendement de conversion de module.
- Lorsque le stockage de l'énergie électrique par des batteries est nécessaire, le cout du système photovoltaïque augmente.
- Pollution à la fabrication.

1.11. Conclusion

Dans ce chapitre, nous nous intéressons aux composants des cellules solaires et avons traité des types les plus importants qui existent et du principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque. En plus d'étudier son schéma équivalent. Puis nous avons regardé les différents paramètres du circuit équivalent qui permettent de tracer la caractéristique $I(V)$ et $P(V)$ d'un Photocellule et photo générateur. Nous avons remarqué comment les performances du GPV sont fortement influencées par les conditions météorologiques (Température, éclairage). Nous avons également vu l'effet des associations des panneaux solaires, en parallèle ou en série, sur la tension et le courant produits.

Chapitre 02

CONVERTISSEUR DC-DC

2.1. Introduction

Avec une tension alternative, un simple transformateur permet de changer la tension d'un niveau à un autre niveau. Mais dans le cas d'une tension continue, on doit avoir recours à une approche bien différente, en utilisant un convertisseur dc-dc [13].

Les convertisseurs de type dc-dc convertissent un niveau de tension, à un autre niveau par action de commutation. Ils ont un très grand domaine d'application. Ils sont largement utilisés dans les ordinateurs personnels, des périphériques informatiques et adaptateurs d'appareils électroniques pour fournir des tensions continues [14].

Il existe plusieurs topologies de circuit de convertisseur dc-dc, telles que le hacheur abaisseur (Buck), hacheur élévateur (Boost), hacheur abaisseur élévateur (Buck-Boost) ou hacheurs à de résonance [15].

On distingue aussi entre les hacheurs à deux niveaux et les hacheurs multiniveaux.

2.2. Définition

Le hacheur est un dispositif de l'électronique de puissance, mettant en œuvre un ou plusieurs interrupteurs électroniques commandés ce qui permet de modifier la valeur de la tension moyenne d'une source de tension continue avec un rendement élevé. Le découpage se fait à une fréquence élevée afin de pouvoir filtrer facilement le signal de sortie [16].

Les hacheurs permettent d'abaisser ou élever une tension continue avec de très faibles pertes. Par conséquent ils ont un très bon rendement, peu d'énergie à dissiper par le transistor.

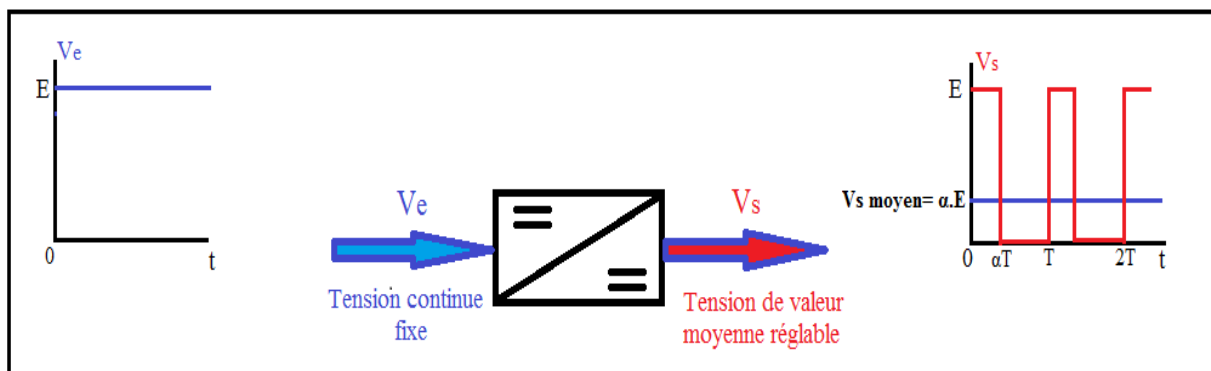


Figure 2.1 Symbole et signaux du convertisseur dc-dc.

2.3. Type des hacheurs

On distingue plusieurs types des hacheurs parmi lesquelles :

2.3.1. Hacheur abaisseur « Buck »

2.3.1.1. Définition

Un hacheur abaisseur ou hacheur série est une alimentation à découpage qui convertit une tension continue en une autre tension continue de plus faible valeur, ce type de convertisseur est utilisé pour des applications que l'on peut classer en deux catégories :

- Les applications visant à obtenir une tension continue fixe (et parfois régulée) à partir d'un générateur de tension continue supérieure.
- Les applications permettant d'obtenir une tension réglable mais toujours inférieure à celle présente à l'entrée [17].

2.3.1.2. Schéma du hacheur abaisseur

Le schéma d'un hacheur abaisseur est indiqué à la figure (2.2). Le commutateur Q peut être un transistor MOSFET ou un IGBT qui peut se commuter sur deux positions, marche ou arrêt rapidement.

La tension de la source V_e doit être plus grande que la tension aux bornes de la charge V_s .

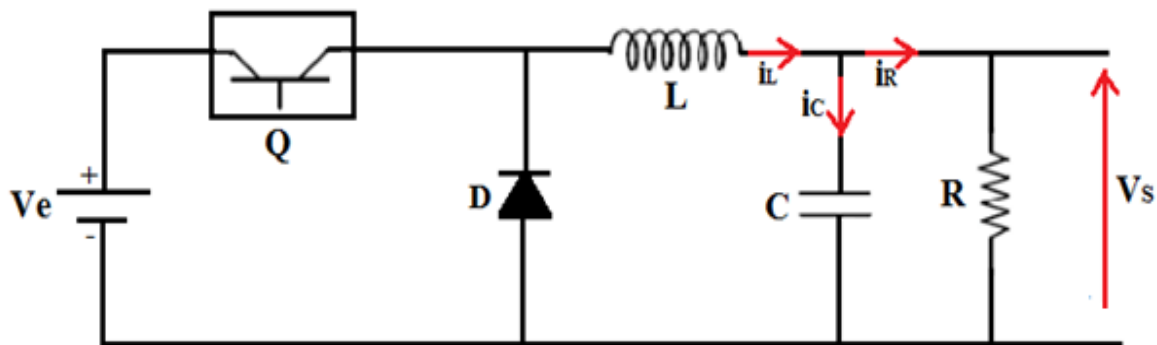


Figure 2.2 Schéma électronique de convertisseur abaisseur « Buck »

2.3.1.3. Phases de fonctionnement

Ce convertisseur a deux phases de fonctionnement :

- **Phase 1, Q fermé** : Si le commutateur Q est activé à t_0 , un courant circule dans le circuit, mais ne passe pas par la diode D puisqu'elle est inversement polarisée. Le courant i_L n'augmente pas immédiatement, mais plutôt linéairement avec un taux d'accroissement imposé par l'inductance L.

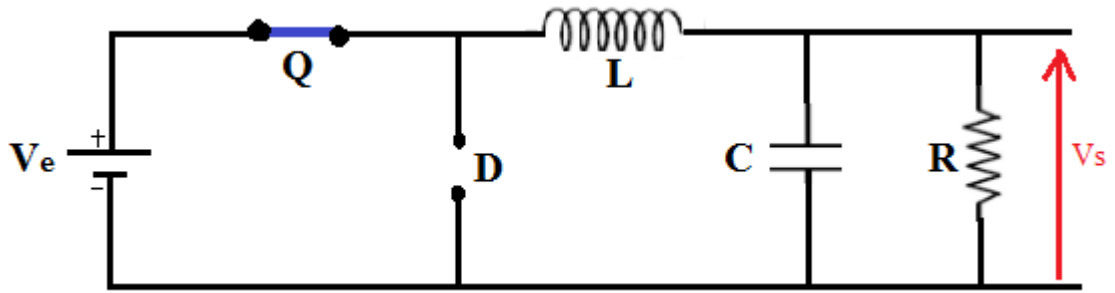


Figure 2.3 Convertisseur Buck durant l'état On

Durant cette phase, on a :

Les équations des tensions des interrupteurs : $V_T = 0$ et $V_D = V_e$

L'équation de tension aux bornes de l'inductance:

$$V_L = V_e - V_s = L \frac{di}{dt} > 0 \tag{2.1}$$

Par intégration de l'équation, on peut on déduit le courant I_L :

$$I_L = \frac{V_e - V_s}{L} t + I_{min} \tag{2.2}$$

Durant cette phase, l'inductance emmagasine de l'énergie sous forme magnétique

Phase 2, Q ouvert : Si Q est désactivé à $t = t_1$, la charge est déconnectée de son alimentation. Le courant est toutefois maintenu par l'énergie stockée dans l'inductance L et circule à travers la diode D appelée diode de roue libre. Cette dernière permet d'évacuer l'énergie emmagasinée dans l'inductance à l'ouverture du commutateur sans créer de surtension.

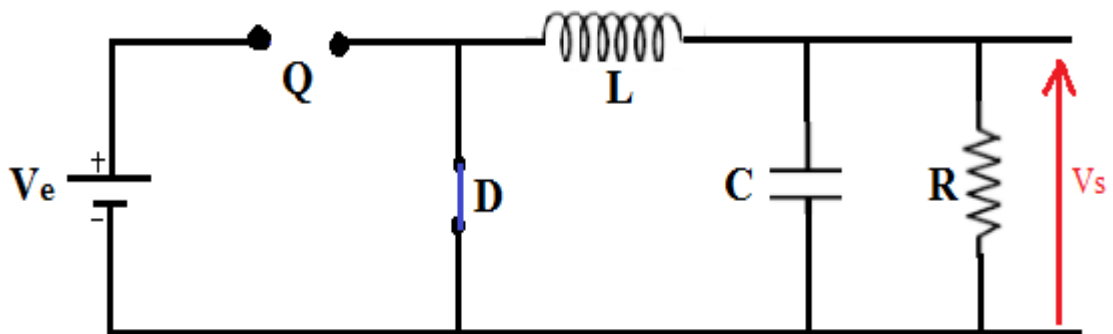


Figure 2.4 Convertisseur Buck durant l'état Off

Durant cette phase, on a :

Les équations des tensions des interrupteurs : $V_D = 0$ et $V_T = V_e$

L'équation de tension aux bornes de l'inductance:

$$V_L = -V_s = L \frac{di}{dt} < 0 \tag{2.3}$$

Par intégration de l'équation, on peut on déduit le courant I_L :

$$I_L = \frac{-V_s}{L} t + I_{\max} \tag{2.4}$$

Remarque : les composants du convertisseur sont dimensionnés pour que les tensions et courants à la sortie présentent de faibles ondulations lors du passage de l'interrupteur de la fermeture à l'ouverture et inversement [18]. Quoiqu'il en soit, la valeur moyenne V_s est inférieure à V_e . Dans le cas où la fréquence est augmentée, par exemple jusqu'aux kHz, l'inductance nécessaire peut être réduite considérablement. La tension aux bornes de la charge est donnée par :

$$V_s = \frac{T_{on}}{T} V_e = \alpha V_e \tag{2.5}$$

T_{ON} est la durée de la phase de fermeture de l'interrupteur.

Les formes des tensions et des courants d'un hacheur abaisseur dans le cas de la conduction continue sont indiquées sur la (figure2.5)

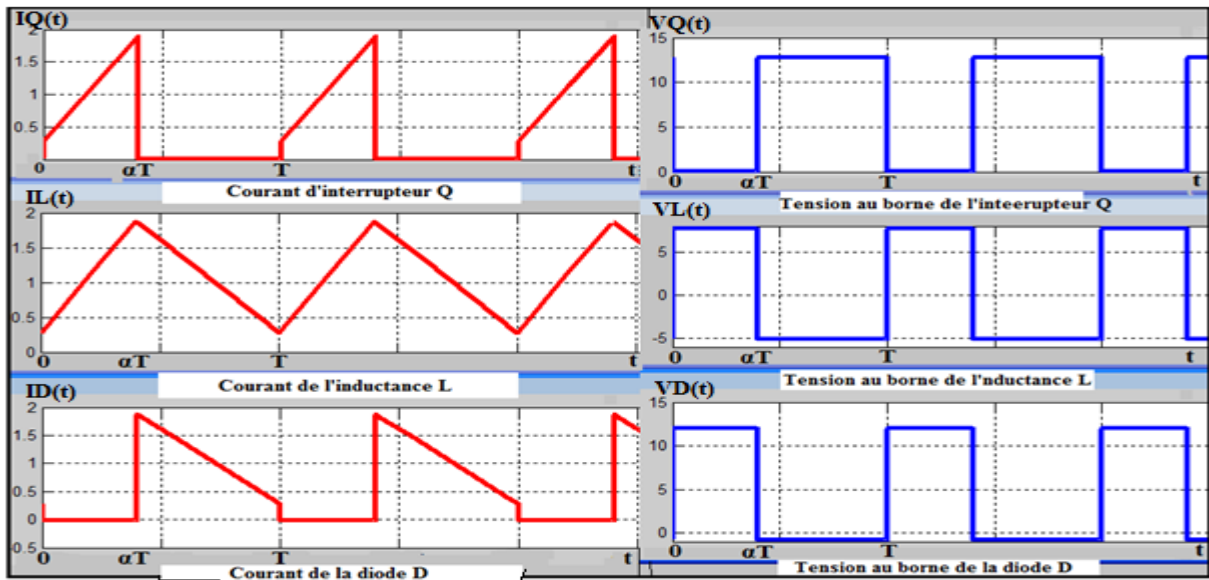


Figure 2.5 Formes d'onde des Courants et des Tensions d'un convertisseur abaisseur

2.3.2. Hacheur élévateur « Boost »

2.3.2.1. Définition

Un hacheur parallèle, est une alimentation à découpage qui convertit une tension continue en une autre tension continue de plus forte valeur .On utilise un hacheur élévateur lorsqu'on désire augmenter la tension disponible d'une source continue [17].

2.3.2.2. Schéma d'un hacheur élévateur

La figure (2.6) indique le schéma d'un hacheur élévateur.

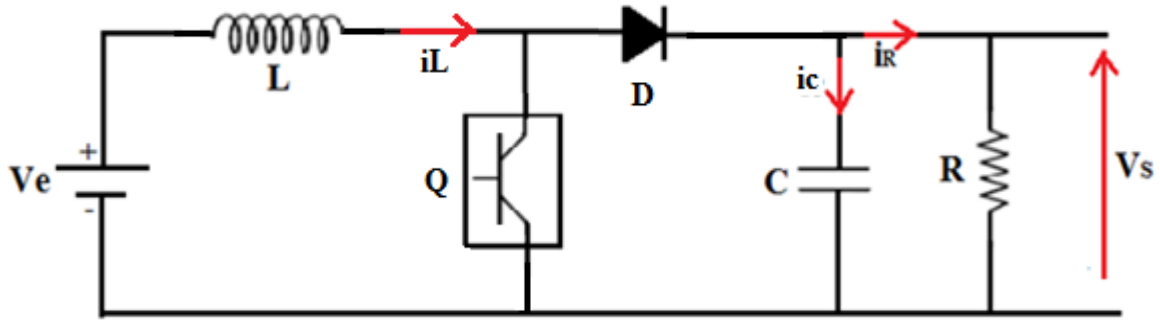


Figure 2.6 Schéma de convertisseur Boost

2.3.2.3. Phases de fonctionnement

Ce convertisseur a deux phases de fonctionnement :

Phase 1, Q fermé: (phase d'accumulation d'énergie), figure (2.7)

L'interrupteur Q est fermé (Q=1)), cela entraîne l'augmentation du courant dans l'inductance, donc le stockage d'une quantité d'énergie sous forme d'énergie magnétique. La diode D est alors bloquée et la charge est alors déconnectée de l'alimentation.

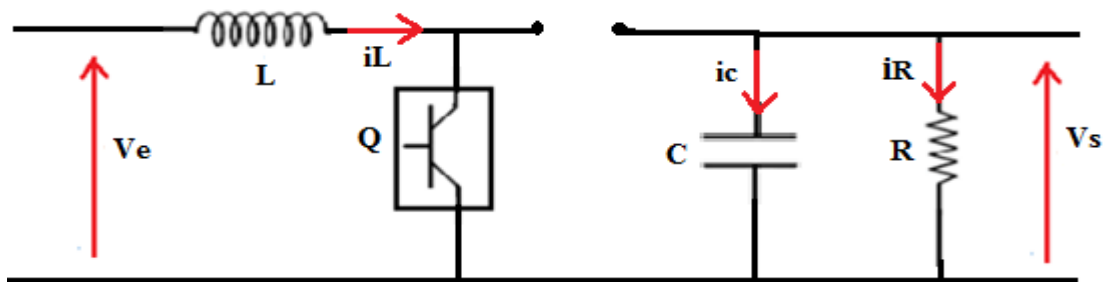


Figure 2.7 Schéma équivalent de la phase 1

Durant l'état passant, la tension de l'inductance est donnée par :

$$V_e = L \frac{di}{dt} \tag{2.6}$$

Par intégration, on déduit le courant i_L :

$$i_L = \int \frac{V_e}{L} dt \tag{2.7}$$

$$i_L = \frac{\alpha V_e}{L} t \tag{2.8}$$

α étant le rapport cyclique. . Il représente la durée de la période T pendant laquelle l'interrupteur Q conduit.

Phase 2, Q ouvert, figure (2.8)

Lorsque l'interrupteur Q est ouvert, l'inductance se trouve alors en série avec le générateur et sa f.é.m. s'additionne à celle du générateur (effet survolteur). Le courant traversant l'inductance traverse ensuite la diode, le condensateur et la charge. Il en résulte un transfert de l'énergie

accumulée dans l'inductance vers la capacité.

L'équation de tension

$$V_e - V_s = L \frac{di}{dt} \quad (2.9)$$

Le courant se déduit par intégration :

$$i_{2L} = \int \frac{V_e - V_s}{L} dt \quad (2.10)$$

$$i_{2L} = \frac{(\alpha - 1)(V_e - V_s)}{L} t \quad (2.11)$$

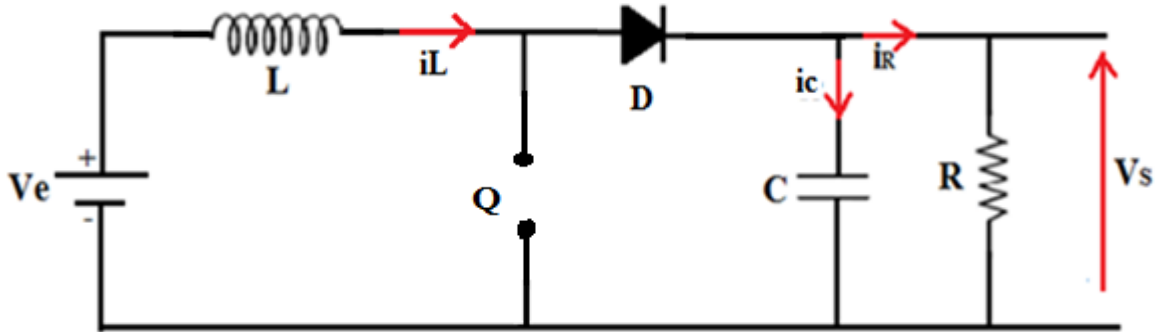


Figure 2.8 Circuit équivalent pour T_{Off}

La variation du courant traversant l'inductance est le même au début et à la fin de chaque cycle de commutation. Ce qui peut s'écrire de la façon suivante :

$$i_{off} + i_{on} = 0 \quad (2.12)$$

En remplaçant i_{on} et i_{off} par leurs expressions, on obtient :

$$\frac{\alpha V_e}{L} t + \frac{(\alpha - 1)(V_e - V_s)}{L} t = 0 \quad (2.13)$$

Ce qui peut se réécrire de la façon suivante :

$$\frac{V_s}{V_e} = \frac{1}{1 - \alpha} \quad (2.14)$$

On peut faire varier la tension de sortie du convertisseur en changeant la valeur du rapport cyclique α .

Nous pouvons exprimer la tension et courant de sortie en régime établi selon :

$$V_s = \frac{V_e}{1 - \alpha} \quad (2.16)$$

$$I_s = (1 - \alpha) I_e \quad (2.17)$$

Les allures de tension et du courant du hacheur élévateur sont décrites par la figure suivante :

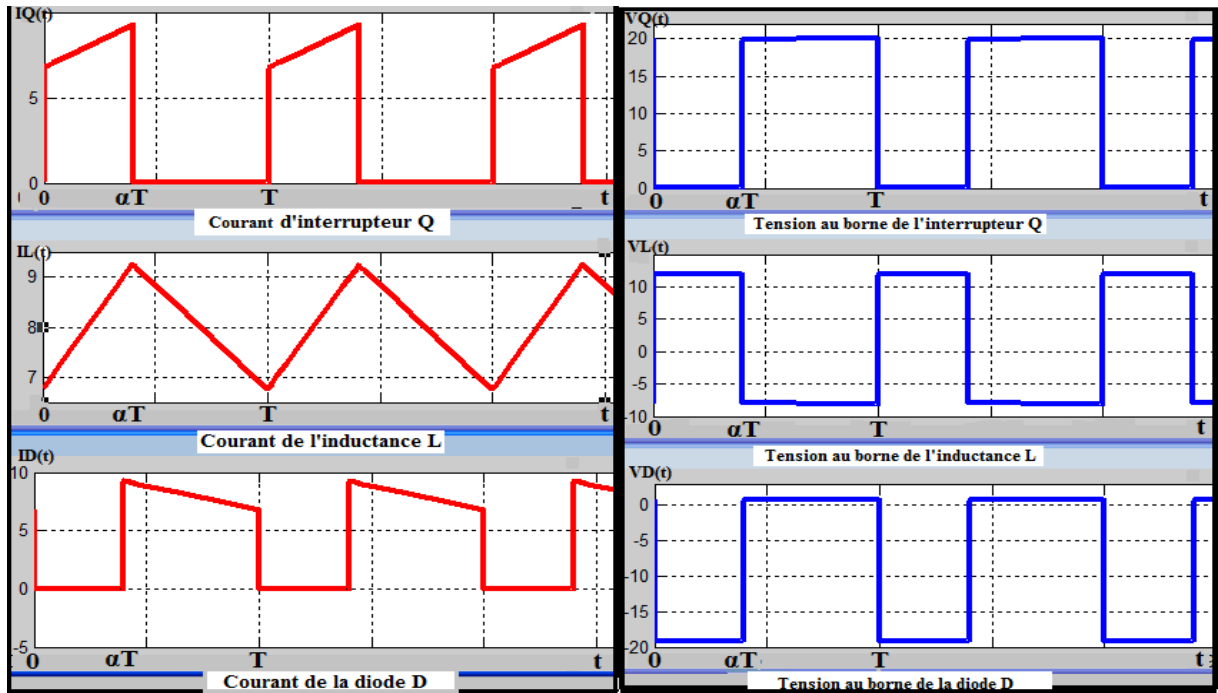


Figure 2.9 Formes d'onde des courants et des tensions d'un convertisseur boost

2.3.3. Hacheur abaisseur-élevateur «Buck- Boost»

2.3.3.1. Définition

Un hacheur abaisseur élevéateur est une alimentation à découpage qui convertit une tension continue en une autre tension continue de plus faible ou plus grande valeur mais de polarité inverse. Un inconvénient de ce convertisseur est que son interrupteur ne possède pas de borne reliée à la masse, compliquant ainsi sa commande [17].

2.3.3.2. Schéma du hacheur abaisseur-élevateur

La figure 2.10 indique le schéma d'un hacheur abaisseur élevéateur

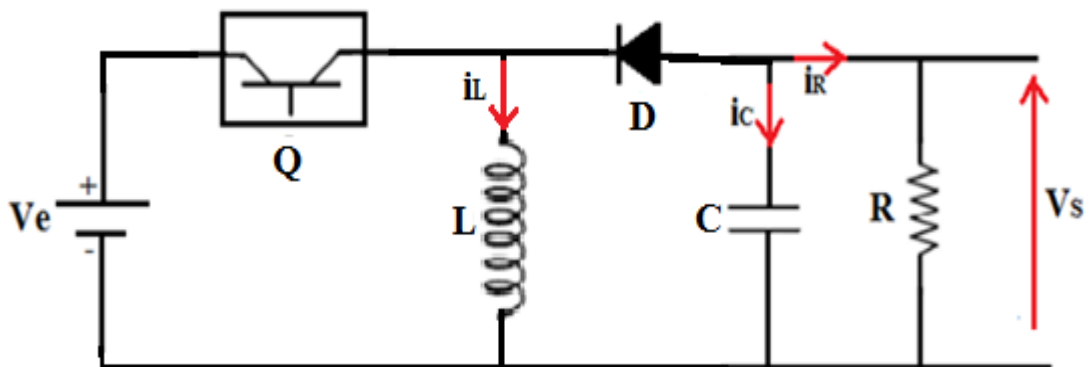


Figure 2.10 Schéma de convertisseur inverseur Buck-Boost

2.3.3.3. Phases de fonctionnement

Il a deux phases de fonctionnement

- **Phase 1, Q fermé**, figure (2.11): L'interrupteur Q est conducteur pendant le temps $T_{on} = \alpha T$, l'énergie est stockée dans l'inductance L et la tension de sortie est négative par rapport au point commun : la diode D est alors bloquée.

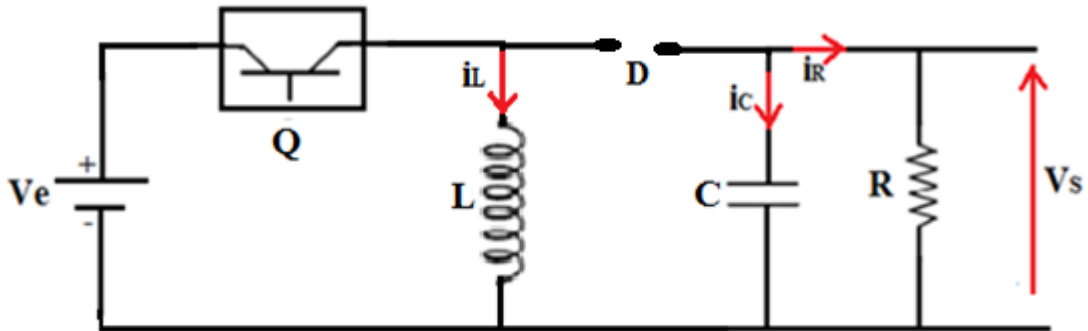


Figure 2.11 Convertisseur Buck-Boost Durant l'état On

Les tensions des interrupteurs : $V_T = 0$ et $V_D = -V_e - V_e$

La tension aux bornes de l'inductance:

$$V_L = V_e = L \frac{di}{dt} > 0 \quad (2.18)$$

Le courant se déduit par intégration

$$i_L = \frac{V_e}{L} t + I_{min} \quad (2.19)$$

Phase 2, Q ouvert, figure (2.12) : Le blocage de l'interrupteur Q provoque la décharge de l'inductance dans la charge R et le condensateur C. Cette décharge peut être totale ou partielle.

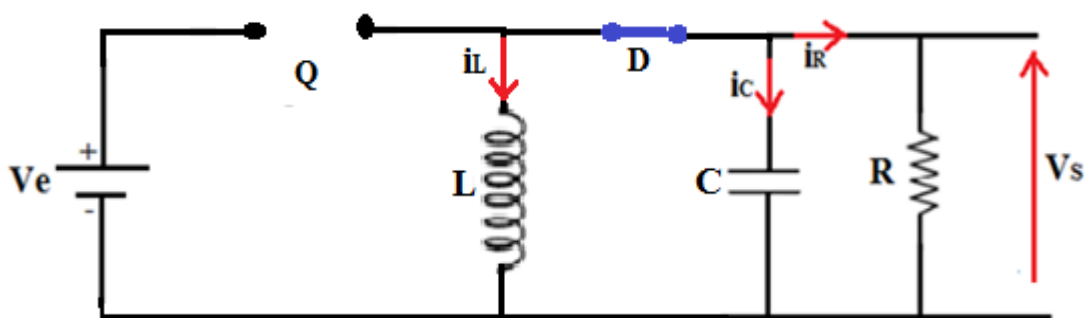


Figure 2.12 Convertisseur Buck-Boost Durant l'état Off

Les tensions des interrupteurs : $V_D = 0$ et $V_T = V_e + V_s$

La tension aux bornes de l'inductance:

$$V_L = -V_s = L \frac{di}{dt} < 0 \quad (2.20)$$

Le courant se déduit par intégration :

$$i_L = \frac{-V_S}{t} + I_{max} \tag{2.21}$$

En présence de la diode D, le courant circule à travers l'inductance L seulement dans une direction durant les deux phases. Par conséquent, V_S a une polarité opposée à V_e . Pour cette raison, ce circuit Est aussi appelé convertisseur inverseur. Les équations décrivant ce circuit peuvent être obtenues de la même manière qu'auparavant.

-l'amplitude de V_S peut être inférieure ou supérieure à V_e suivant la valeur de T_{On} et T_{Off} :

$$V_S = \frac{T_{On}}{T_{Off}} V_e = \frac{\alpha}{(1-\alpha)} V_e \tag{2.22}$$

Les allures des tensions et des courants du hacheur abaisseur élévateur sont indiquées à la figure (2.13)

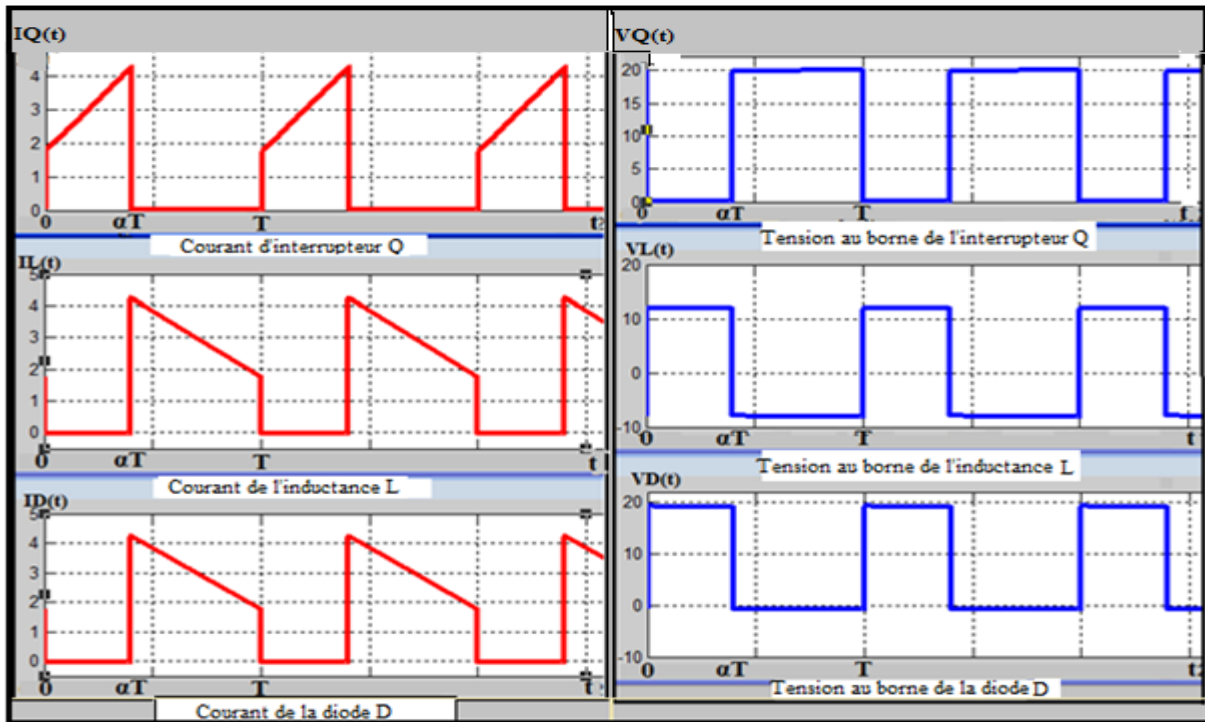


Figure 2.13 Formes d'onde des courants et des tensions d'un convertisseur Buck-Boost

2.4. Commande par modulation de largeur d'impulsion (MLI) des hacheurs

L'électronique de régulation et commande détermine, à partir des consignes imposées de l'extérieur et des mesures prélevées sur le générateur et la charge, la séquence de conduction et de blocage de l'interrupteur et élabore les signaux logiques nécessaires à sa commande en fonction du type de convertisseur utilisé.

Dans le cas de la commande MLI, on fait varier l'état de l'interrupteur à une cadence qui ne dépend pas de la manière dont évoluent les grandeurs relatives aux systèmes interconnectés par le

convertisseur électronique de puissance, cette cadence étant fixée essentiellement en fonction de la vitesse de commutation de l'interrupteur. [19]

La commande par modulation en largeur d'impulsions ou commande MLI consiste à choisir une fréquence de commutation pour l'interrupteur et à fixer à l'intérieur de la période de commutation les intervalles de conduction des interrupteurs connectés à une borne de la source en fonction d'un signal de référence qui correspond au potentiel souhaité pour cette borne.

2.4.1. Cas d'un hacheur abaisseur

Pour le hacheur abaisseur, figure (2.14), en considérant une source de tension parfaite et les interrupteurs électroniques parfaits, la tension de sortie $v(t)$ constitue une image amplifiée du signal de commande $s(t)$ en conduction continue :

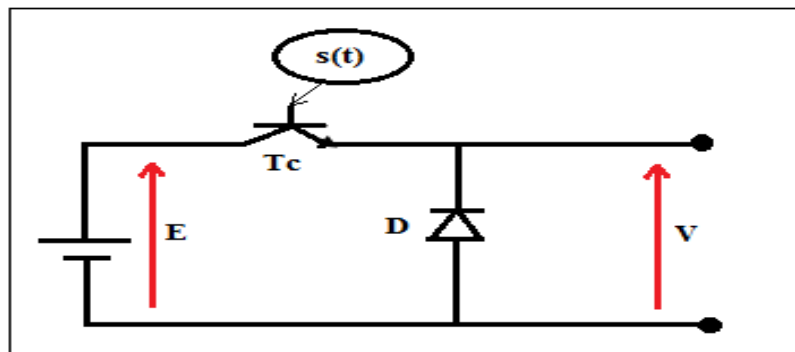


Figure 2.14 Structure du hacheur série (Buck)

$$V(t) = E.s(t) \quad (2.23)$$

2.4.2. Principe de la modulation

Par comparaison d'un signal de référence d'amplitude d ($d < 1$) à une porteuse triangulaire d'amplitude égale à l'unité figure (2.15), nous obtenons la fonction de modulation $u(t)$ qui est complètement définie à l'aide de deux paramètres qui sont :

- La période T : Elle correspond à la période de la porteuse.
- Le rapport cyclique d : Généralement, il est considéré constant entre 0 et 1, ce qui correspond à un signal de référence fixe d'amplitude égale à d .

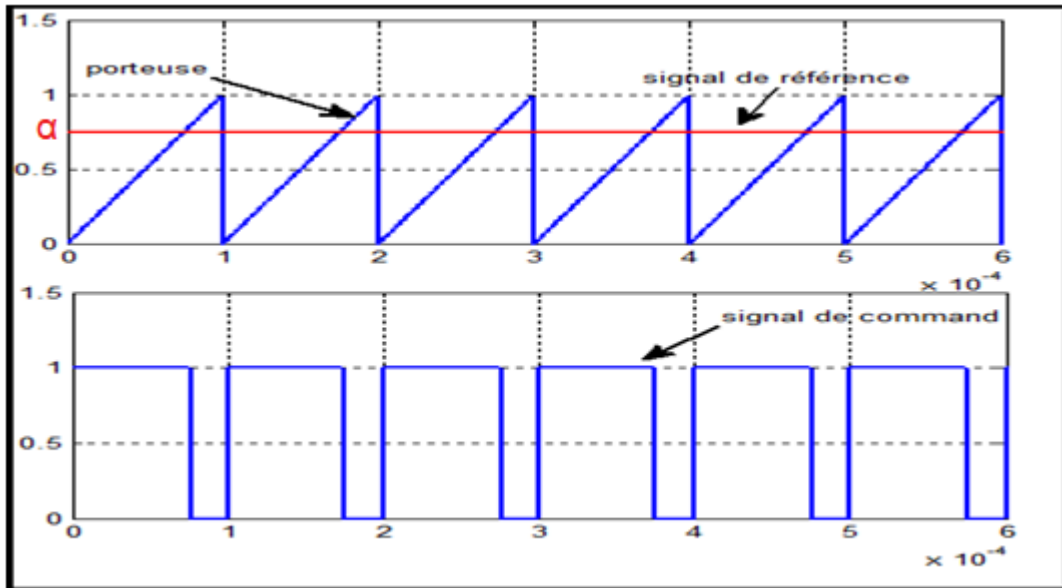


Figure 2.15 Principe du command en MLI d'un hacheur

2.4.3. Schéma du hacheur et de sa commande

La figure (2.16) indique un hacheur abaisseur à IGBT alimentant une charge résistive, commandé en MLI. Le signal de commande est obtenu par comparaison d'une porteuse en dent de scie à une référence fixe.

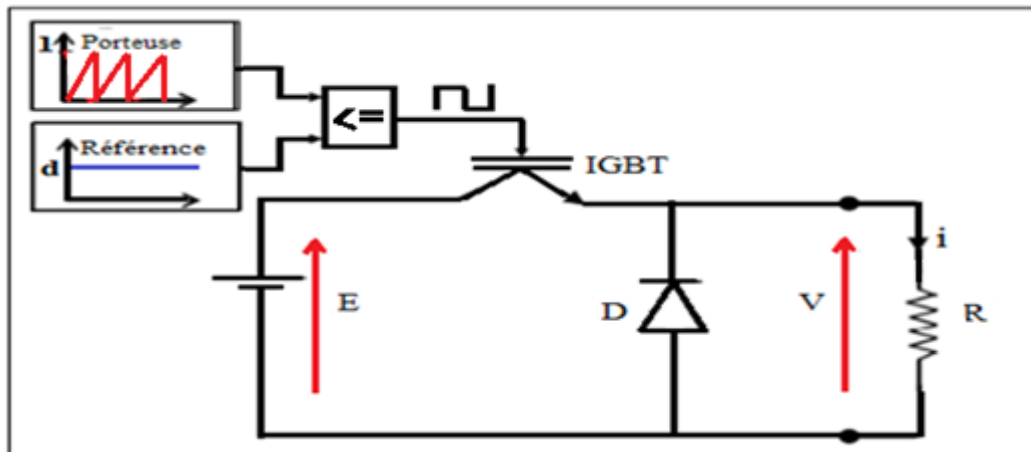


Figure 2.16 Montage du hacheur abaisseur et de sa commande

2.4.4. Schéma Simulink

La figure (2.17) indique le schéma de simulation. Il montre l'interrupteur S_1 et la diode D , une inductance L , un condensateur de filtrage capacitif C et une charge résistive R .

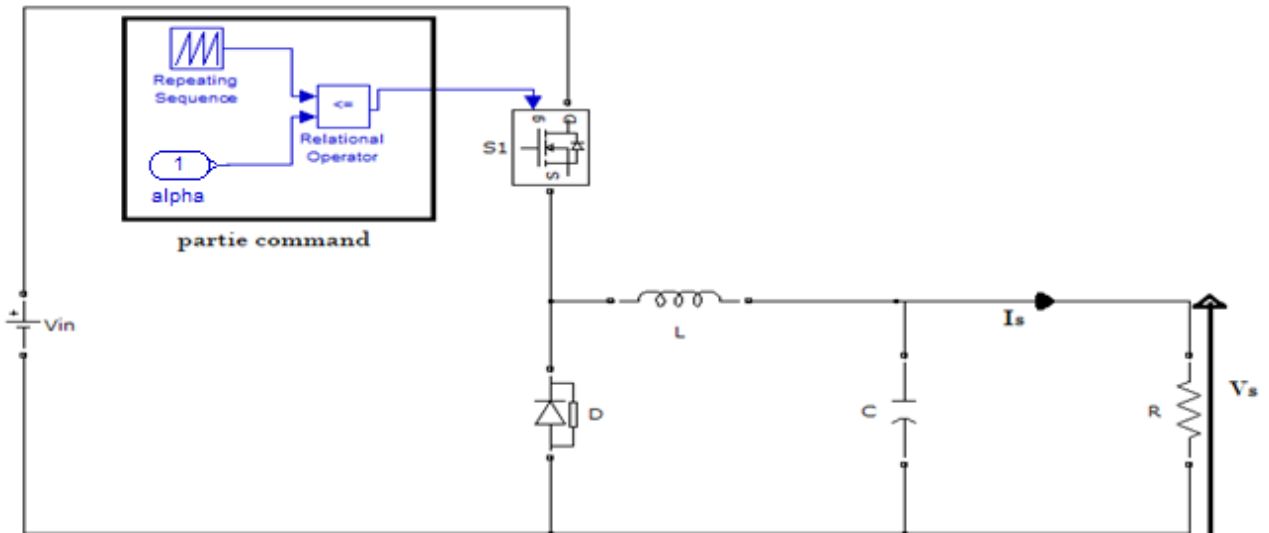


Figure 2.17 schéma de simulation d'un hacheur deux niveaux et sa commande.

2.4.5. Résultats de simulation

On simule le fonctionnement du hacheur à deux niveaux commande en MLI. Les paramètres du modèle sont les suivantes :

$$V_{in} = 25V, R = 3\Omega, C = 0.005f, C_1 = 0.008 f$$

On simule le modèle pour trois valeurs distinctes du rapport cyclique : $\alpha = 0.25$, $\alpha = 0.5$ et $\alpha = 0.75$.

Cas où $\alpha = 0.25$:

On présente les résultats de simulation sur les figures (2.18) à (2.20)

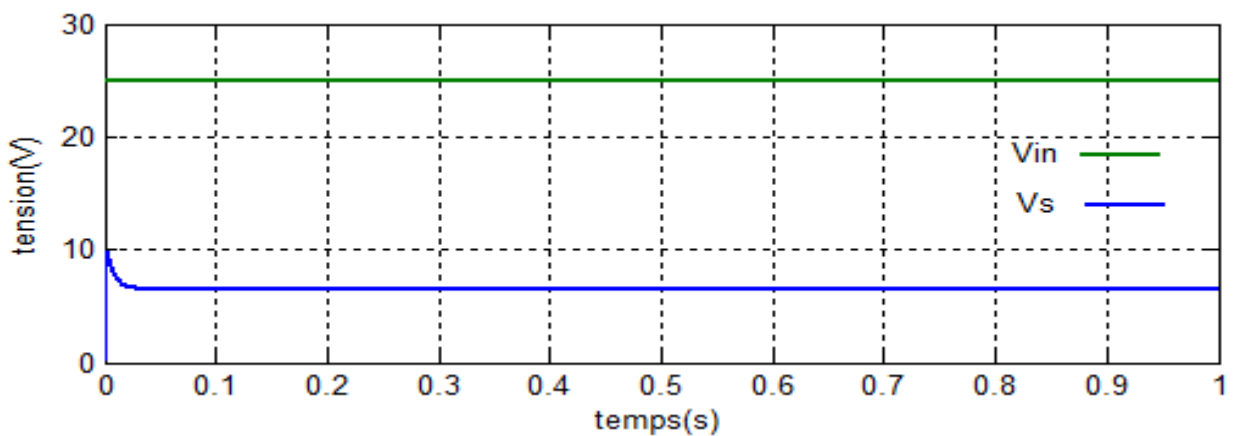


Figure 2.18 Allure de tension de charge ($\alpha=0.25$)

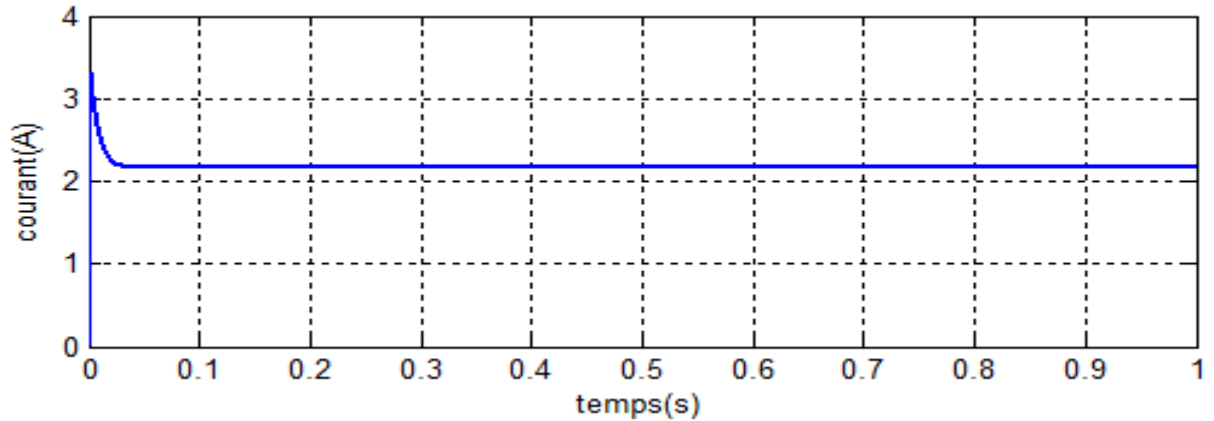


Figure 2.19 Courant de charge ($\alpha=0.25$)

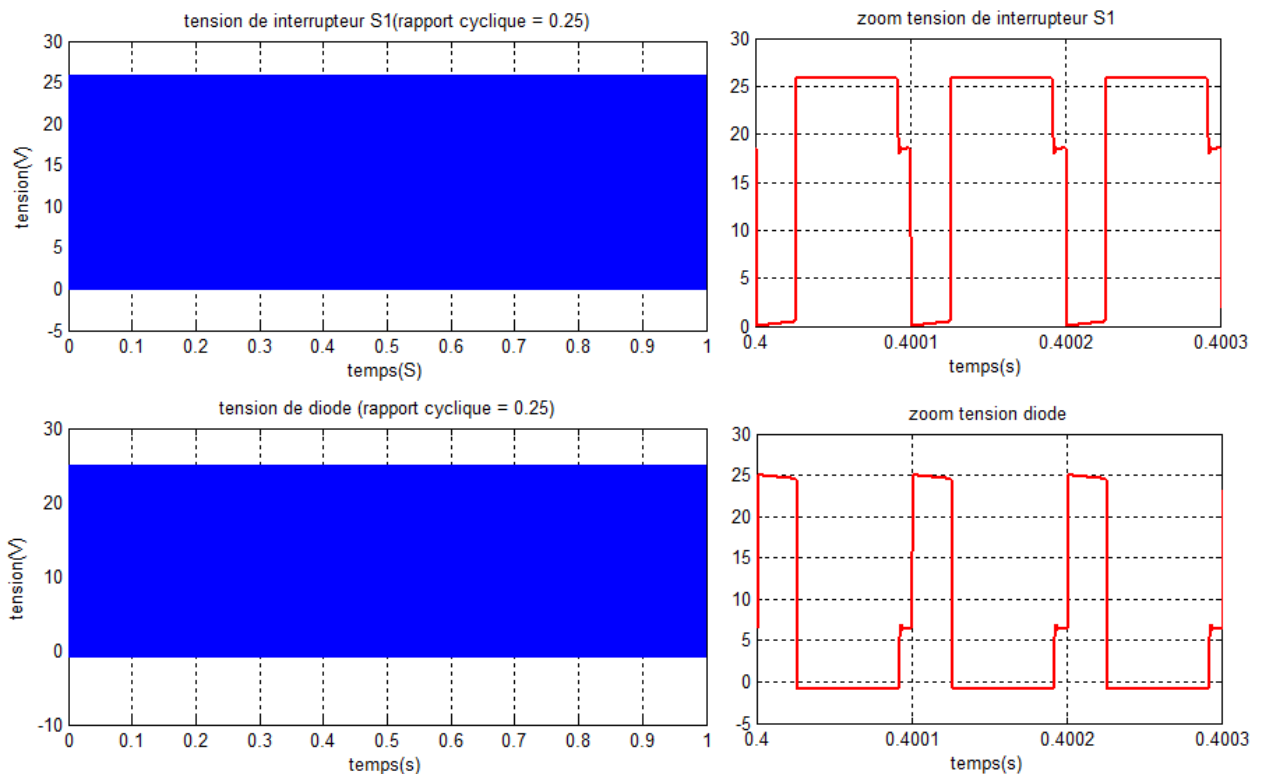


Figure 2.20 Tension de l'interrupteur S_1 et de la diode D ($\alpha=0.25$)

La figure (2.18) montre que la tension de charge prend une valeur d'environ 6V, ce qui correspond bien au rapport cyclique de 0.25 et à la tension de sortie de 25V. La figure 2.19 montre le courant de sortie. Sa valeur est d'environ 2.2 A, et il est supérieur au courant d'entrée. La tension et le courant de charge sont filtrés à cause de la présence de l'inductance de lissage L .

La figure (2.20) montre la tension entre borne interrupteur S_1 et diode. Les tensions des deux interrupteurs basculent entre $V_{in} = 25V$ et zéro volt. Nous remarquons un fonctionnement complémentaire entre les deux commutateurs, le commutateur S_1 est actif durant 25% de la période et inactif durant 75% de la période.

Cas où $\alpha = 0.5$:

On présente les résultats de simulation sur les figures (2.21) à (2.23)

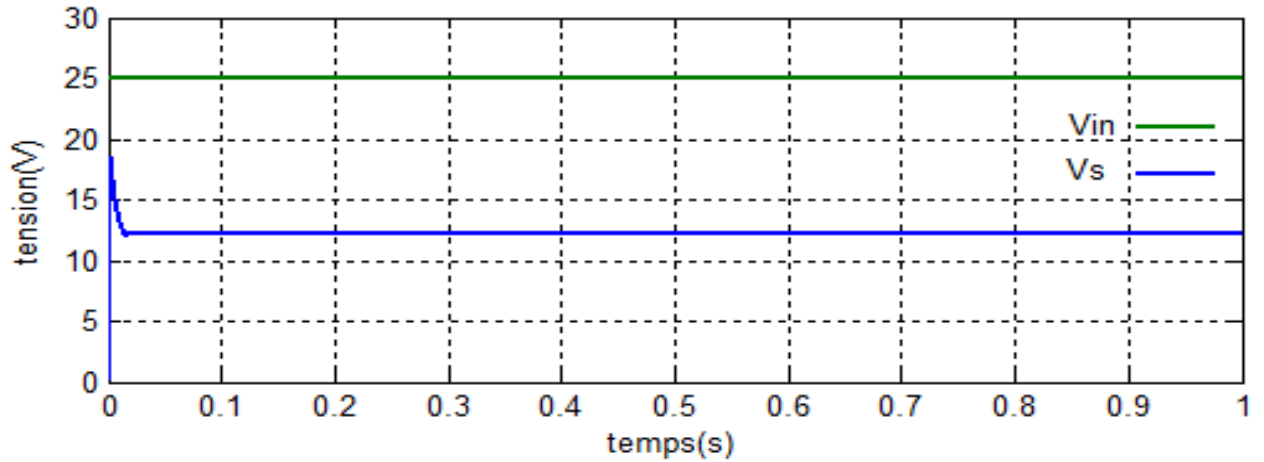


Figure 2.21 Tension entrée et sortie de hacheur deux niveaux ($\alpha = 0.5$)

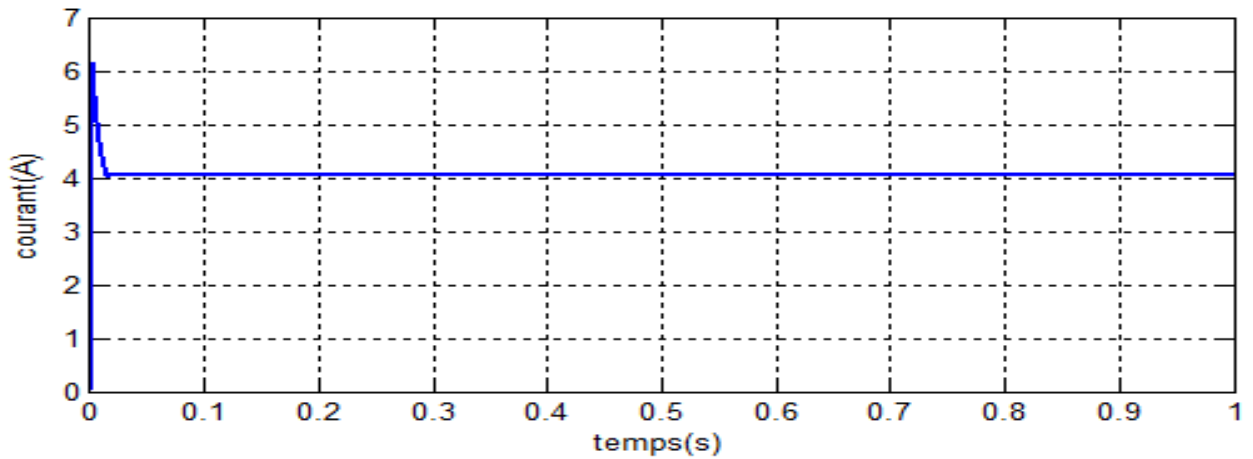


Figure 2.22 Le courant sortie de hacheur deux niveaux ($\alpha = 0.5$)

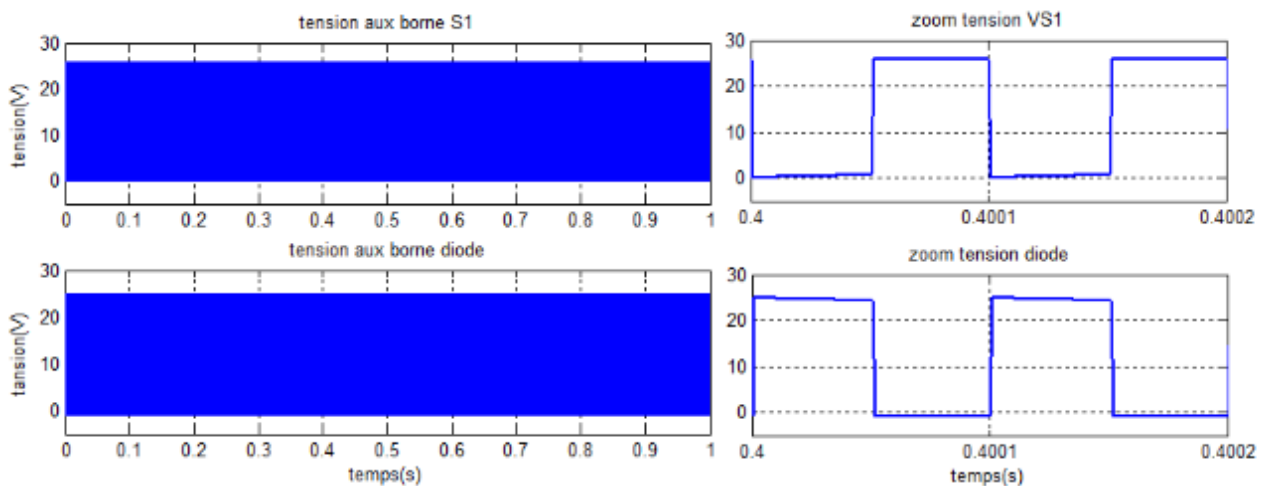


Figure 2.23 La tension de diode et l'interrupteur S1 ($\alpha = 0.5$)

La figure (2.21) montre que la tension de charge prend une valeur d'environ 12.5V, ce qui correspond bien au rapport cyclique de 0.5 et à la tension de sortie de 25V. La figure 2.22 montre le

courant de sortie. Sa valeur est d'environ 4 A, et il est supérieur au courant d'entrée. La tension et le courant de charge sont filtrés à cause de la présence de l'inductance de lissage L.

La figure (2.23) montre la tension entre borne interrupteur S_1 et diode. Les tensions des deux interrupteurs basculent entre $V_{in} = 25V$ et zéro volt. Nous remarquons un fonctionnement complémentaire entre les deux commutateurs, le commutateur S_1 est actif durant 50% de la période et inactif durant 50% de la période.

Cas où $\alpha = 0.75$:

On présente les résultats de simulation sur les figures (2.24) à (2.26)

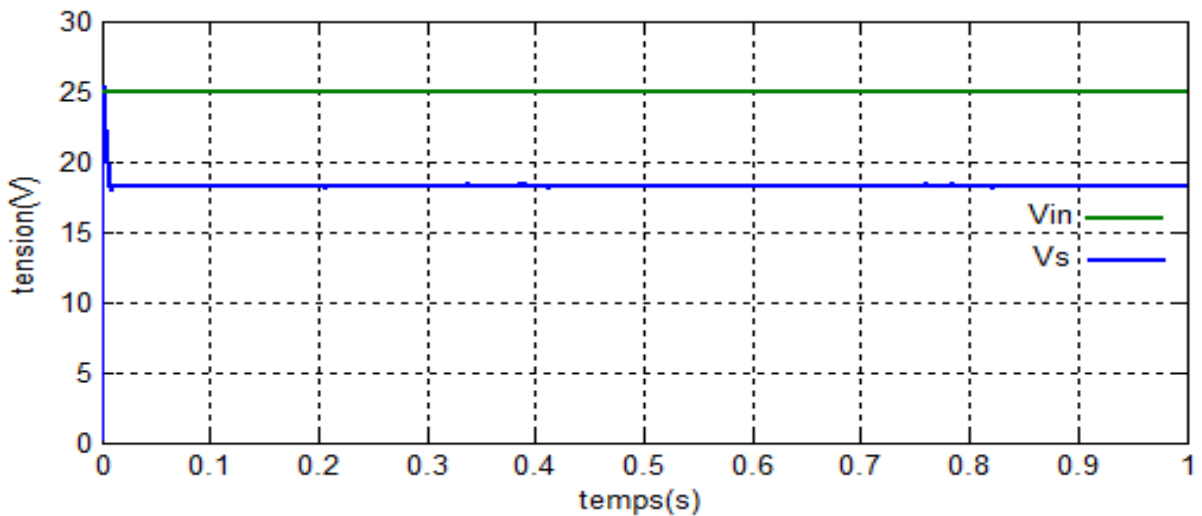


Figure 2.24 La tension de entrée et sortie ($\alpha=0.75$)

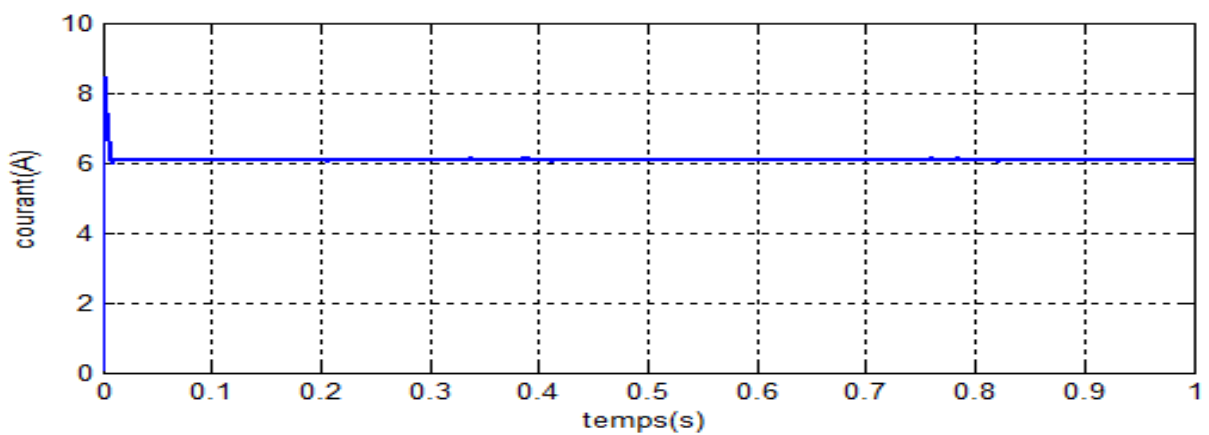


Figure 2.25 Le courant de sortie ($\alpha=0.75$)

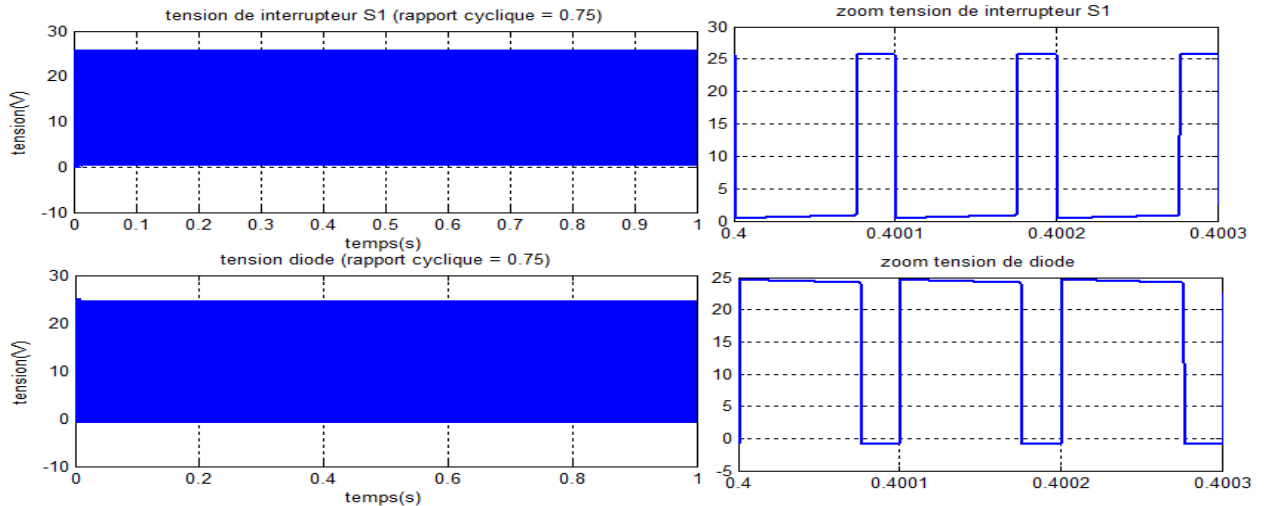


Figure 2.26 La tension borne d'interrupteur S1 et diode ($\alpha=0.75$)

La figure (2.24) montre que la tension de charge prend une valeur d'environ 18V, ce qui correspond bien au rapport cyclique de 0.75 et à la tension de sortie de 25V. La figure 2.25 montre le courant de sortie. Sa valeur est d'environ 6 A, et il est supérieur au courant d'entrée. La tension et le courant de charge sont filtrés à cause de la présence de l'inductance de lissage L.

La figure (2.26) montre la tension entre borne interrupteur S_1 et diode. Les tensions des deux interrupteurs basculent entre $V_{in} = 25V$ et zéro volt. Nous remarquons un fonctionnement complémentaire entre les deux commutateurs, le commutateur S_1 est actif durant 75% de la période et inactif durant 25% de la période.

2.5. Convertisseur multiniveaux

Un convertisseur statique est dit « multiniveaux » lorsqu'il génère une tension de sortie découpée, composée d'au moins trois niveaux. Ce type de convertisseur présente essentiellement deux avantages : D'une part, les structures multiniveaux permettent de limiter les contraintes en tension subies par les interrupteurs de puissance, car, chaque composant à l'état bloqué, supporte une fraction d'autant plus faible de la pleine tension du bus continu d'entrée que le nombre de niveaux est élevé. D'autre part, les qualités spectrales de la tension à la sortie du convertisseur multiniveaux sont remarquables. En fait, la multiplication du nombre de niveaux intermédiaires permet la réduction de l'amplitude de chaque front montant ou descendant de la tension de sortie. Ce qui diminue l'amplitude des raies harmoniques. Une commande appropriée des semi-conducteurs de puissance du convertisseur multiniveaux permet de supprimer des familles entières de raies harmoniques. [20]

2.5.1. Structure d'un hacheur à trois niveaux (FC)

La figure (2.27) indique la structure d'un hacheur trois niveaux et de sa commande en MLI. Il se compose de deux interrupteurs S_1 et S_2 , deux diodes D_1 et D_2 , une inductance, un condensateur de filtrage capacitif et une charge résistive. Une capacité flottante assure la liaison entre les deux points milieux des transistors et diodes. Dans cette topologie, et suivant la valeur du rapport cyclique, le convertisseur peut fournir à sa sortie trois niveaux de tension : 0 , $0.5 V_{in}$ et V_{in} .

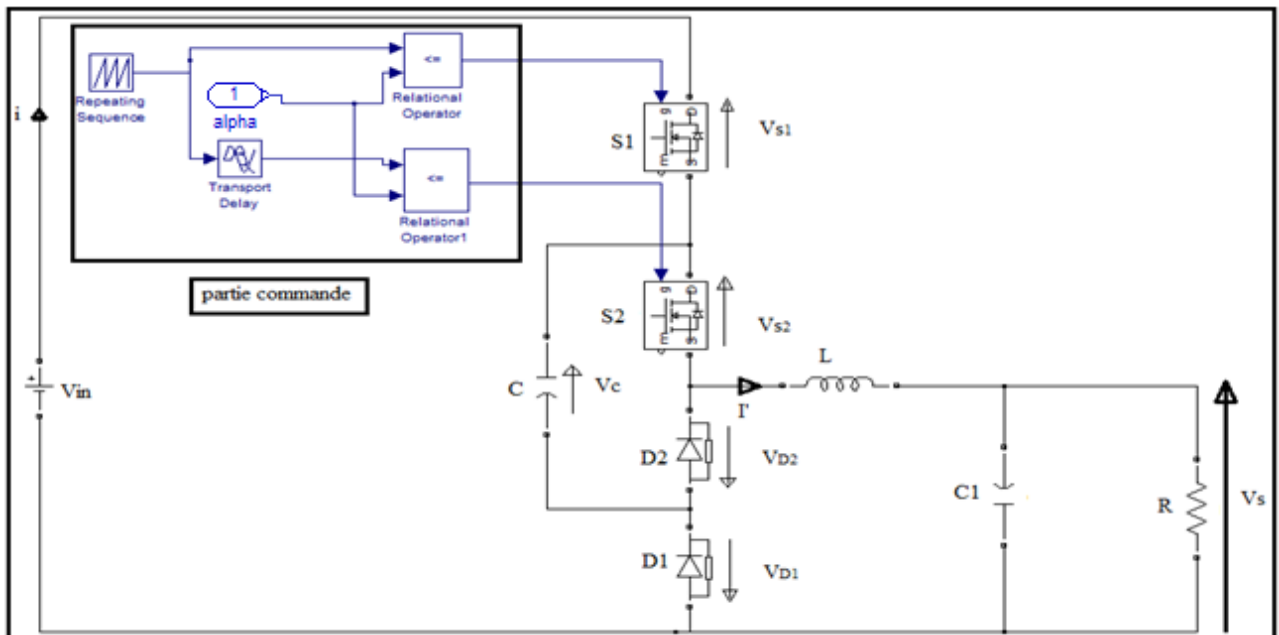


Figure 2.27 Hacheur trois niveaux et sa commande

2.5.2. Configurations du hacheur à trois niveaux

Le hacheur à trois configurations possibles :

- Conduction des deux interrupteurs S_1 et S_2 : La tension de sortie dans ce cas est égale à la tension d'entrée V_{in}
- Conduction de S_1 et blocage de S_2 : La tension de sortie est égale à la différence entre la tension d'entrée et la tension de la capacité flottante
- Blocage de S_1 et S_2 : La tension de sortie est dans ce cas nulle.

2.5.3. Commande en MLI du hacheur à trois niveaux

La commande des deux interrupteurs sont décalées l'une par rapport à l'autre d'une demi-période. Pour avoir ce décalage, le signal de référence, qui est le rapport cyclique, est comparé avec deux porteuses en dent de scie, décalées entre eux d'une demi-période, comme indiqué à la figure (2.28).

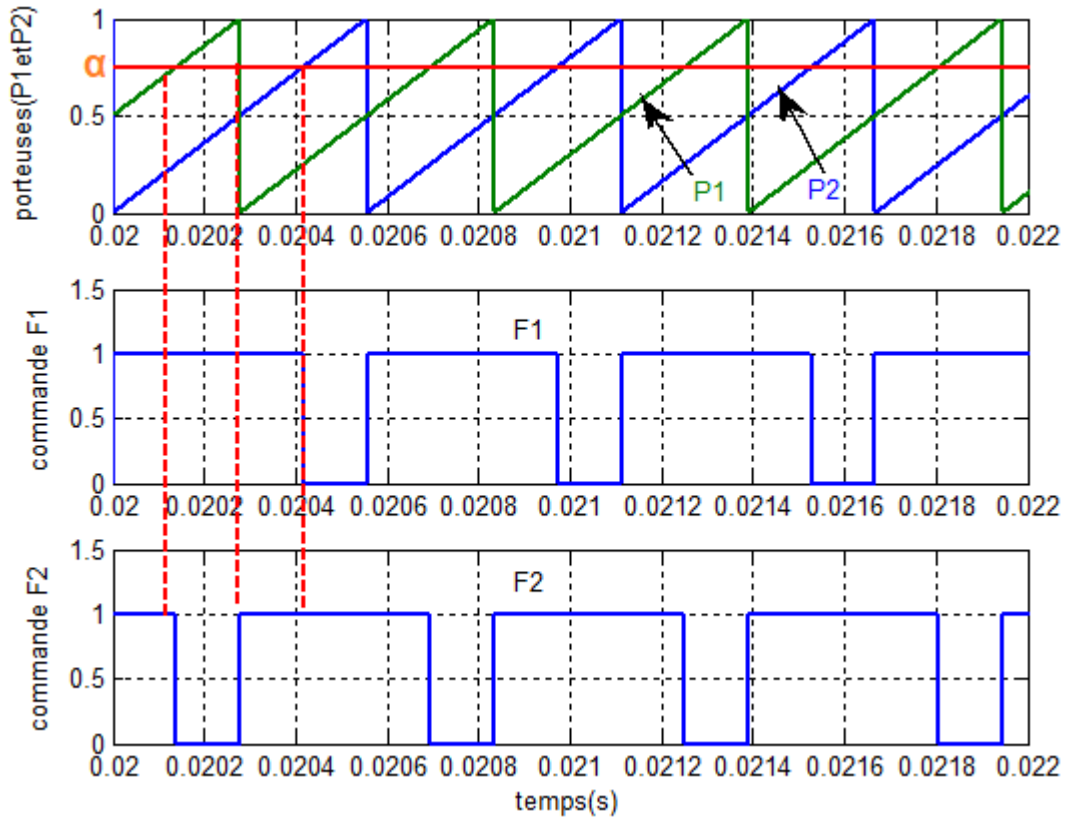


Figure 2.28 Principe de la modulation command mli a trois niveaux

Il faut distinguer le cas où le rapport cyclique α est inférieur à 0,5 de celui où il lui est supérieur

Cas : $\alpha < 0,5$

Pour $0 < t < \alpha T$, S_1 est fermé, S_2 ouvert

Le courant i , égal à I' , passe par S_1 , C et D_2 ; C se charge :

$$V_{S1} = V_{D2} = 0 \text{ et } V_{S2} = V_C \approx \frac{V}{2} \text{ et } V_{D1} = V_C - V_{in} \approx -\frac{V_{in}}{2} \quad (2.25)$$

$$V_s = V_{in} - V_C \approx \frac{V_{in}}{2} \quad (2.26)$$

$$I' = i \quad (2.27)$$

Pour $\alpha T < t < T/2$, S_1 et S_2 sont ouverts :

Le courant I' passe par D_1 et D_2 ; C'est en circuit ouvert :

$$V_{D1} = V_{D2} = 0 \text{ et } V_{S1} = V_{in} - V_C \approx \frac{V_{in}}{2} \text{ et } V_{S2} = V_C \approx \frac{V_{in}}{2} \quad (2.28)$$

$$V_s = 0 \text{ et } i = 0 \quad (2.29)$$

Pour $T/2 < t < T/2 + \alpha T$, S_2 est fermé, S_1 ouvert.

Le courant I passe par D_1 , C et S_2 ; C se décharge :

$$V_{D1} = V_{S2} = 0 \text{ et } V_{S1} = V_{in} - V_C \approx \frac{V_{in}}{2} \text{ et } V_{D2} = -V_C \approx -\frac{V_{in}}{2} \quad (2.30)$$

$$V_s = V_C \approx \frac{V_{in}}{2} \text{ et } i = 0 \quad (2.31)$$

Pour $T/2 + \alpha T < t < T$, S_1 et S_2 sont ouverts On retrouve les mêmes résultats.

Cas : $\alpha > 0,5$

Pour $0 < t < \alpha T - T/2$, S_1 et S_2 sont fermés.

Le courant d'entrée égale le courant de sortie ; C'est en circuit ouvert :

$$V_{D1} = -V_{in} + V_C \approx -\frac{V_{in}}{2} \text{ et } V_{D2} = -V_C \approx -\frac{V_{in}}{2} \text{ et } V_{S1} = V_{S2} = 0 \quad (2.32)$$

$$V_{in} = V_s \text{ et } i = I' \quad (2.33)$$

Pour $\alpha T - T/2 < t < T/2$, S_1 est fermé, S_2 ouvert.

Les relations sont les mêmes que pour $0 < t < \alpha T$ quand $\alpha < 0,5$.

Pour maintenir la valeur moyenne de V_C égal à $V_{in}/2$, il suffit de faire varier la durée de la phase de décharge de C par rapport à la durée de sa phase de charge.

Si la capacité a une valeur suffisante, la tension aux bornes des transistors bloqués diffère peu de $V_{in}/2$, et celle aux bornes des diodes bloquées diffère peu de $-V_{in}/2$.

La tension inverse des interrupteurs est ainsi réduite de moitié par rapport au cas d'un hacheur abaisseur classique.

2.5.4. Simulation numérique

On simule le fonctionnement du hacheur à trois niveaux commande en MLI Le schéma de simulation est indiqué à la figure (2.27). Les paramètres du modèle sont les suivantes :

$$V_{in} = 25V, R = 3\Omega, C = 0.005f, C_1 = 0.008 f$$

On simule le modèle pour trois valeurs distinctes du rapport cyclique : $\alpha = 0.25$, $\alpha = 0.5$ et $\alpha = 0.75$.

Cas où $\alpha = 0.25$:

On présente les résultats de simulation sur les figures (2.29) à (2.32).

La figure (2.29) et figure (2.30) représente la forme de la tension et du courant de charge. La tension de charge dépend du rapport cyclique α et de la tension d'entrée V_{in} . $\alpha = 0.25$ et $V_{in} = 25V$

$$V_s = \alpha \times V_{in} \Rightarrow V_s = 0.25 \times 25 = 6.25V$$

Le courant de charge est au environ de 2.4 A. La tension et le courant de charge sont filtrés par l'inductance de lissage L .

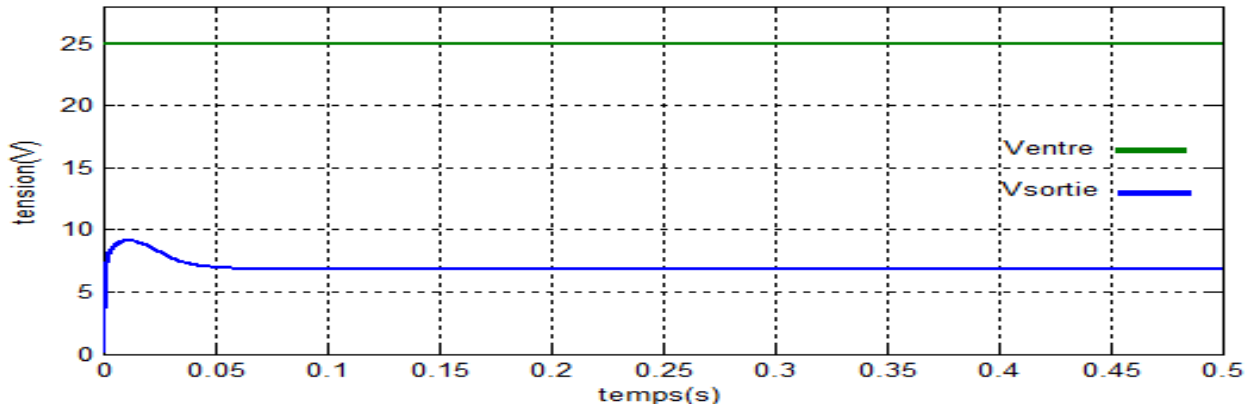


Figure 2.29 Tension sortie et entre rapport cycle = 0.25

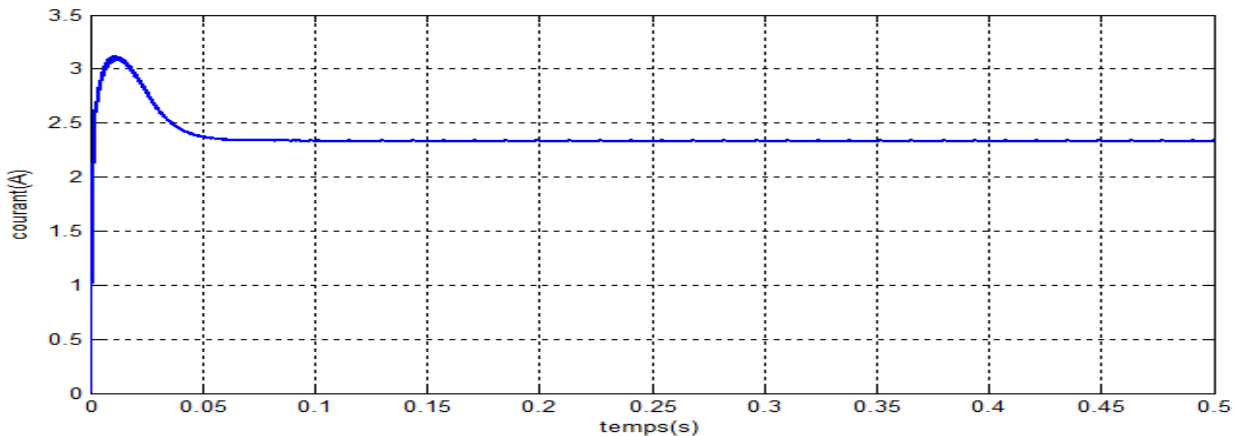


Figure 2.30 Courant de sortie I_s (rapport cyclique = 0.25)

La figure (2.31) représente tension à la borne de la capacité flottante et le courant qui la traverse. La valeur de la tension est pratiquement égale à la moitié de la tension d'entrée V_{in} . Le zoom de la tension et du courant montre des séquences périodiques de petit chargement et déchargement de ce condensateur.

La figure (2.32) représente la tension aux bornes des quatre interrupteurs du hacheur. Le zoom montre un basculement entre zéro et $V_{in}/2$ pour les quatre tensions. Ce qui met en évidence un avantage de l'utilisation du hacheur à trois niveaux, à savoir la réduction de l'amplitude de la tension inverse appliquée sur chaque interrupteur en état de blocage, et la réduction de l'amplitude de chaque front montant ou descendant de cette tension inverse.

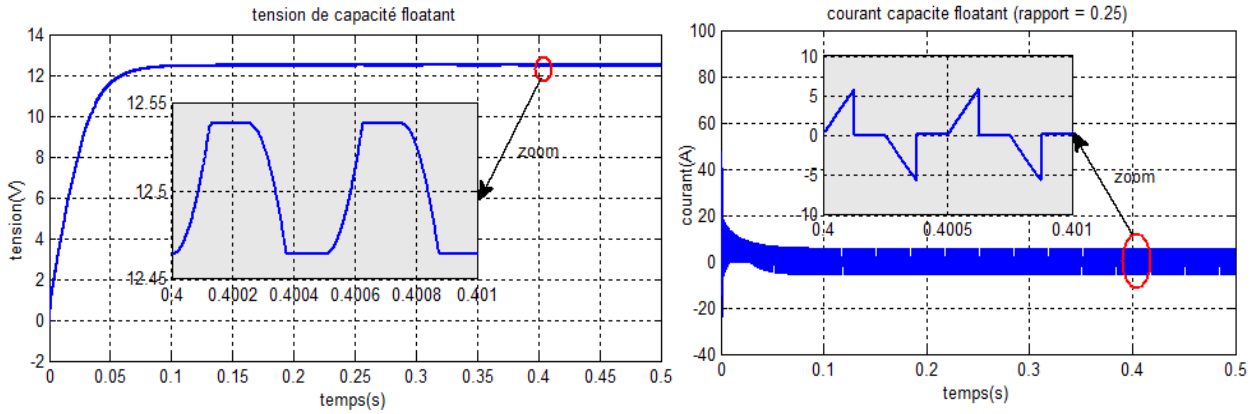


Figure 2.31 Tension et courant de capacité (rapport = 0.25)

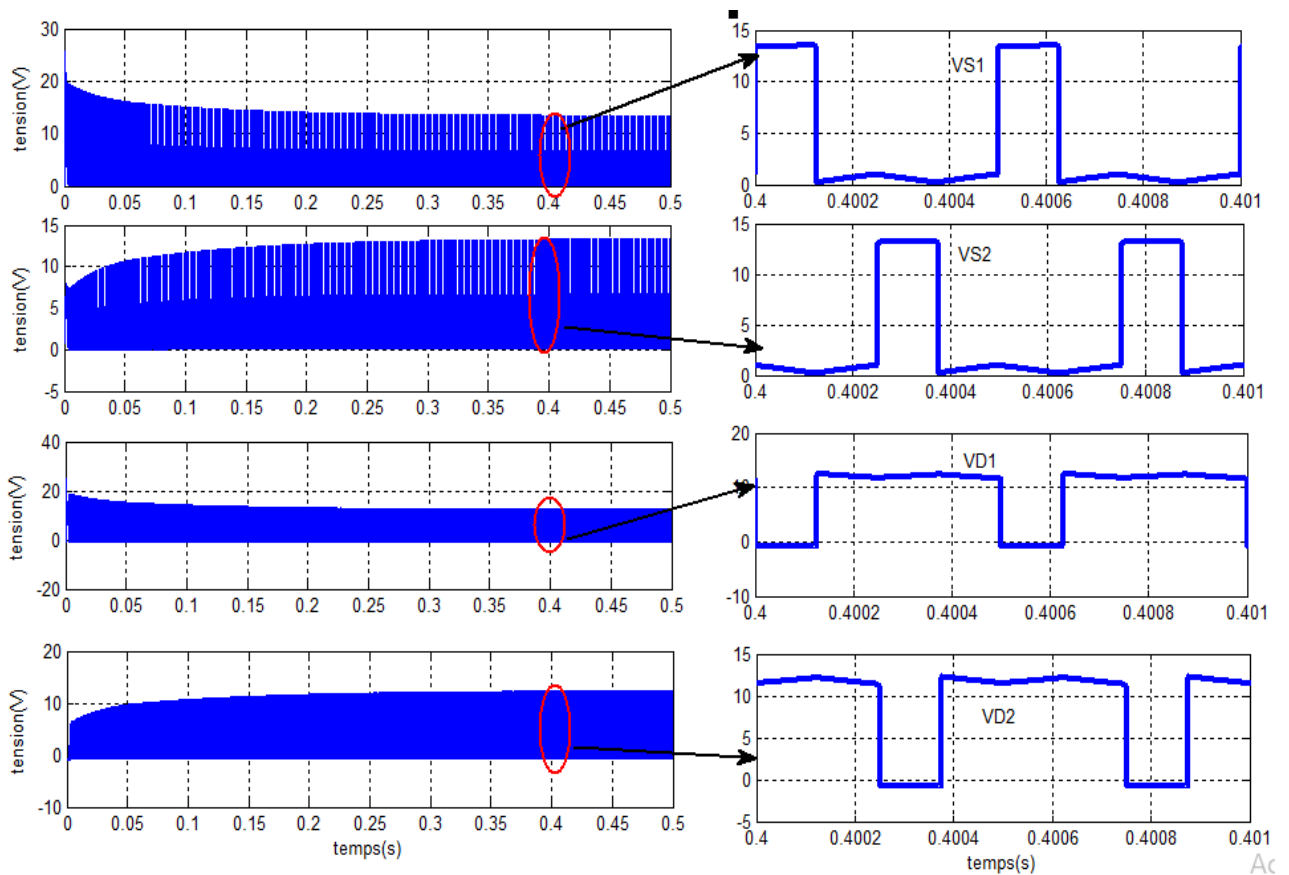


Figure 2.32 La tension des interrupteurs (rapport = 0.25)

Cas où $\alpha = 0.75$:

On présente les résultats de simulation sur les figures (2.33 à 2.37).

La figure (2.33) et la figure (2.34) représentent la forme de la tension et du courant de charge. La tension de charge dépend du rapport cyclique α et de la tension d'entrée V_{in} . $\alpha = 0.75$ et $V_{in} = 25V$

$$V_s = \alpha \times V_{in} \Rightarrow V_s = 0.75 \times 25 = 18.75V$$

Le courant de charge est au environ de 6 A. La tension et le courant de charge sont filtrés par l'inductance de lissage L.

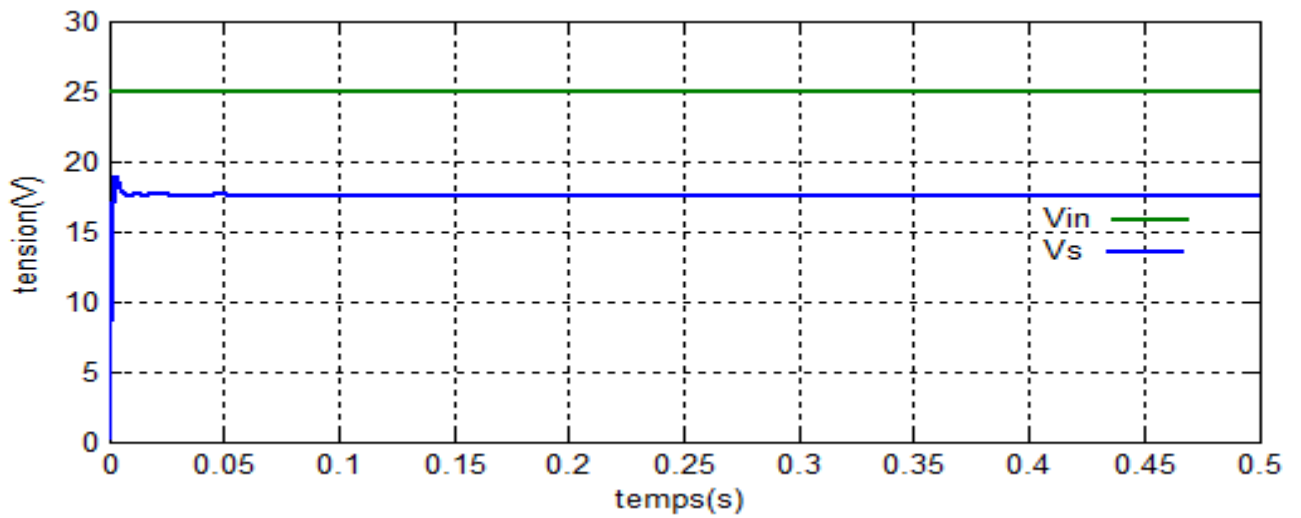


Figure 2.33 Tension de charge (rapport = 0.75)

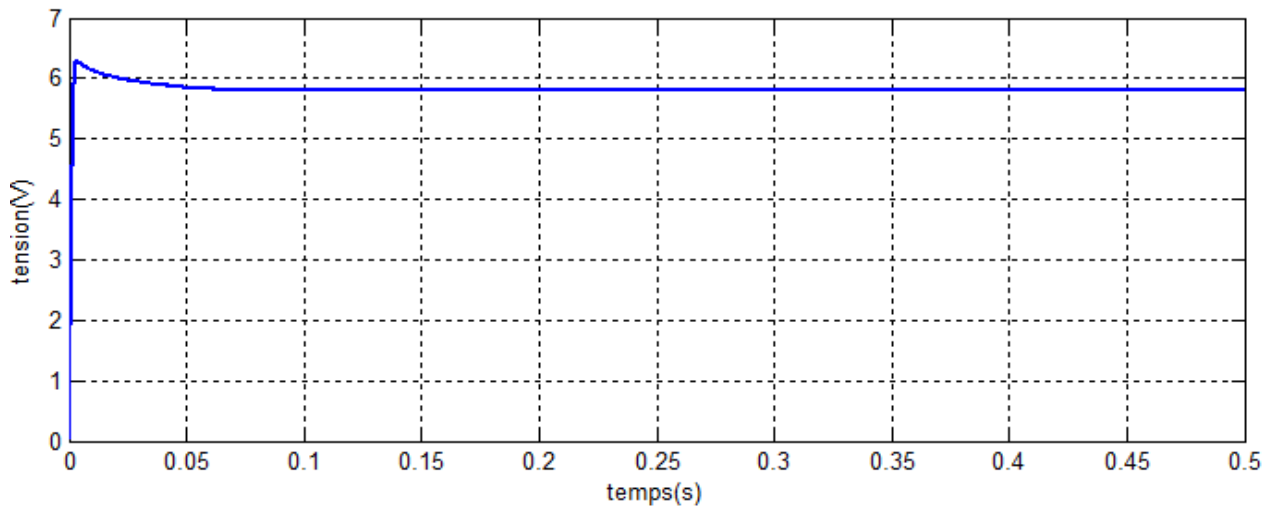


Figure 2.34 Courant de charge (rapport = 0.75)

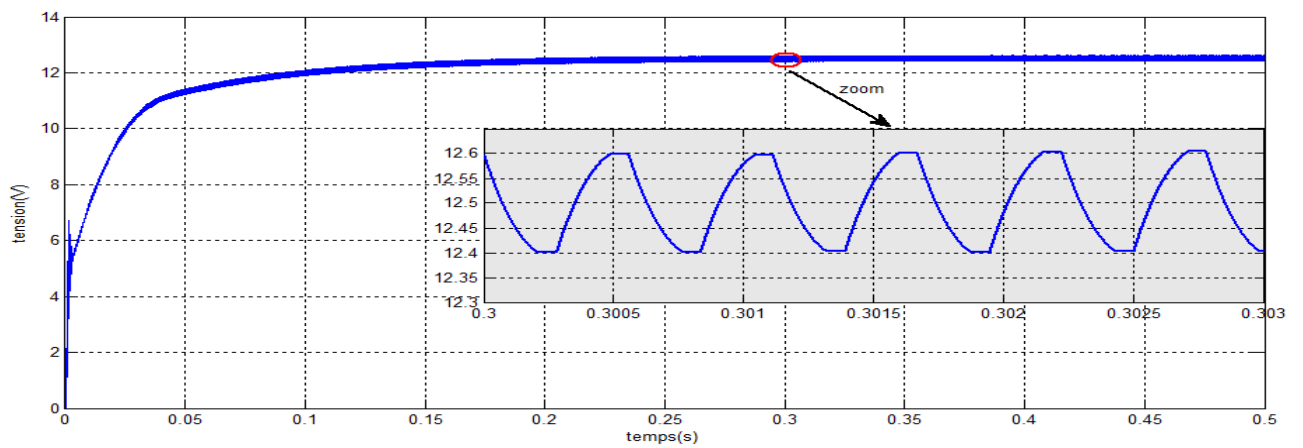


Figure 2.35 Tension de capacité flottante (rapport = 0.75)

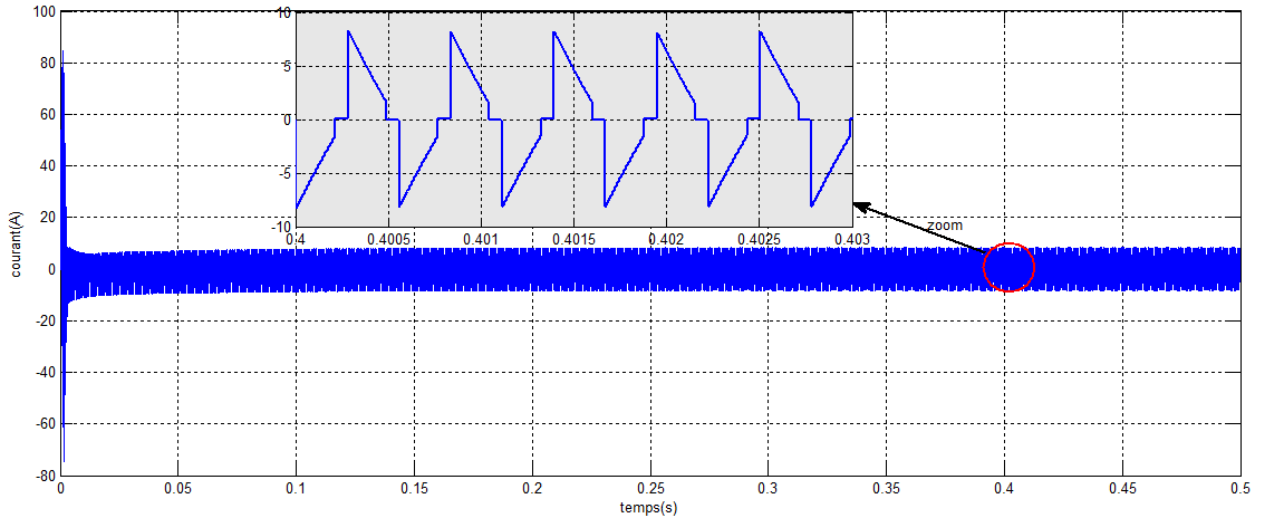


Figure 2.36 Courant de la capacité flottant (rapport = 0.75)

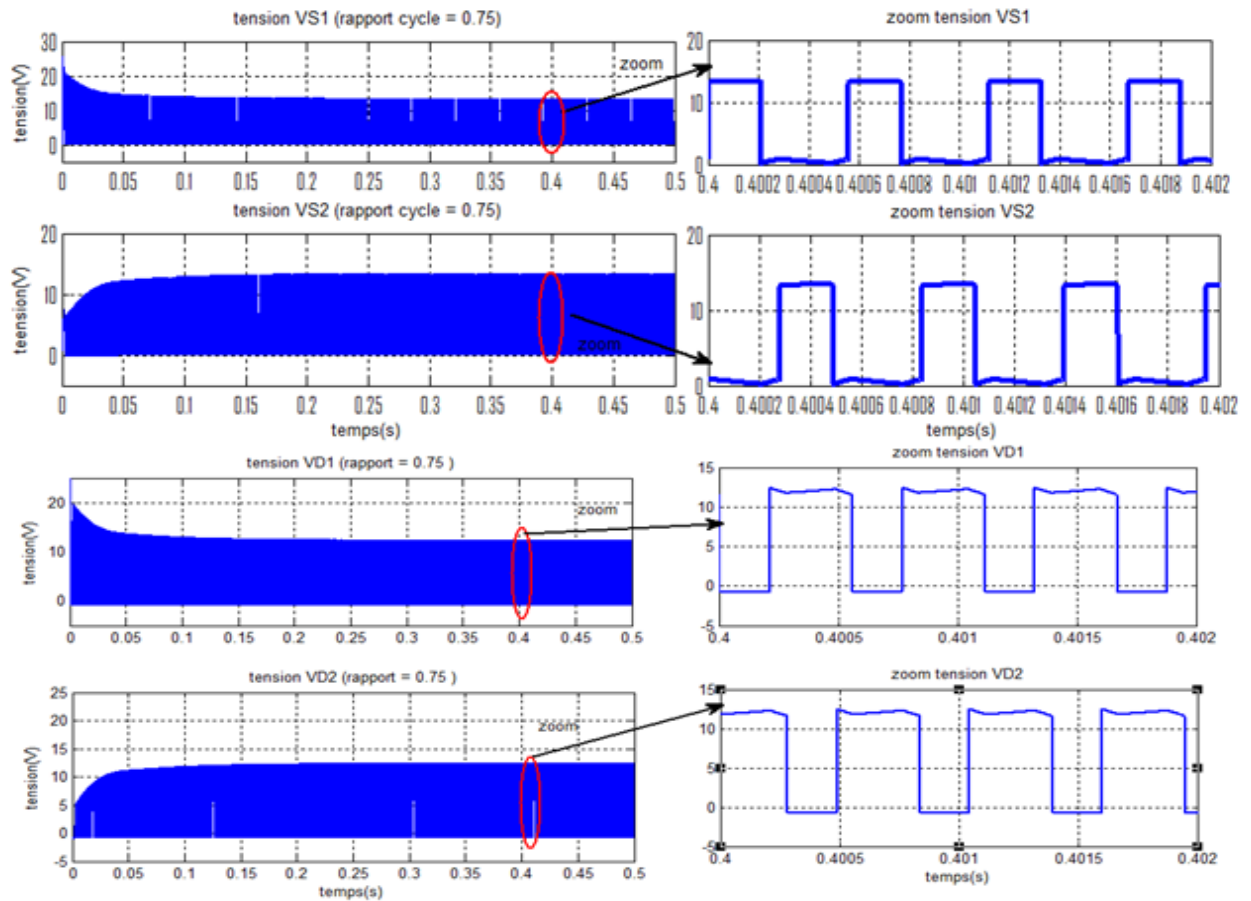


Figure 2.37 Tension des interrupteurs (rapport = 0.75)

La figure (2.35) représente tension à la borne de la capacité flottante et la figure (2.36) montre le courant qui la traverse. La valeur de la tension est pratiquement égale à la moitié de la tension d'entrée V_{in} . Le zoom de la tension et du courant montre des séquences périodiques de petit chargement et déchargement de ce condensateur.

La figure (2.37) représente la tension aux bornes des quatre interrupteurs du hacheur.

Le zoom montre un basculement entre zéro et $V_{in}/2$ pour les quatre tensions. Ce qui met en évidence un avantage de l'utilisation du hacheur à trois niveaux, à savoir la réduction de l'amplitude de la tension inverse appliquée sur chaque interrupteur en état de blocage, et la réduction de l'amplitude de chaque front montant ou descendant de cette tension inverse.

2.6. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté une étude théorique et par simulation des hacheurs. On a présenté les trois types classiques des hacheurs : abaisseur, élévateur, et abaisseur élévateur. Nous avons présenté la structure d'un hacheur à trois niveaux, étudié son fonctionnement, et montré ses avantages par rapport aux hacheurs à deux niveaux.

Dans le chapitre suivant on va étudier l'insertion des hacheurs multiniveaux dans une cascade de conversion photovoltaïque.

Chapitre 03

SYSTEME PHOTOVOLTAÏQUE A BASE D'UN CONVERTISSEUR DC-DC

3.1. Introduction

Pour assurer le fonctionnement optimal du générateur photovoltaïque (GPV), un équipement de commande doit être mis entre le générateur photovoltaïque et la charge, dont le but est l'adaptation des deux équipements (générateur photovoltaïque - charge) pour un meilleur transfert d'énergie vers la charge. Ce dernier peut augmenter d'une manière significative le rendement en puissance de GPV, nous utilisons pour cela un hacheur menu d'une commande de la poursuite de point de puissance maximale(MPPT).

3.2. Système photovoltaïque à base d'un hacheur

Les caractéristiques d'un générateur photovoltaïque dépendent de l'éclairement solaire et de la température. Ces variations climatiques entraînent la fluctuation du point de puissance maximale. À cause de cette fluctuation, on intercale souvent entre le générateur photovoltaïque et le récepteur un hacheur commandé permettant de poursuivre le point de puissance maximale. Ces commandes sont connues sous le nom de MPPT (Maximum Power Point Tracking).

La Figure (3.1) montre la structure d'un système photovoltaïque à base d'un hacheur.

3.3. Commande MPPT

Un générateur photovoltaïque peut fonctionner dans une large gamme de tension et de courant de sortie, mais il ne peut délivrer une puissance maximale que pour des valeurs particulières du courant et de la tension. En effet la caractéristique du courant en fonction de la tension $I(V)$ du générateur dépend de l'éclairement solaire et de la température. Les variations climatiques entraînent la fluctuation du point de la puissance maximale. A cause de cette fluctuation, on intercale souvent entre le générateur et le récepteur, un ou plusieurs convertisseurs statiques commandés permettant de poursuivre le point de puissance maximale [21].

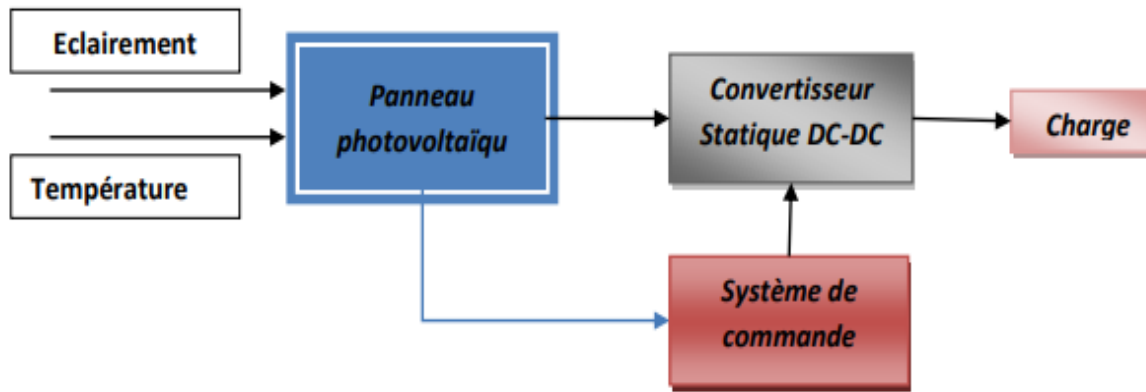


Figure 3.1 Schéma simplifié d'un système photovoltaïque à base d'un hacheur.

3.3.1. Principe de la MPPT

La MPPT, de l'anglais « Maximum Power Point Tracking » est une technique permettant de suivre, comme son nom l'indique, le point de puissance maximale d'un générateur photovoltaïque. En conséquence, pour un même éclairement, la puissance délivrée sera différente selon la charge. A cet effet, un contrôleur MPPT permet de piloter le convertisseur statique reliant la charge (une batterie par exemple) et le panneau photovoltaïque de manière à fournir en permanence le maximum de puissance à la charge à chaque instant.

La Figure (3.1) présente le schéma du principe d'un générateur photovoltaïque doté d'étage d'adaptation dc-dc entre le générateur et sa charge. Cette structure correspond à un système plus communément appelé système autonome. Il permet le plus souvent d'alimenter une batterie servant de stocker l'énergie pour une charge qui ne supporte pas les fluctuations de tension. Cet étage d'adaptation dispose d'une commande MPPT (Maximum Power Point Tracking) qui lui permet de rechercher le PPM (point de puissance maximale) que peut fournir un panneau solaire photovoltaïque. L'algorithme de recherche MPPT peut être plus ou moins complexe en fonction du type d'implantation choisi et des performances recherchées. Cependant, tous les algorithmes performants doivent jouer sur la variation du rapport cyclique du convertisseur de puissance associé figure (3.2) [22].

Nous pouvons citer trois cas de perturbations dans la figure (3.4). Cette dernière nous montre le basculement du fonctionnement du point de la puissance maximal PPM vers un nouveau point P_1 de fonctionnement plus ou moins éloigné de l'optimum, par rapport au type de la perturbation.

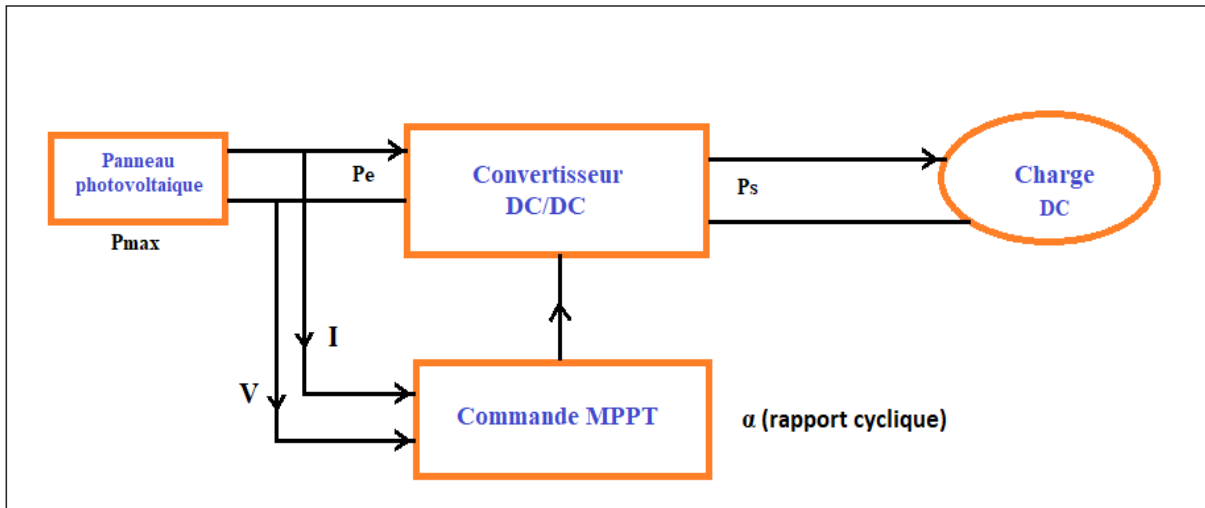


Figure 3.2 Schéma de principe de la commande MPPT d'un système photovoltaïque.

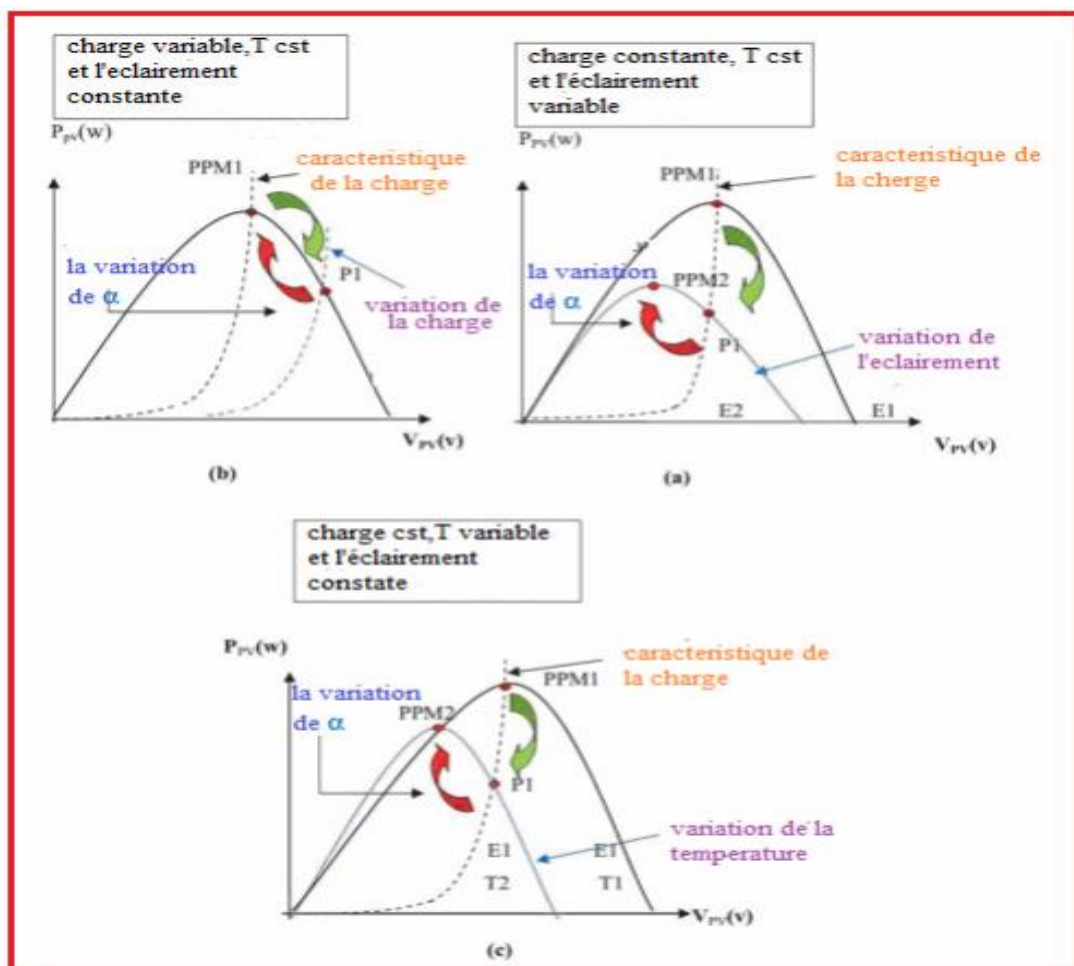


Figure 3.3 Recherche et recouvrement du Point Puissance Maximale.

Nous avons dans le premier cas le réajustement de la valeur du rapport cyclique qu'entraîne la variation de l'ensoleillement, et ceci mène à la convergence vers le nouveau point de puissance maximum. PPM2.

Dans le cas b grâce à l'action de commande une nouvelle position optimale peut être détectée par la modification du point de fonctionnement entraînée par une variation de charge. Dans le dernier cas c, le changement de température de fonctionnement du GPV peut varier le point de fonctionnement. Il faut également agir au niveau de la commande [22].

3.3.2. Algorithme de contrôle MPPT

Il existe plusieurs algorithmes de contrôle MPPT afin de trouver la valeur maximale de la puissance, Nous allons exposer et utiliser la méthode les plus reconnues, qui est la méthode de perturbation et observation (P & O)

La méthode P&O fonctionne en perturbant périodiquement la tension du module V_{PV} , avec une faible amplitude autour de sa valeur initiale (ΔV) et on observe la variation de la puissance P_{PV} qui résulte. Ainsi, on peut déduire que si une incrémentation positive de la tension V_{PV} engendre un accroissement de la puissance P_{PV} c'est-à-dire $\Delta P > 0$, comme illustré dans la figure (3.4).

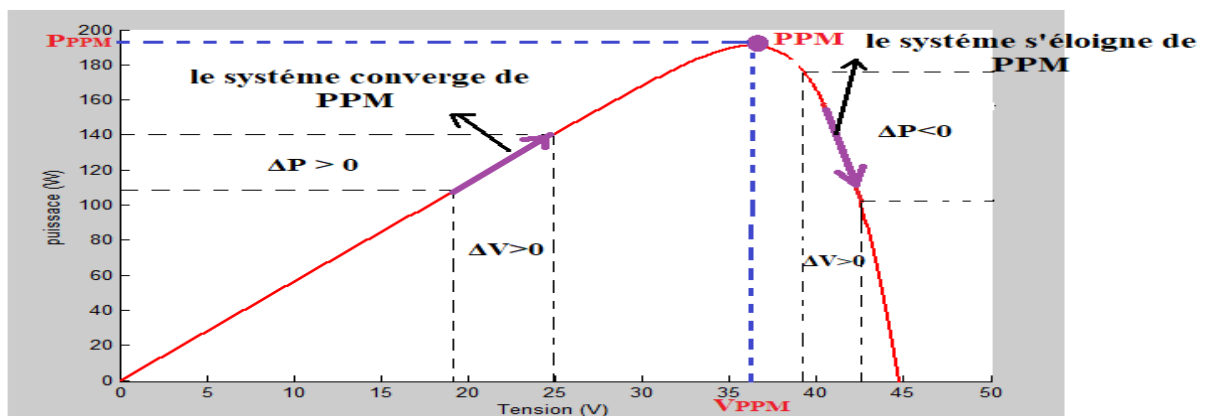


Figure 3.4 Illustration de la méthode P&O

La perturbation de la tension déplace le point de fonctionnement vers un point plus proche du MPP et on continue à perturber la tension dans la même direction. Ceci va déplacer le point de fonctionnement jusqu'à atteindre le MPP.

Si au contraire, la puissance décroît, $\Delta P < 0$, le point de fonctionnement s'éloigne du MPP. Alors, on doit perturber la tension avec un signe algébrique contraire au signe précédent pour déplacer le point de fonctionnement jusqu'à atteindre le MPP.

A partir de ces diverses analyses sur les conséquences d'une variation de tension sur la caractéristique ($P - V$), il est alors facile de situer le point de fonctionnement par rapport au PPM et de faire converger ce dernier vers le maximum de puissance à travers un ordre de commande approprié. En résumé, si suite à une perturbation de tension, la puissance PV augmente, la direction de perturbation est maintenue. Dans le cas contraire, elle est inversée pour reprendre la convergence

vers le nouveau MPP [23] [24].

La figure (3.5) représente l'algorithme classique associé à une commande MPPT de type P&O, où l'évolution de la puissance est analysée après chaque perturbation de tension.

Selon cet algorithme, deux capteurs (courant et tension du GPV) sont nécessaires pour déterminer la puissance du PV à des instants successifs d'échantillonnage, et pouvoir calculer l'erreur de tension et de puissance :

$$\Delta V = V_{PV_n} - V_{PV_{n-1}} \quad (3.1)$$

$$\Delta P = P_{PV_n} - P_{PV_{n-1}} \quad (3.2)$$

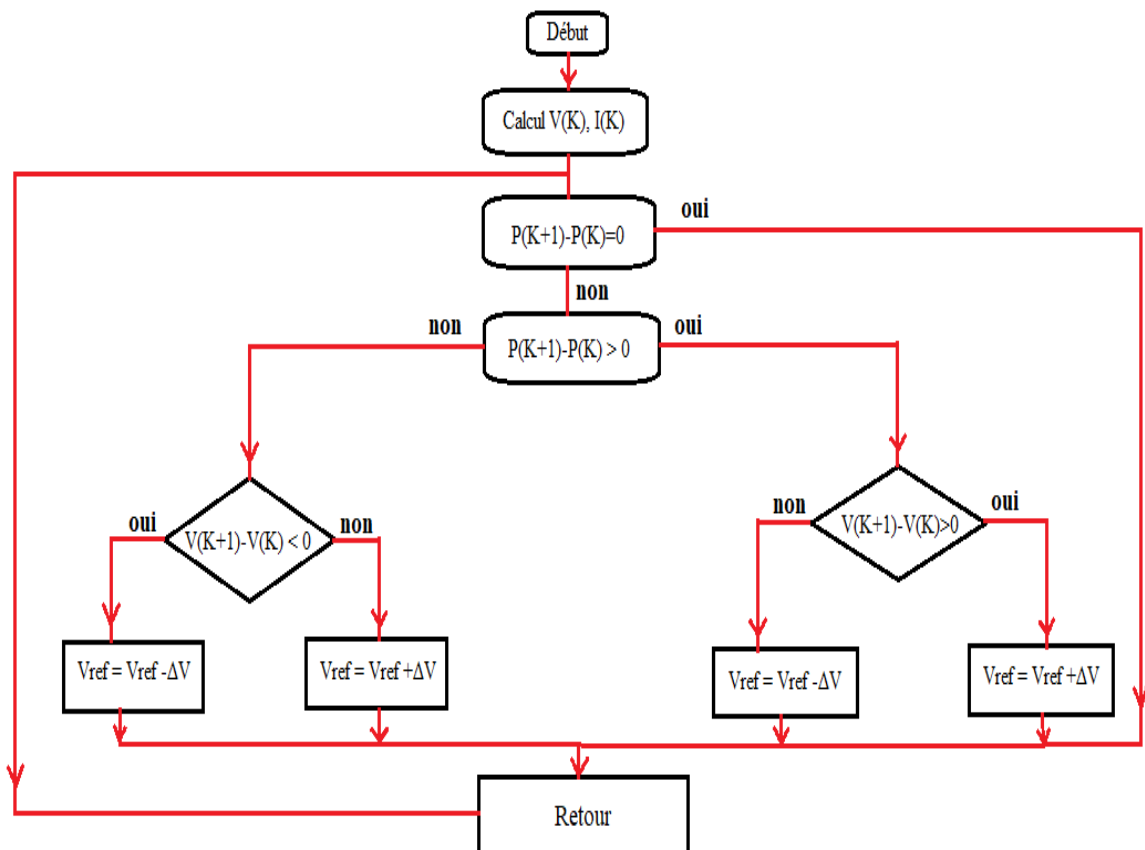


Figure 3.5 Algorithme de MPPT à base de la méthode P&O

La méthode P&O est aujourd'hui largement utilisée à cause de sa simplicité, cependant elle présente quelques problèmes liés aux oscillations autour du PPM qu'elle engendre en régime établi. Cette procédure de recherche du PPM doit être répétée périodiquement, obligeant le système à osciller en permanence autour du PPM, une fois ce dernier atteint. Ces oscillations peuvent être minimisées en réduisant la perturbation. Il faut noter que si la valeur incrémentée est faible on doit avoir un ralentissement dans la recherche du PPM. Autrement dit, il faut trouver un compromis entre la précision et la rapidité. Ce qui rend cette commande difficile à optimiser [22].

3.4. Simulation d'un système photovoltaïque à base d'un hacheur à deux niveaux

On simule le fonctionnement d'un système photovoltaïque commandé en MPPT, alimentant une charge résistive à travers un hacheur à deux niveaux. La source photovoltaïque est composée d'un seul panneau ayant les spécifications indiquées dans le tableau (3.1.) Les différents paramètres du circuit du système sont indiqués dans le tableau (3.2.) La fréquence de commutation du hacheur, imposée par la fréquence de la porteuse en dent de scie, est de 1kHz.

Tableau 3.1 Caractéristiques d'un panneau solaire

Caractéristiques	Spécifications
Puissance maximale (P_{max})	190 (W)
Tension à puissance maximale (V_{max})	37 (V)
Courant à puissance maximale (I_{max})	5.3 (A)
Tension en circuit ouvert (V_{oc})	44.5 (V)
Courant de court-circuit (I_{sc})	5.88(A)

Tableau 3.2 Les différents paramètres du circuit du système

Paramètres	Les valeurs
Charge R	3(Ω)
Inductance L	0.0001 (H)
Condensateur C_{in}	0.01(F)
Condensateur C_{out}	0.008 (F)

La simulation est réalisée à l'aide du logiciel MATLAB/Simulink. La figure (3.6) indique le schéma de simulation. On simule le fonctionnement de la cascade avec irradiation solaire fixe à 1000 W/m², et température fixe à 25°C.

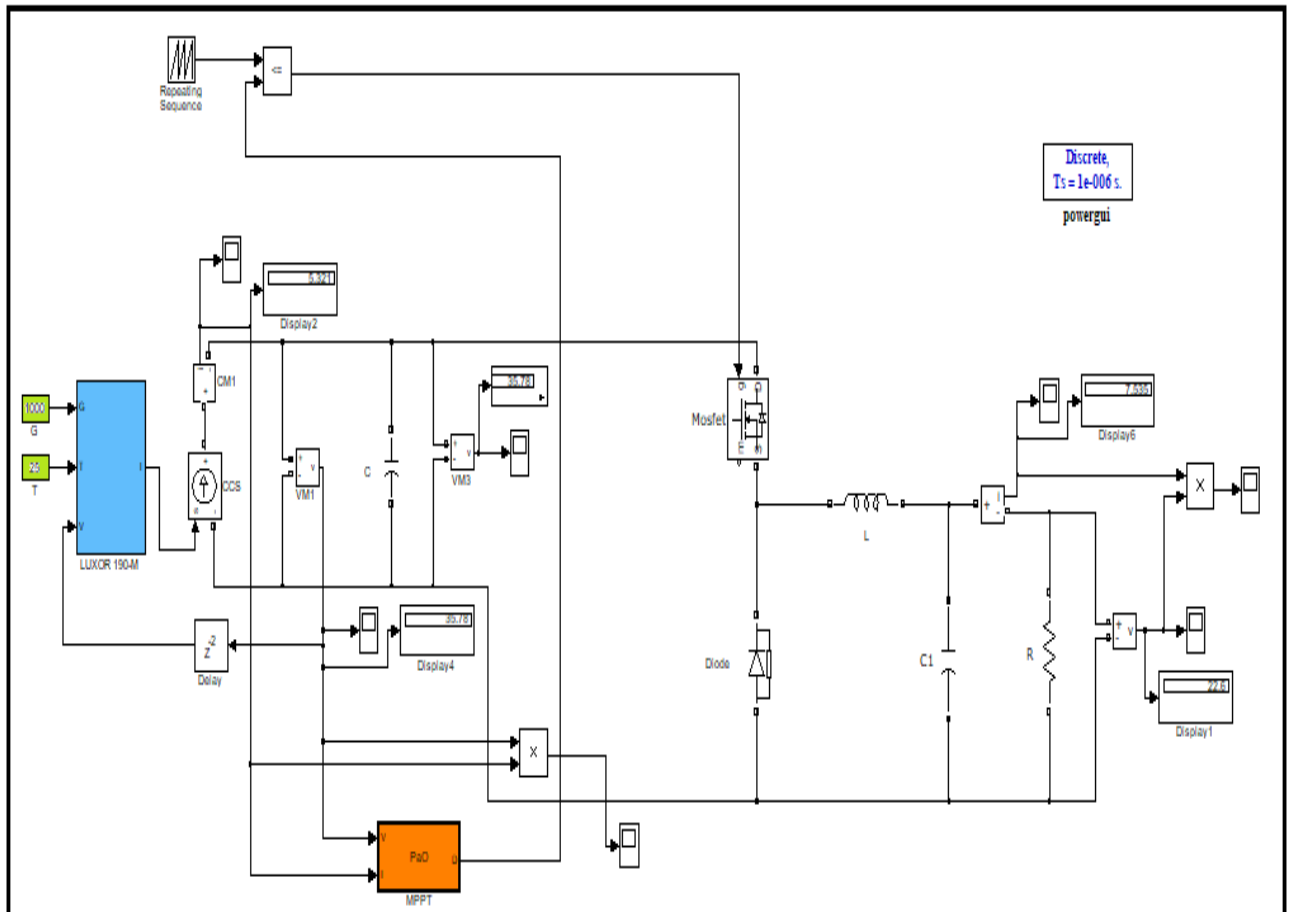


Figure 3.6 Schéma représente le bloc de simulation d'un système PV à base de hacheur buck deux niveaux

Les résultats de simulation sont indiqués sur les figures (3.7 à 3.14.)

Après un court régime transitoire, la tension (figure 3.7), le courant (figure 3.8) et la puissance (figure 3.9) se stabilisent à des valeurs correspondantes au point de puissance maximale (37 V, 5.3 A et 190W). Le Zoom sur les trois signaux montre des petites ondulations et oscillations à cause de la commutation du convertisseur.

La tension de sortie et courant de sortie (figure 3.10 et 3.11) prennent des valeurs qui correspondent au tension et courant du panneau et au rapport cyclique du hacheur. La tension de sortie (23 V) est logiquement inférieure à celle du panneau et le courant de sortie (7. A) est supérieur à celui du panneau.

La figure (3.12) indique la puissance mesurée à la sortie du système (185 W). Elle est légèrement inférieure à celle du panneau (190 W), à cause d'une faible consommation de puissance au niveau des quatre interrupteurs du hacheur. Elle présente des oscillations à cause de la commutation des interrupteurs.

Les tensions aux bornes des interrupteurs sont indiquées à la figure (3.13) et (3.14). Le zoom

montre un basculement entre zéro et 18V, qui est égale à la tension d'entrée du hacheur, ce qui provoque un effort considérable sur ces interrupteurs si la tension et la puissance mis en jeu prennent des fortes valeurs. On va montrer dans la section suivante que l'utilisation des hacheurs multiniveaux permet de réduire considérablement cet effort sur les interrupteurs.

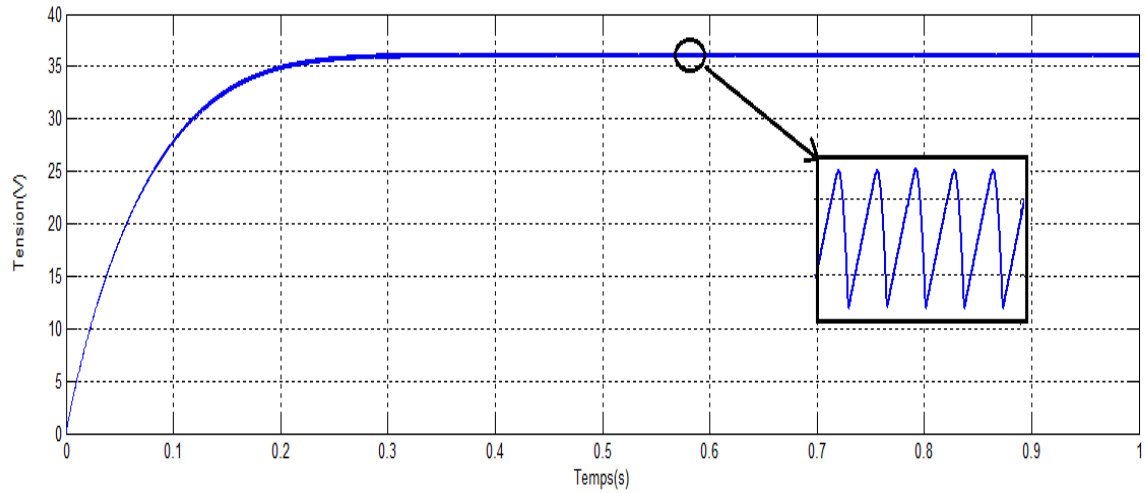


Figure 3.7 Tension de sortie du module photovoltaïque

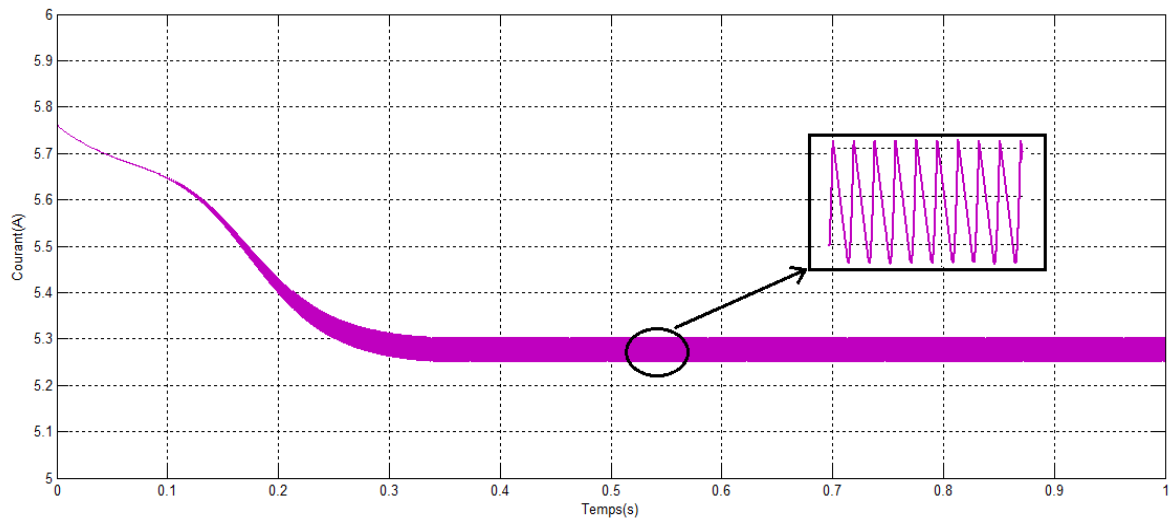


Figure 3.8 Courant de sortie du module photovoltaïque

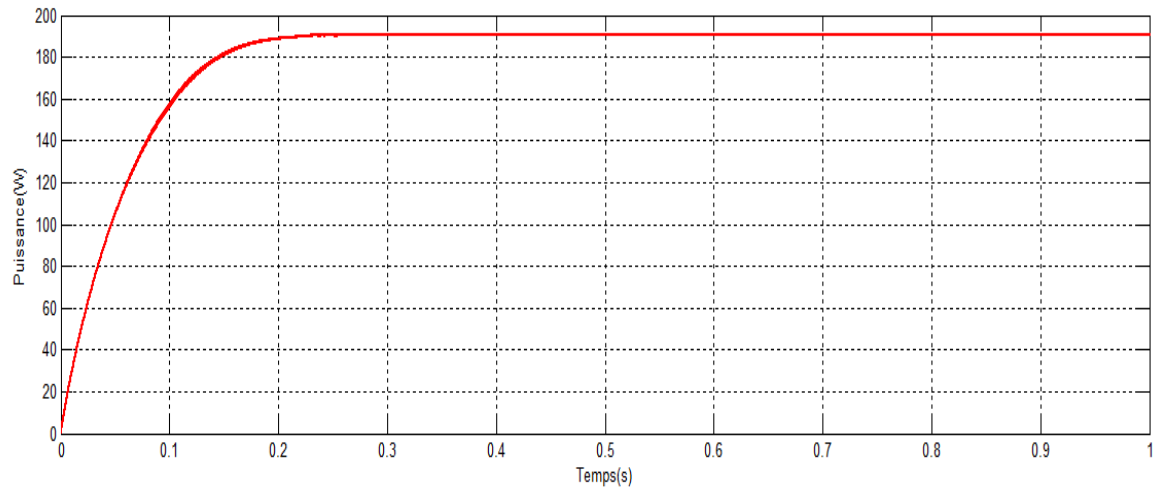


Figure 3.9 Puissance de sortie du module photovoltaïque

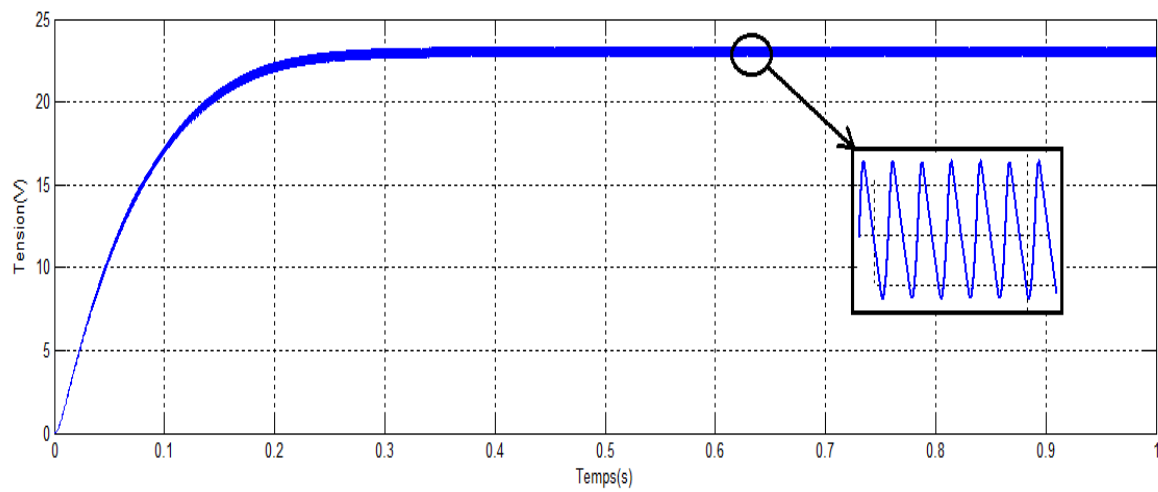


Figure 3.10 Tension charge

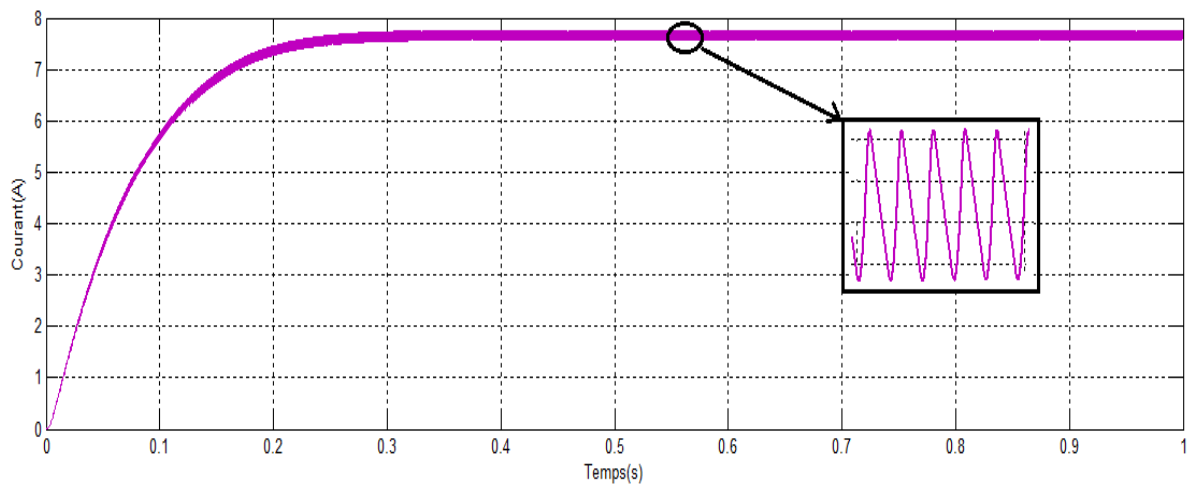


Figure 3.11 Courant de charge

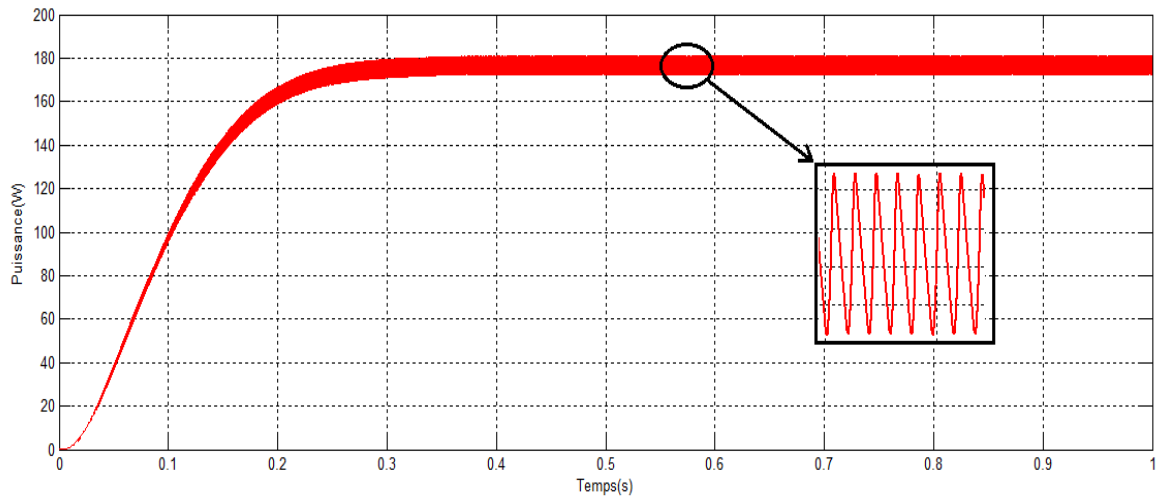


Figure 3.12 Puissance de charge

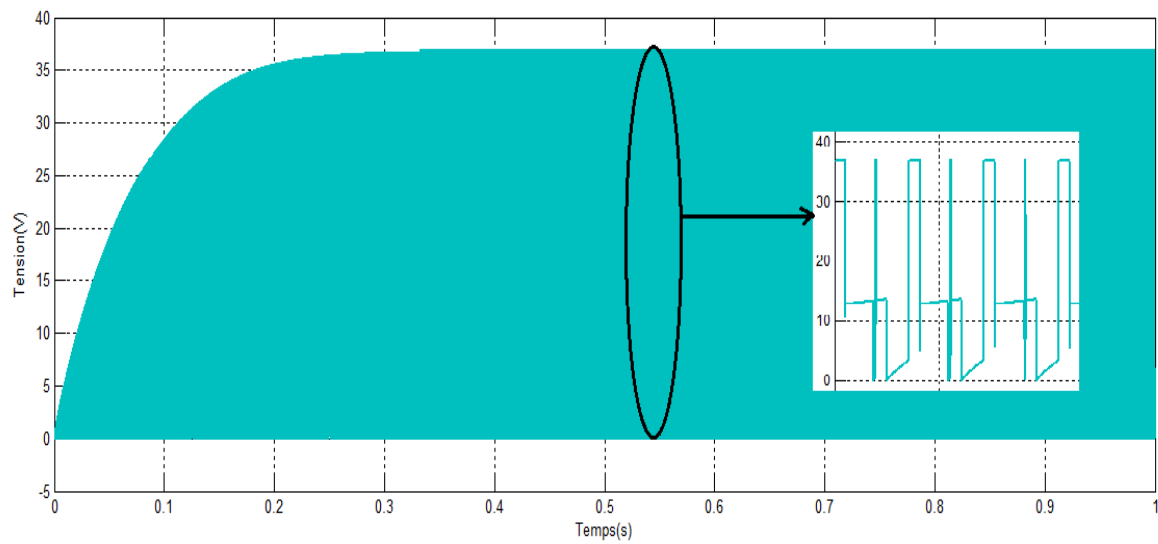


Figure 3.13 Tension aux bornes de l'interrupteur (Mosfet)

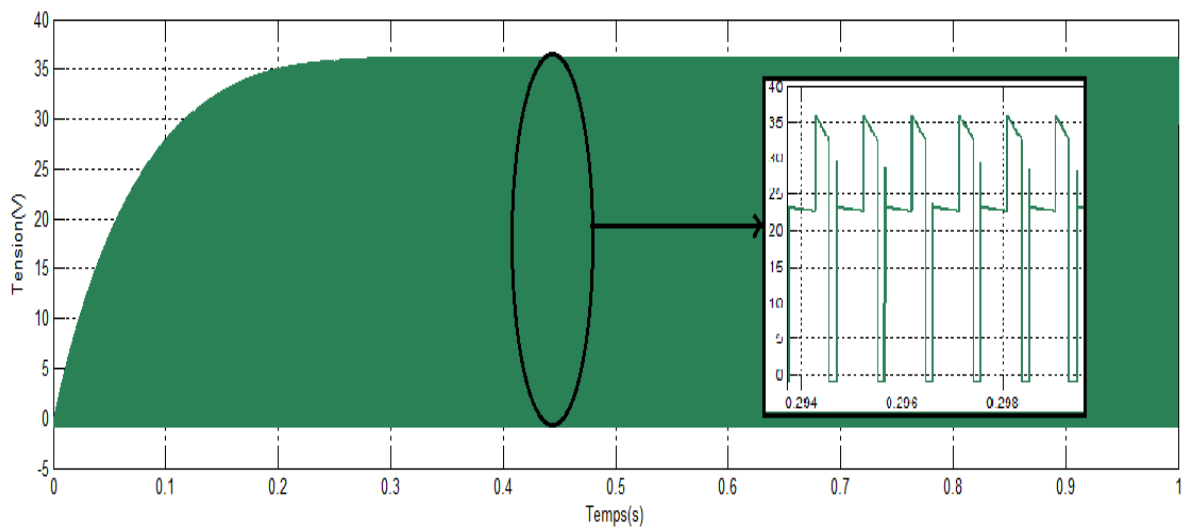


Figure 3.14 Tension à la borne de la diode

3.5. Simulation d'un système photovoltaïque à base d'un hacheur à trois niveaux

On simule le fonctionnement d'un système photovoltaïque commandé en MPPT, alimentant une charge résistive à travers un hacheur à trois niveaux. Les spécifications du panneau photovoltaïque et du circuit du système sont indiqués dans les tableaux (3.1) et (3.2). Le condensateur flottant du hacheur à trois niveaux a la capacité $C = 0.005$ F. La fréquence de commutation du hacheur, imposée par la fréquence de la porteuse en dent de scie, est de 1kHz. La simulation est réalisée à l'aide du logiciel MATLAB/Simulink. La figure (3.15) indique le schéma de simulation.

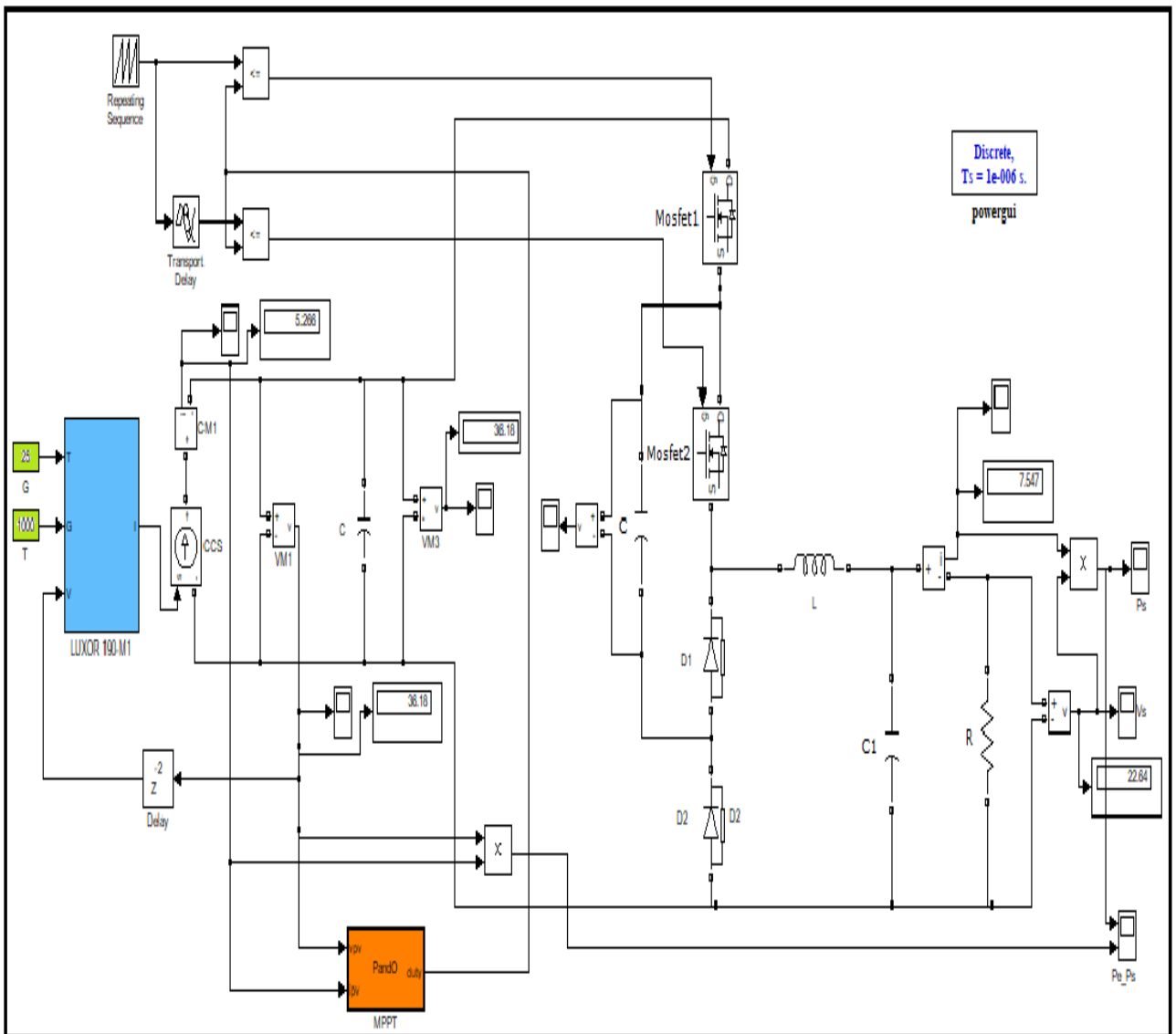


Figure 3.15 Schéma de simulation d'un système PV à base de hacheur à trois niveaux

On simule le fonctionnement de a cascade avec irradiation solaire fixe à 1000 W/m^2 , et température fixe à 25°C .

Les résultats de simulation sont indiqués sur les figures (3.16 à 3.24)

Après un court régime transitoire, la tension (figure 3.16), le courant (figure 3.17) et la puissance (figure 3.18) se stabilisent à des valeurs correspondantes au point de puissance maximale (37 V, 5.3 A et 190W). Le Zoom sur les trois signaux montre des petites ondulations et oscillations à cause de la commutation du convertisseur.

La tension de sortie et courant de sortie (figure 3.19 et 3.20) prennent des valeurs qui correspondent au tension et courant du panneau et au rapport cyclique du hacheur. La tension de sortie (23 V) est logiquement inférieure à celle du panneau et le courant de sortie (7. A) est supérieur à celui du panneau.

La figure (3.21) indique la puissance mesurée à la sortie du système (185 W). Elle est légèrement inférieure à celle du panneau (190 W), à cause d'une faible consommation de puissance au niveau des quatre interrupteurs du hacheur.

La tension du condensateur flottant, indiquée à la figure (3.22), est égale en régime permanent à (18V). Cette valeur est pratiquement égale à la moitié de la tension de sortie du panneau photovoltaïque (37 V), ce qui permet de donner à la tension de sortie trois niveaux de tension possible.

Les tensions aux bornes des interrupteurs sont indiquées à la figure (3.23) et (3.24.) Le zoom montre un basculement entre zéro et 18V, qui est la moitié de la tension d'entrée du hacheur, ce qui prouve l'avantage de l'utilisation du hacheur à trois niveaux par rapport au hacheur à deux niveaux, pour le quelle ces tensions basculent entre zéro et la pleine tension d'entrée, égale à 37 V, comme indiqué précédemment (figures 3.13 et 3.14).

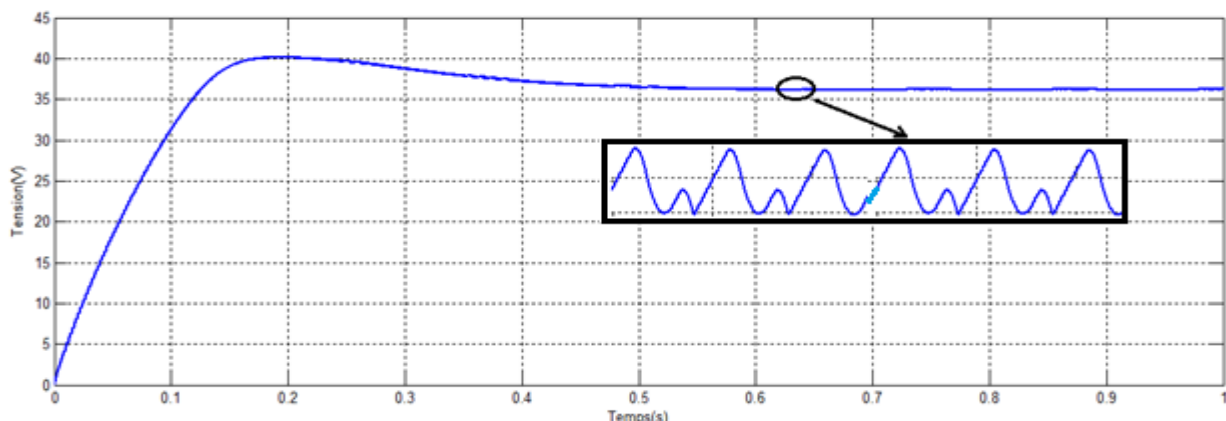


Figure 3.16 Tension de sortie du module photovoltaïque

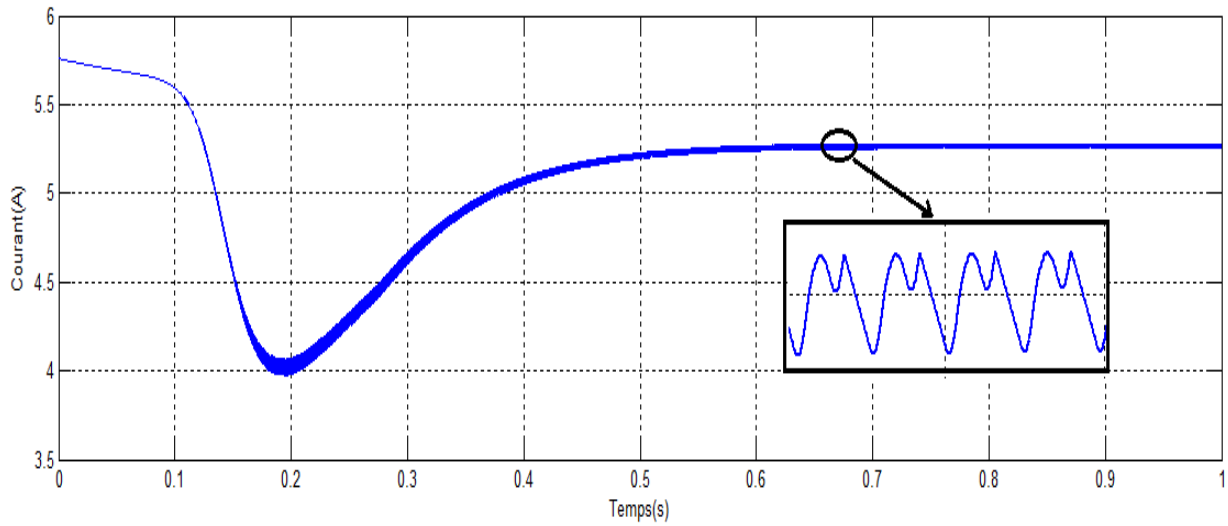


Figure 3.17 Courant de sortie du module photovoltaïque

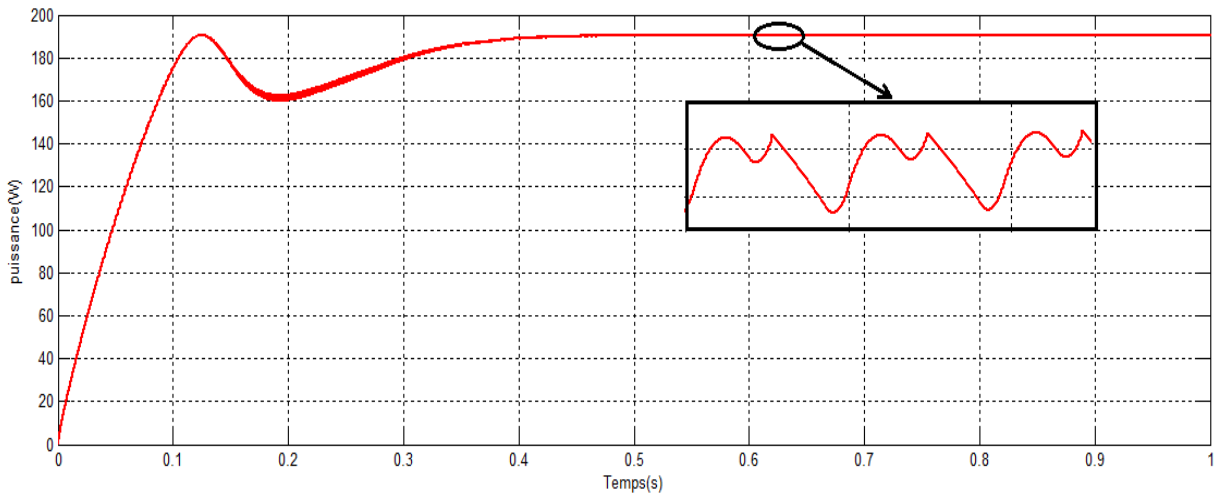


Figure 3.18 Puissance de sortie du module photovoltaïque

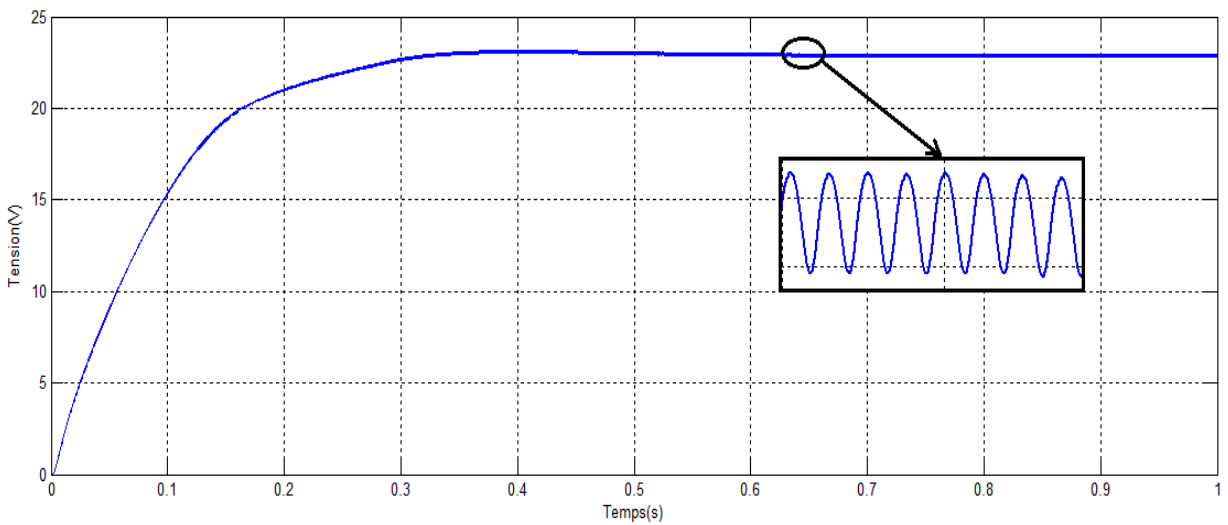


Figure 3.19 Tension de charge

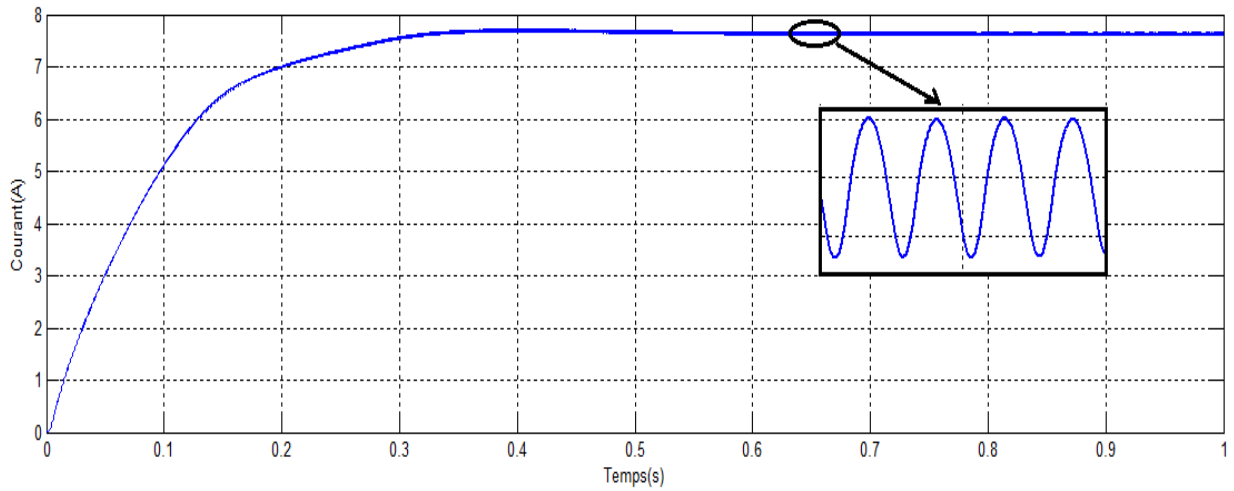


Figure 3.20 Courant de charge

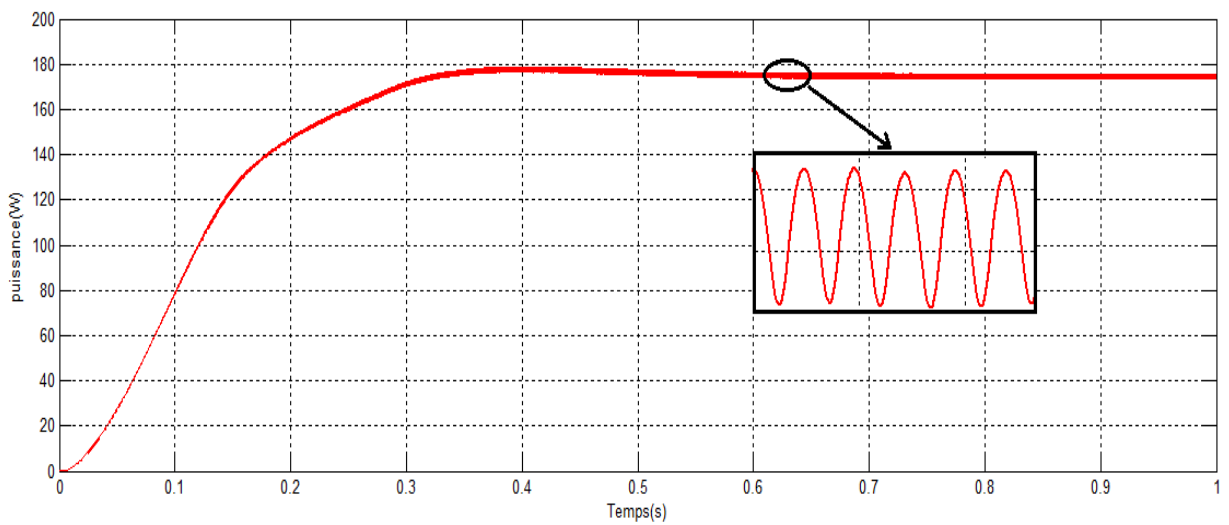


Figure 3.21 Puissance charge

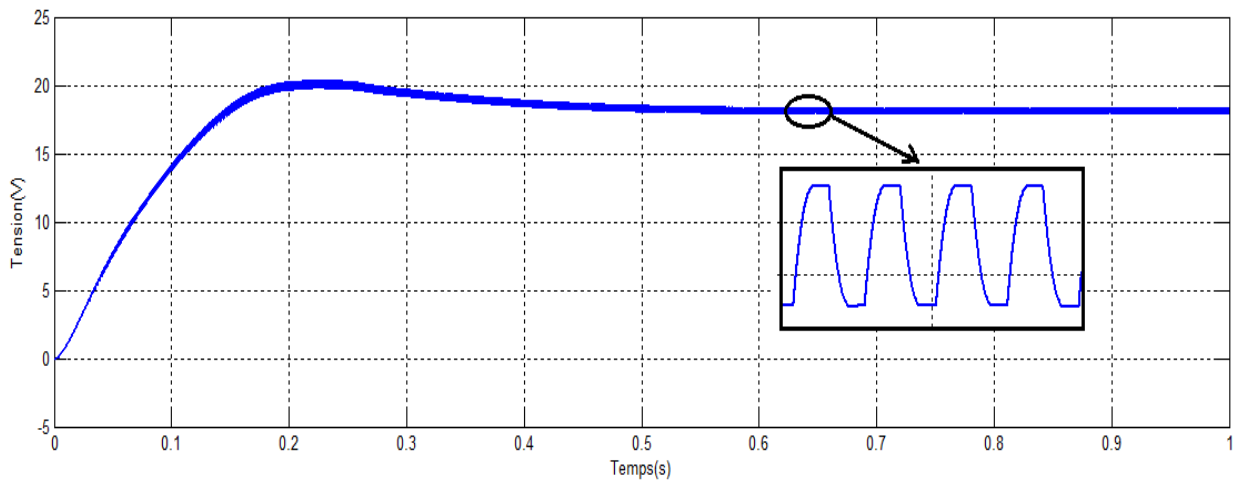


Figure 3.22 Tension à la borne du condensateur flottant (U_c)

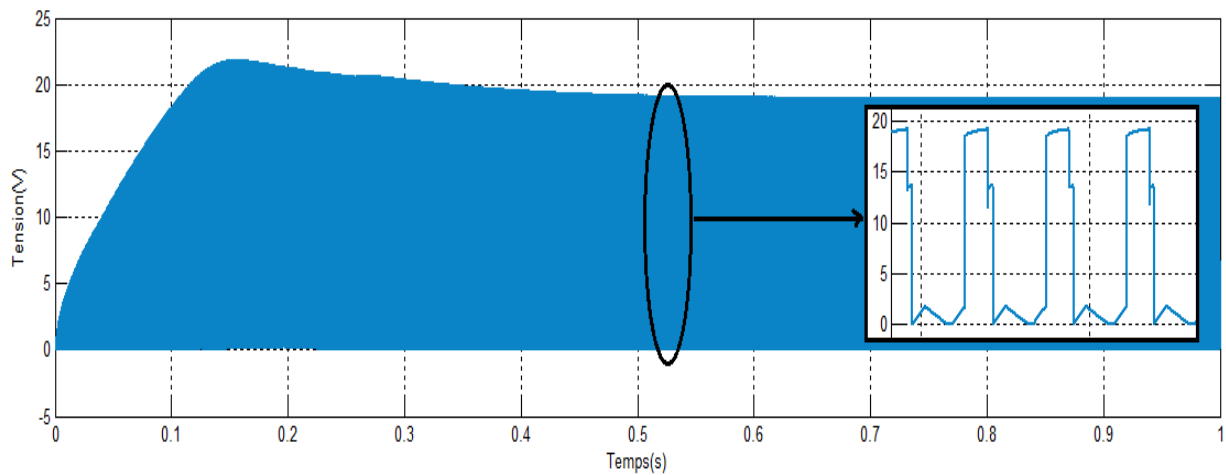


Figure 3.23 Tension aux bornes de l'interrupteur (Mosfet)

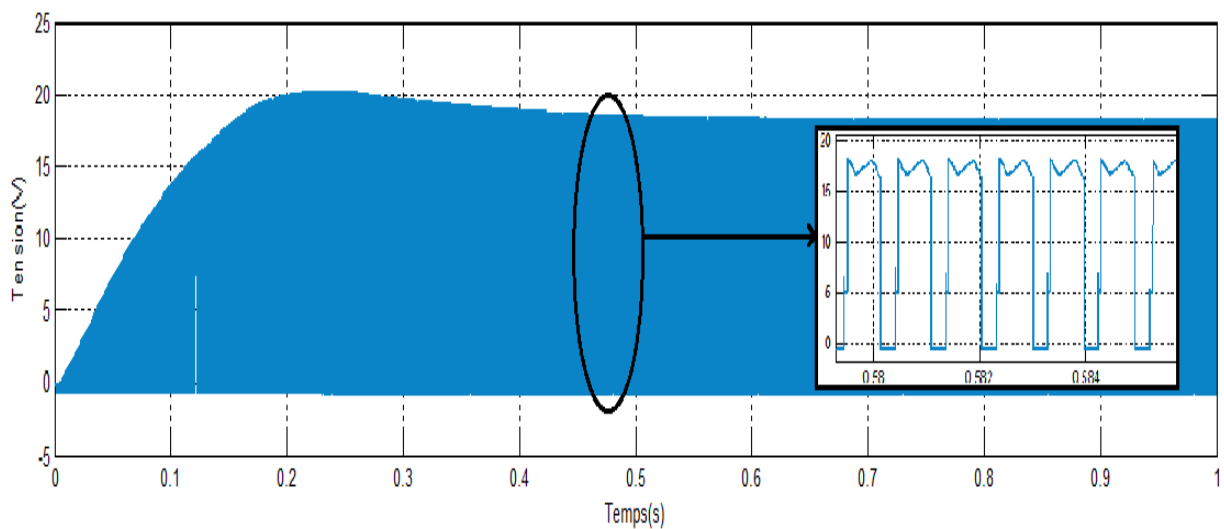


Figure 3.24 Tension aux bornes de la diode

3.6. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons simulé et comparé deux systèmes photovoltaïques : Le premier à base d'un hacheur à deux niveaux et le deuxième à base d'un hacheur à trois niveaux. La commande en MPPT Perturb & Observ est appliquée sur les deux systèmes.

Les résultats de simulations montrent la validité de l'algorithme à imposer la poursuite du point de puissance maximale. Nous avons constaté une légère différence entre les puissances d'entrée et de sortie des convertisseurs, due à la consommation de ceux-ci.

Nous avons montré l'avantage d'un hacheur à trois niveaux par rapport au hacheur à deux niveaux, à savoir la réduction des efforts de tension imposés sur les interrupteurs lors de la commutation.

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVE

Notre travail présenté porte sur l'analyse d'une étude et simulation d'un système photovoltaïque à base d'un hacheur à trois niveaux, adapté par une commande MPPT simple qui assurant la poursuite de la puissance maximale fournie par le module PV dans matlab/simulink

Dans un premier temps, nous avons étudié le générateur PV, et fait la modélisation du module PV ainsi ses paramètres électriques.

Nous avons étudié, dans un deuxième temps, les types des convertisseurs continu-continu. Nous avons exposé leur types et leurs principes et étapes de fonctionnement. Nous avons simulé leurs fonctionnement en mettant l'accent sur les convertisseurs multiniveaux et leurs avantages par rapport aux convertisseurs à deux niveaux.

Dans le troisième temps, nous avons simulé le fonctionnement et la commande en MPPT d'un système photovoltaïque composé des éléments : suivantes générateur, hacheur, charge résistive. Nous avons tenu compte du cas d'un hacheur à deux niveaux et le cas d'un hacheur à trois niveaux, et nous avons montré à travers la simulation les avantages de l'utilisation du hacheur à trois niveaux par rapport au hacheur à deux niveaux.

Les perspectives envisagées dans le cadre de ce travail sont :

- ❖ Exploitation de nouveaux algorithmes MPPT (logique floue, Incrément de Conductance (IncCond), ...etc.) ;
- ❖ Introduction d'autres types des convertisseurs DC/DC multiniveaux,
- ❖ Etudes des systèmes multiétages, ayant un convertisseur continu-continu, en plus d'un convertisseur continu-alternatif, pour pouvoir alimenter des charges alternatives ou faire la connexion au réseau électrique.

Références Bibliographiques

- [1] SAADA.N - OUAZAR.A, «Méthodes d'identification des Panneaux photovoltaïques» Mémoire de master, Université A.MIRA BEJAIA, 2015.
- [2] IBGE « LE PHOTOVOLTAÏQUE – MODULE 3 – FONCTIONNEMENT ET TECHNOLOGIES» BRUXELLE, November 2010.
- [3] I. sari – Ali, B, «Benyoucef, B. Chiekh – Bled « ETUDE DE LA JENCTION BN D'UN SEMI CONDUCTEUR A L'EQUILIBRE THERMODINAMIQUE » Journal of électron devices, Vol. 5, 2007, pp. 122-126
- [4] S. Vighetti, «Systèmes photovoltaïques raccordés au réseau : Choix et dimensionnement des étages de conversion, » no. L'Institut polytechnique de Grenoble, 2010.
- [5] H. KAMELIA, «Modélisation D'une Cellule Photovoltaïque : Etude Comparative, » no. UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI DE TIZI-OUZOU, 2012.
- [6] K. Helali, «Modélisation d'une cellule photovoltaïque : étude comparative», Mémoire de Magister, UMMTO, 2012.
- [7] Lalouni Sofia, « Etude, commande ET simulation d'une chaine hybride (photovoltaïque-eolienne) de production d'énergie électrique », Thèse de Doctorat en Science, université de Bejaia, 2009.
- [8] «FPGA en utilisant la carte ML605», Université Mohamed Boudiaf Msila, 2018.
- [9] S. PETIBON « Nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques », université de Toulouse, 2009.
- [10] L. ABBASSEN, « Etude de la connexion au réseau électrique d'une centrale photovoltaïque» Mémoire de magister, université mouloud Mammeri Tizi ouzzo, 2011.
- [11] <https://lenergie-solaire.net/energie-solaire-photovoltaique/panneauphotovoltaïque>
- [12] SMAIL SEMAOUI, « Etude de l'électrification d'un village avec de l'énergie solaire photovoltaïque » Mémoire de MAGISTER, 2014
- [13] M.H. Rashid, «Power Electronics Handbook», Academic Press, 2001. Bibliographies.
- [14] M. Biswal, «Control Techniques for DC-DC Buck Converter with Improved Performance», Master Thesis, National Institute of Technology, Rourkela, March 2011.
- [15] C. Chabert and A. Rufer, «Optimisation des Convertisseurs de Puissance Embarqués: Adaptation Des Cellules A Lien Alternatif MF Et Commutation Douce, » 8 ème Colloque Electronique de Puissance du Future, Lille, France, Novembre Décembre 2000.
- [16] <http://fr.wikipedia.org>, consulter le: mars 2017
- [17] «Etude sur la Commande du Hacheur Quatre Quadrants», Mémoire de Master, 2013, Université Larbi Ben M'hidi-Oum El Bouaghi, Département Sciences & Technologie.
- [18] Nettari Y., «Commandes robustes et intelligentes des convertisseurs DC-DC», Mémoire de Master, Université Ferhat Abbas Sétif, 2014.
- [19] Sorin Gusia, « Modélisation des systèmes électroniques de puissance à commande MLI Application aux actionnements électriques » Thèse de doctorat, Septembre 2005.

- [20] P. Bartholoméus, « Contribution à l'étude des redresseurs à facteur de puissance quasi unitaire fonctionnant en mode multiniveaux. Application au chargeur de batteries ». Thèse de doctorat, Université des Sciences et Technologies de Lille, 1996.
- [21] R. Merahi, R. Chenni, «amélioration de la commande p&o par une détection synchrone du courant de batterie», université des frères mentouri route de Ain el bey de Constantine, 2011
- [22] Touil Nacer Eddine, Ghenbazi Slimane, Lammouchi zakaria, «modélisation et simulation d'un système photovoltaïque», master académique : université echahid hama lakhder d'el-oued faculté des sciences et de la technologie, el-oued, 2015.
- [23] M. Amarouayache, « contribution à l'optimisation d'une chaine de conversion d'énergie photovoltaïque », thèse de doctorat Université Constantine 1, 2014.
- [24] I. Boudjamaa, « modélisation et commande d'un système de stockage photovoltaïque », mémoire de magister, abou-bakr belkaid- Tlemcen, 2012

