



DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE

MEMOIRE

DE FIN D'ETUDES POUR L'OBTENTION DU DIPLOME DE MASTER EN

ELECTROTECHNIQUE INDUSTRIELLE

THEME

**Commande d'une chaine photovoltaïque à base d'un
hacheur Boost multi-niveaux**

Présenté par le binôme :

- Chegrouche Fatima
- Kaabi Zineb

Devant le jury :

- | | | |
|-------------------------|------------|------------------|
| - Amieur Toufik | Professeur | Président |
| - Djebbar Mohamed Salah | MCA | Encadreur |
| - Aziz Boukadoum | Professeur | Examineur |

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

A decorative floral element consisting of a central flower with several leaves and smaller buds, positioned at the top left of the calligraphic text.

Résumé :

Les systèmes solaires dépendent de cellules photovoltaïques qui transforment directement l'énergie solaire en électricité. Pour assurer l'efficacité et la stabilité de la production d'énergie, un contrôle efficace de ces systèmes est essentiel. Les convertisseurs DC-DC jouent un rôle central dans ces systèmes en augmentant la tension de sortie des panneaux solaires pour répondre aux exigences des charges électriques. Afin d'améliorer les performances des systèmes photovoltaïques, la technique de recherche du point de puissance maximale (MPPT) est utilisée pour extraire la puissance maximale des panneaux solaires sous des conditions variables, L'utilisation d'un convertisseur multi-niveaux contribue à améliorer l'efficacité de conversion de l'énergie et à accroître la stabilité du système.

Ce travail se concentre sur l'étude et le contrôle d'un système photovoltaïque en utilisant la technique MPPT avec un convertisseur Boost multi-niveaux. L'objectif est d'améliorer l'extraction d'énergie à partir des panneaux solaires et d'assurer la stabilité et la compatibilité des tensions avec les différentes exigences des charges électriques.

Mots clés : hacheur multi-niveau, Boost, MPPT

المخلص:

تعتمد أنظمة الطاقة الشمسية على خلايا فوتوفولطية تحول الطاقة الشمسية مباشرة إلى طاقة كهربائية. لضمان كفاءة واستقرار إنتاج الطاقة، يعد التحكم الفعال في هذه الأنظمة أمرًا أساسيًا. تلعب محولات التيار المستمر-التيار المستمر (DC-DC) دورًا محوريًا في هذه الأنظمة من خلال زيادة الجهد الناتج من الألواح الشمسية لتلبية متطلبات الأحمال الكهربائية. ومن أجل تحسين أداء أنظمة الطاقة الشمسية، يتم استخدام تقنية تتبع نقطة القدرة القصوى (MPPT) لاستخراج أقصى طاقة ممكنة من الألواح الشمسية تحت ظروف متغيرة. يُساهم استخدام محول متعدد المستويات في تحسين كفاءة تحويل الطاقة وزيادة استقرار النظام.

يتمركز هذا العمل على دراسة وتحكم في نظام فوتوفولطي باستخدام تقنية MPPT مع محول Boost متعدد المستويات. الهدف هو تحسين استخراج الطاقة من الألواح الشمسية وضمان استقرار وتوافق الجهد مع متطلبات الأحمال الكهربائية المختلفة. الكلمات المفتاحية: المقطع متعدد المستويات، Boost، النقطة القصوى للاستطاعة (MPPT).

Abstract:

Solar systems rely on photovoltaic cells that directly convert solar energy into electricity. Ensuring efficient and stable energy production requires effective control of these systems. DC-DC converters play a pivotal role by increasing the output voltage from solar panels to meet electrical load requirements. To enhance photovoltaic system performance, the Maximum Power Point Tracking (MPPT) technique is used to extract maximum power from solar panels under varying conditions. The use of a multi-level converter contributes to improving energy conversion efficiency and enhancing system stability.

This work focuses on studying and controlling a photovoltaic system using MPPT with a multi-level Boost converter. The objective is to improve energy extraction from solar panels and ensure voltage stability and compatibility with different electrical load requirements.

Keywords: Chopper Multi-level, Boost, MPPT.

Remerciement

Nous remercions premièrement Dieu qui nous a donné ce bien là et que nous vivons ce jour et nous à donner la force et la patience pour terminer ce travail.

Nous tenons à exprimer nos remerciements à notre encadrant, M.Djebbar Mohammed Saleh, le propriétaire de la haute morale, dont nous avons beaucoup bénéficié de l'entreprise et a beaucoup gardé dans notre équilibre des connaissances.

Nous aimerions aussi en être témoins Gratitude pour sa patience et le soutien qu'il nous a apporté Il a été très utile pour mener à bien nos travaux. Nous remercions vivement Dr. Amieur Toufik, et Dr. Aziz Boukadoum d'avoir accepté de faire partie de ce jury en tant qu'examineur.

Et merci et le groupe électrotechnique industriel pour l'expérience universitaire que nous avons passé avec eux

Merci beaucoup aux professeurs qui nous a rendu très heureux M. Djamel Ounnas et Soufi Yousef.

Enfin, nous remercions toutes les personnes, qui ont contribué de près ou de loin, directement ou indirectement à l'aboutissement de ce travail.

Merçi à tous.

Dédicace

Louange à Dieu pour m'avoir permis d'accomplir cela en premier lieu.

Je dédie ce travail à :

- À celui qui un jour m'a dit : "Ma fille grandira et décrochera les plus hautes distinctions." Mon cher grand-père, que son âme repose en paix.
- À l'âme de ma grande mère qui nous a accompagné pendant notre enfance avec ton d'amour, qu'elle repose en paix.
- À mes précieux parents.
- À ma sœur et mon petit frère, Meriem et Mohammed El-Imam.
- À toutes mes chères amies fidèles.

Kaabi Zineb

Dédicace

Merci Allah Dieu pour le frisson de l'accomplissement, et

Merci Allah Dieu au début et à la fin.....

À mon père, qui a éclairé mon chemin et mon modèle à mon soutien moral ,la source de joie et bonheur qui s'est sacrifiée pour me voir réussir.

À ma mère aimante, l'étreinte chaleureuse et mon ciel, qui ne m'a jamais quitté et ma journée n'est pas complète sans elle.

À mes sœurs « Kenza, Taqwa, Sabrina, nadine »qui m'ont toujours soutenue et soutenue tout au long de mon parcours éducatif.

À celui qui a inlassablement tendu la main dans mes moments de faiblesse, Mon frère « Antar », que Dieu te garde comme un côté inébranlable pour moi.

A tous mes amis, proches et camarades en souvenir de tout ce que nous avons pu partager

Fatima Chegrouche

Sommaire

Résumé

Remerciement

Dédicace

Liste des figures

Liste des tableaux

Liste des symboles

Introduction général 1

Chapitre I : Généralités sur les systèmes photovoltaïques

I.1 Introduction 3

I.2 L'énergie solaire 3

I.3 Le rayonnement solaire 4

I.3.1 Types de rayonnement solaire 5

I.3.2 Le spectre de rayonnement solaire 5

I.4 Gisement solaire en Algérie..... 6

I.5 Composition d'un système photovoltaïque..... 7

I.5.1 Cellule photovoltaïque 7

I.5.1.1 Définition 7

I.5.1.2 Principe de photovoltaïque 7

I.5.1.3 Les différentes technique des cellules photovoltaïque 8

I.5.2 Module PV (panneau) 9

I.5.2.1 L'association d'une module PV (série, parallèle, série parallèle)..... 10

I.5.3 Générateur PV 12

I.6 Modélisation de la cellule PV..... 12

I.6.1 schéma équivalent de cellule PV idéal..... 12

I.6.2schéma équivalent de cellule PV d'une seule diode 13

I.6.3 schéma équivalent de cellule PV de deux diodes..... 15

I.7 Caractéristique électrique d'une cellule Photovoltaïque 15

I.7.1 Caractéristique courant tension (I_{pv} - V_{pv}) 16

I.8 simulation de la cellule PV..... 17

I.9 simulation du module PV (panneau)..... 19

I.10 Influence de température et de l'éclairement sur un module photovoltaïque..... 20

I.10.1 Influence de la température 20

1.10.2 Influence de l'éclaircissement.....	21
I.11 Les différent types du système PV	22
1.11.1 Systèmes autonomes.....	22
1.11.2. Système hybrides.....	23
1.11.3. Systèmes accordés au réseau	24
I.12 Conclusion	25

Chapitre II : convertisseur DC/DC contrôlé en MPPT

II.1. Introduction.....	27
II.2 Le convertisseur DC/DC	27
II.3 structures de base des convertisseurs DC/DC	28
II.4 Le commutateur de puissance à semi-conducteurs	28
II.4.1 Composants de puissance (IGBT, MOSFET).....	28
II.4.2 Tableau composant de puissance	29
II.4.3 Evolution de tension et du courant	30
II.4.4 Limites fréquence de coupage-puissance apparent commutée.....	30
II.4.5 Technologies de semi-conducteur modernes.....	30
II.5. Représentation du convertisseur DC/DC	31
II.6. Domaine d'application des hacheur.....	32
II.7. Différents types des hacheurs	32
II.7.1. Hacheur Buck (série).....	32
II.7.2. Hacheur Boost (parallèle).....	32
II.7.2.1 Principe de fonctionnement de l'hacheur Boost (parallèle, élévateur).....	33
II.7.3. Hacheur Buck-Boost.....	37
II.8. Modélisation d'un Boost a seul niveau	38
II.8.1. Le structures	38
II.8.2. Obtention du modèle d'état instantané.....	40
II.8.3. Le model moyen.....	40
II.8.4 Etude de l'état d'équilibre.....	40
II.8.5 Linéarisation autour de l'état d'équilibre (x_e, α_e).....	41
II.9. Dimensionnement et choix des composants L et C de l'hacheur Boost.....	42
II.10. Technique MPPT.....	42
II.11 Principe de recherche du pont du puissance maximal	43
II.12. Type d'algorithme de MPPT.....	43
II.12.1. Algorithmes perturber et observer (P&O)	43

II.12.2. Algorithmes de la conductance incrémentale (INC)	45
II.13 Simulation.....	46
II.13.1. Calcul des valeurs des composants L et C du Boost	46
II.13.2. Simulation d'un hacheur boost à un seul niveau contrôlé en MPPT.....	47
II.13.2.1. Simulation avec La méthode P&O	47
II.13.2.2. Simulation avec La méthode incrémentale	50
II .14. Etude comparative entre les deux méthode P&O et L'incrémentale	52
II.15 Conclusion.....	53

Chapitre III : Modélisation et simulation des convertisseur Boost multi-niveaux

III.1 Introduction	55
III.2 Hacheurs multi-niveaux.....	55
III.3. Différentes topologies de le hacheur multi-niveaux.....	55
III.4. Modélisation des hacheur Boost multi-niveaux	57
III.4.1. Modèle moyen de convertisseur DC/DC multi-niveaux.....	57
III.4.2. Modélisation d'un hacheur Boost à deux niveaux	58
III.4.2.1. Le structures.....	58
III.4.2.2. Obtention du modèle d'état instantané	61
III.4.2.3 Le model moyen.....	61
III.4.2.4. Etude de l'état d'équilibre.....	61
III.4.2.5. Linéarisation autour de l'état d'équilibre (x_e, α_e).....	62
III.4.3. Modélisation du hacheur Boot de trois niveau	62
III.4.3.1. Le structures.....	62
III.4.3.2. Obtention du modèle d'état instantané	66
III.4.3.3. La modèle moyen	66
III.4.3.4. Etude de l'état d'équilibre	66
III.4.3.5. Linéarisation autour de l'état d'équilibre (x_e, α_e).....	66
III.5. Simulation et résultats	67
III.5.1. Calcul des valeurs des composants L et C du Boost à deux niveaux.....	67
III.5.1.1 Simulation du hacheur Boost à deux niveaux	68
III.5.2 Calcul des valeurs des composants L et C du Boost à trois niveaux.....	72
III.5.2.1 Simulation du hacheur Boost à trois niveaux.....	73
III.6 Tableaux récapitulatif de l'étude d'un hacheur Boost multi-niveaux	77

III.7 Conclusion	78
-------------------------------	-----------

Chapitre IV : Commande d'un moteur MCC par un hacheur Boost à deux niveaux

IV.1 Introduction.....	80
-------------------------------	-----------

IV.2 Commande d'un moteur MCC par un hacheur Boost à deux niveaux	80
--	-----------

IV.2.1 Relation de la vitesse du moteur en fonction de la tension de l'induit.....	80
---	-----------

IV.2.2 Réglage de la vitesse du moteur par la tension de sortie de l'hacheur Boost à deux niveaux	81
--	-----------

IV.2.3 Régulation de la tension de sortie	82
--	-----------

IV.3 Commande du moteur MCC par un hacheur Boost à deux niveaux.....	83
---	-----------

IV.3.1 Structure générale	83
--	-----------

IV.3.2 Simulation	83
--------------------------------	-----------

IV.3.3 Simulation et interprétations	86
---	-----------

IV.4 Conclusion.....	95
-----------------------------	-----------

Conclusion général	96
---------------------------------	-----------

Bibliographie	97
----------------------------	-----------

Listes des figures

Chapitre I : Généralités sur les systèmes photovoltaïques

Figure I.1 : Le principe de l'énergie solaire thermique.....	4
Figure I.2 : le principe de l'énergie solaire photovoltaïque	4
Figure I.3 : Types de rayonnement solaire	5
Figure I.4 : Répartition spectrale du rayonnement solaire hors atmosphère	6
Figure I.5 : carte du monde de l'ensoleillement moyen annuel	7
Figure I.6 : Schéma simplifié de principe de jonction PN	8
Figure I.7 : Cellule photovoltaïque monocristalline.....	8
Figure I.8 : Cellule photovoltaïque poly cristallin.....	9
Figure I.9 : cellule amorphe.....	9
Figure I.10 : Composition d'un module solaire photovoltaïque.	10
Figure I.11 : Caractéristique courant tension de N_s cellule en série	11
Figure I.12 : Caractéristique courant tension de (N_p) cellule en parallèle.....	11
Figure I.13 : Caractéristique courant-tension d'un regroupement série et parallèle des cellules photovoltaïques	12
Figure I.14 : Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque idéale	13
Figure I.15 : Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque réelle.....	14
Figure I.16 : Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque à deux diodes	15
Figure I.17 : Caractéristique courant-tension $I(V)$ et courbe de puissance d'une cellule photovoltaïque.....	17
Figure I.18 : Schéma block de la simulation d'une cellule photovoltaïque.....	18
Figure I.19 : Caractéristique $I(V)$ d'une cellule photovoltaïque.	18
Figure I.20 : Caractéristique $P(V)$ d'une cellule photovoltaïque.	19
Figure I.21 : Caractéristique $I_{pv}=f(V_{pv})$ d'un module photovoltaïque.....	20
Figure I.22 : Caractéristique $P_{pv}=f(V_{pv})$ d'un module photovoltaïque.....	20
Figure I.23 : Influence de la température sur la caractéristique $I_{pv}=f(V_{pv})$ avec un éclairement de 1000W/m^2	21
Figure I.24 : Influence de la température sur la caractéristique $P_{pv}=f(V_{pv})$ avec un éclairement de 1000W/m^2	21

Figure I.25 : Influence de l'éclairement sur la caractéristique $I_{pv}=f(V_{pv})$ avec une température de 25°C 22

Figure I.26 : Influence de l'éclairement sur la caractéristique $P_{pv}=f(V_{pv})$ avec une température de 25°C. 22

Figure I.27 : Exemple d'installation photovoltaïque autonome..... 23

Figure I.28 : Schéma synoptique d'un système photovoltaïque hybride..... 24

Figure I.29 : Schéma d'un système accordé au réseau..... 24

Chapitre II: Convertisseur DC-DC contrôlé en MPPT

Figure II.1 : Principe de base d'un hacheur..... 27

Figure II.2 : Evolution de la tension et du courant « commutable » 30

Figure II.3 : Convertisseur DC/DC (source : tension/ courant ou source : courant/ tension) 31

Figure II.4 : schéma de principe du convertisseur abaisseur 'Buck' 32

Figure II.5: schéma de principe du convertisseur élévateur 'Boost' 33

Figure II.6 : Chronogramme d'un hacheur parallèle 33

Figure II.7 : Schéma équivalent de la phase 1..... 34

Figure II.8 : Schéma équivalent de la phase 2..... 34

Figure II.9: schéma de principe du convertisseur 'Buck Boost'..... 38

Figure II.10: Schéma du hacheur Boost 38

Figure II.11 : Schéma du hacheur Boost quand l'interrupteur est fermé..... 38

Figure II.12 : Model du Boost d'un seul niveau 39

Figure II.13: Schéma du hacheur Boost quand l'interrupteur est ouvert..... 41

Figure II.14 : Schéma simplifié d'un système photovoltaïque à base d'un hacheur 43

Figure II.15: Illustration de la méthode P&O 44

Figure II.16: Algorithme de MPPT à base de la méthode P&O..... 45

Figure II.17 : Positionnement du point de fonctionnement suivant le signe..... 45

Figure II.18 : Algorithme d'une commande MPPT basée sur la méthode Incrément de Conductance..... 46

Figure II.19 : Schéma de la simulation d'un hacheur Boost d'algorithme P&O 47

Figure II.20 : Signal de l'éclairement appliqué..... 48

Listes des figures

Figure II.21 : courant et tension d'entrée en fonction du temps.....	48
Figure II.22 : courant de sortie par la méthode P&O	49
Figure II.23 : tension de sortie par la méthode P&O	49
Figure II.24 : la puissance par la méthode P&O.....	50
Figure II.25 : Schéma de la simulation d'un hacheur Boost d'algorithme (INC)	50
Figure II.26 : Courant et tension d'entrée	51
Figure II.27 : courant de sortie par la méthode INC.....	51
Figure II.28 : Tension de sortie par la méthode INC.....	51
Figure II.29 : la puissance par la méthode INC	52

Chapitre III: Modélisation et simulation des convertisseur Boost multi-niveaux

Figure III.1 : Les différents types de topologie des convertisseur DC-DC Boost multi-niveaux	56
Figure III.2 : Schéma du hacheur Boost (niveau 2).....	58
Figure III.3 : Schéma de l'hacheur Boost (niveau 2) quand l'interrupteur est fermé.....	59
Figure III.4 : Schéma du hacheur boost (niveau 2) quand l'interrupteur est ouvert	59
Figure III.5 : Schéma réduit de l'hacheur Boost (niveau 2) quand l'interrupteur est fermé.....	60
Figure III.6 : Schéma réduit de l'hacheur Boost (niveau 2) quand l'interrupteur est ouvert	61
Figure III.7 : Model du Boost à deux niveaux	62
Figure III.8 : Schéma du hacheur Boost (niveau 3).....	63
Figure III. 9 : Schéma du hacheur Boost (niveau 3) quand l'interrupteur est fermé	63
Figure III.10 : Schéma du hacheur Boost (niveau 3) quand l'interrupteur est ouvert.....	64
Figure III.11 : Schéma réduit du hacheur Boost (niveau 3) quand l'interrupteur est fermé	64
Figure III.12 : Schéma réduit du hacheur Boost (niveau 3) quand l'interrupteur est ouvert	65
Figure III.13 : Model du Boost à trois niveaux	67
Figure III.14 : Schéma de simulation d'un panneau PV avec un hacheur Boost à deux niveaux	68

<i>Figure III.15</i> :Signal de l'éclairement appliqué	69
<i>Figure III.16</i> :Référéncé de tension sortie avec un hacheur Boost à deux niveaux.....	69
<i>Figure III.17</i> :Courant et tension d'entrée en fonction du temps	70
<i>Figure III.18</i> : Courant de sortie avec un Boost à deux niveaux.....	70
<i>Figure III.19</i> : Tension de sortie avec un Boost à deux niveaux	71
<i>Figure III.20</i> : La puissance d'un Boost à deux niveaux	71
<i>Figure III.21</i> : Schéma de simulation d'un panneau PV avec un hacheur Boost à trois niveaux	73
<i>Figure III.22</i> : Signal de l'éclairement appliqué.	74
<i>Figure III.23</i> : Référéncé de tension sortie avec un hacheur Boost à trois niveaux.....	74
<i>Figure III.24</i> :Courant et tension d'entrée en fonction du temps	75
<i>Figure III.25</i> : Courant de sortie avec un Boost à 3niveaux	75
<i>Figure III.26</i> : tension de sortie avec un Boost à 3 niveaux	76
<i>Figure III.27</i> : Puissance avec un Boost à 3 niveaux	76

Chapitre IV: Commande d'un moteur MCC par un hacheur Boost à deux niveaux

<i>Figure IV.1</i> :Filtre passe-bas en sortie permettant d'obtenir une tension quasi constante.	82
<i>Figure . IV.2</i> :Boucle de régulation du hacheur	83
<i>Figure IV.3</i> : structure général de chaine PV.....	83
<i>Figure IV.4</i> :Simulation global du système (GPV + MPPT + Hacheur + Régulateur PI +MCC).....	84
<i>Figure IV.5</i> :Boucle de régulation de la tension de sortie du Boost à deux niveaux.....	84
<i>Figure IV.6</i> :Schéma block de la commande alpha.....	85
<i>Figure IV.7</i> :Tension et courant d'entrée.....	86
<i>Figure IV.8</i> :Puissance d'entrée d'un Boost à deux niveaux	86
<i>Figure IV.9</i> :Tension et courant de sortie d'un hacheur Boost deux niveau	87
<i>Figure IV.10</i> :Puissance de sortie de générateur photovoltaïque	87
<i>Figure IV.11</i> :Vitesse de rotation du moteur.....	88
<i>Figure IV.12</i> :du courant absorbé par l'induit du moteur	89
<i>Figure IV.13</i> :Couple de charge et moteur	89
<i>Figure IV.14</i> :Alpha inferieure 0.80.....	90

Listes des figures

<i>Figure IV.15 :Tension et courant d'entrée d'un hacheur Boost deux niveau</i>	<i>90</i>
<i>Figure IV.16 :Puissance d'entrée du Boost deux niveau</i>	<i>91</i>
<i>Figure IV.17 :Tension de sortie du Boost deux niveau</i>	<i>91</i>
<i>Figure IV.18 :Courant de sortie du Boost deux niveau</i>	<i>92</i>
<i>Figure IV.19 :Puissance de sortie</i>	<i>92</i>
<i>Figure IV.20 :Vitesse de rotation du moteur.....</i>	<i>93</i>
<i>Figure IV.21 : Courant absorbé par l'induit du moteur</i>	<i>93</i>
<i>Figure IV.22 : Couple de charge et moteur</i>	<i>94</i>
<i>Figure IV.23 :Alpha inferieure 0.82.....</i>	<i>94</i>

Liste des tableaux

Chapitre I

Tableau I.1 : Caractéristiques électriques d'une cellule photovoltaïque..... 17

Tableau I.2 : Caractéristiques électriques du module photovoltaïque 19

Chapitre II

Tableau II.1: Comparaison des éléments de l'électronique de puissance..... 29

Tableaux II.2: Tableau récapitulatif des niveaux de puissances et des fréquences des semi-conducteurs..... 30

Chapitre III

Tableaux III.1: Comparatif des différentes structures..... 57

Tableaux III.2: Gain en tension des convertisseurs..... 57

Tableaux III.3 : Récapitulatif sur l'étude du Boost multi-niveaux..... 77

Chapitre IV

Tableau IV.1 : Paramètres des éléments utilisés lorsque la charge est MCC..... 85

Liste des symboles et abréviations

PV	photovoltaïque
AM	Air masse
λ	Longueur d'onde
η	Rendement de conversion
I_{ph}	Photo-courant (A)
I_D	Le courant qui traverse la diode(A)
I	Courant fourni par la cellule(A)
I_0	Le courant de saturation (A)
n	Coefficient d'idéalité de la diode il varie entre 1 et 2.
q	Charge de l'électron ($q = 1,602. C$).
K	Constante de Boltzmann ($K=1,38*10^{-23} J*K^{-1}$)
R_s	La résistance série (Ω)
I_p	Le courant de la résistance parallèle.
R_p	La résistance parallèle (Ω)
V_{CO}	Tension en circuit ouvert .
I_{cc}	Courant de court-circuit
PPM	Le point de puissance maximale
P_M	Puissance maximale
S	Surface de la cellule
FF	Facteur de forme
T	Température de fonctionnement de la cellule PV($^{\circ}k$)
N_S	Nombre de cellules connectées en série par module
V_{CONS}	La somme de tension en circuit ouvert de N_S cellules en série
I_{SC}	Courant de court-circuit de la cellule(A)
N_p	Nombre de modules connectés en parallèle
I_{CCNp}	La somme des courants de court circuit de (NP) cellule en parallèle
V_{CONP}	Tension du circuit ouvert de (NP) cellules en parallèle(V)
DC	Courant continu (direct Current)
DC-DC	Convertisseur statique hacheur
U_e	Tension de entre (V)
U_s	Tension de sortie (V)
α	Le rapporte cyclique
D	Diode
V_{L_moy}	La valeur moyenne de la tension aux bornes de l'inductance(V)
I_s	Courant de sortie (A)
E	Eclairement W/m^2

Liste des symboles et abbreviation

I_L	Le courant dans l'inductance
L	Inductance
F	Fréquence de commutation du convertisseur
C	Condensateur
R	Résistance
MPPT	Maximum Power Point Tracking
GPV	Générateur Photovoltaïque
P&O	Méthode de perturbation et d'observation
INC	Algorithme d'incrémentatation de la conductance
x	Vecteur d'état
u	Vecteur de commande
A	Matrice d'état
B	Matrice de entre
y	Le valeur de sortie
C	Matrice de sortie
X_e	La valeur à l'équilibre de la grandeur x
\tilde{x}	Variation basse fréquence de grandeur x
α_e	Valeur de l'état d'équilibre
E	La tension d'entrée de l'hacheur Boost multi-niveaux

Introduction générale

La technologie des systèmes photovoltaïques est considérée comme une technologie moderne, qui favorise un environnement propre en exploitant les énergies renouvelables pour répondre aux besoins humains, repose sur des cellules photovoltaïques généralement composées de silicium, qui convertissent les rayons du soleil en énergie électrique grâce au phénomène photovoltaïque. Un convertisseur DC-DC Boost est un dispositif électronique essentiel dans un système photovoltaïque car il sert à adapter la tension de sortie des panneaux solaires en augmentant la tension du faible valeur à une tension élevée, et maximiser la puissance afin de répondre aux exigences de la charge électrique et optimiser l'efficacité de la conversion de l'énergie solaire en électricité .

Dans ce cadre, notre étude se concentre sur la commande d'un système photovoltaïque à base de la technique de recherche du point maximal de puissance MPPT via un convertisseur boost multiniveaux. De ce fait, ce mémoire est rédigé en quatre chapitres se termine par une conclusion générale et structuré comme suit :

Dans le premier chapitre, on aborde des généralités sur les systèmes photovoltaïques et ses différents types, à savoir ; les panneaux et ses composants à l'égard de la cellule, module et générateur photovoltaïques. Présente la modélisation et simulation de la cellule PV, ainsi que l'influence de la température et de l'éclairement sur un module photovoltaïque

Dans le deuxième chapitre, on présente le convertisseur DC/DC avec ses différents types, la modélisation et la simulation du Boost à un niveau. On expose également le dimensionnement de l'inductance et de la capacité dans le but d'augmenter la tension de sortie. Puis une mise en œuvre de la technique MPPT associé à un panneau PV, qui assure l'alimentation du boost sous un éclairement variable, est réalisée.

Dans le troisième chapitre, on présente les deux modèles du hacheur à deux et trois niveaux, accompagnés de simulations numériques. Ces simulations mettent en évidence l'efficacité et la pertinence d'un hacheur multiniveaux dans un système photovoltaïque pour augmenter la tension de sortie et garantir la stabilité du système.

Le dernier chapitre, consiste à mettre en œuvre un hacheur Boost à deux niveaux en vue de commander un moteur à courant continu à excitation indépendante (séparée), contrôlé en vitesse par le réglage de la tension d'alimentation de l'induit via le boost à deux niveaux. Les résultats de simulations seront exposés et discutés. En conclusion, on présente une synthèse générale mettant en avant l'importance et la pertinence de notre travail.

Chapitre 01

Généralités sur les systèmes photovoltaïques

I.1 Introduction

Aujourd'hui, l'énergie solaire sous tous ses types thermiques, thermodynamiques et surtout photovoltaïques est incontournable dans le domaine de la production d'énergie électrique, et peut constituer une énergie alternative aux énergies fossiles pour les besoins énergétiques futurs à travers les panneaux solaires.

Ce dernier fait actuellement l'objet de recherches et d'expérimentations pour les scientifiques et les chercheurs afin de développer et d'améliorer la fabrication des modules photovoltaïques en termes de qualité et de coût de fabrication pour exploiter le maximum d'ensoleillement possible et obtenir un rendement très élevé.

Ce chapitre aborde des généralités sur les systèmes photovoltaïques et ses différents types, à savoir ; les panneaux et ses composants à l'égard de la cellule, module et générateur photovoltaïques.

Présente la modélisation et simulation de la cellule PV, ainsi que l'influence de la température et de l'éclairement sur un module photovoltaïque. Les résultats obtenus sont exposés et interprétés.

I.2 L'énergie solaire

L'énergie solaire est l'une des énergies renouvelables, propres et inépuisables qui s'appuie sur l'énorme rayonnement solaire auquel la surface de la Terre est exposée et qui l'exploite pour produire de l'énergie électrique au lieu de compter sur des sources fossiles afin de répondre aux besoins humains dans un environnement sain et propre.

Il existe différents types d'énergies solaires :

➤ L'énergie solaire thermique

Le principe de cette énergie c'est la conversion des rayons du soleil en énergie thermique

(chaleur) grâce au fluide présent dans les panneaux solaires exposés au soleil. Cette énergie est utilisée directement pour le chauffage ou l'eau chaude.

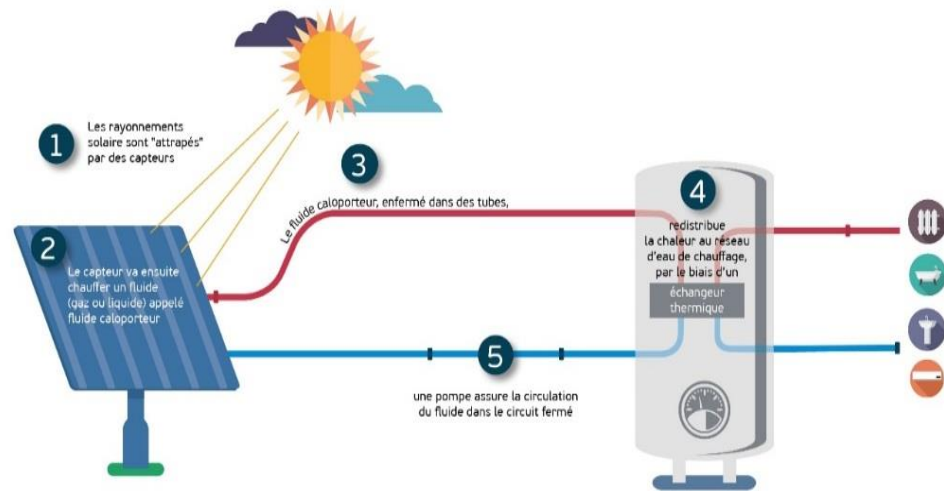


Figure I.1 Principe de l'énergie solaire thermique

➤ L'énergie solaire photovoltaïque

L'un des méthodes le plus connue, le principe de cette énergie est la production d'électricité par des panneaux solaires grâce à l'effet du rayonnement solaire sur la particule lumineuse située dans la cellule solaire.

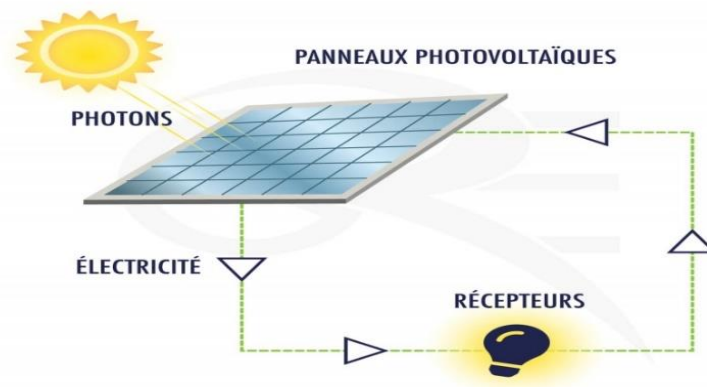


Figure I.2 Principe de l'énergie solaire photovoltaïque

I.3 Le rayonnement solaire

Est l'ensemble des ondes électromagnétiques provient du soleil vers la terre. Il contient un groupe de gamme de rayonnement comme l'ultraviolet (UV) à l'infrarouge en passant par la lumière visible.

I.3.1 Types de rayonnement solaire

On peut distinguer 4 types de rayonnement solaires [1]

- Le rayonnement direct qui atteint la terre depuis le soleil directement sans obstacles et il varie selon la hauteur du soleil à l'horizon.
- Le rayonnement diffus est celui qui provient de l'ensemble de l'atmosphère qui subit à des obstacles qui peuvent repartir un faisceau parallèle en une multitude de faisceaux dans toutes les directions.
- C'est le rayonnement qui est réfléchi par le sol ou par des objets se trouvant à sa surface. Cet albédo peut être important lorsque le sol est particulièrement réfléchissant (eau, neige, etc...).
- Rayonnement globale le rayonnement global est subdivisé en rayonnements directs, diffus et reflété par le sol.

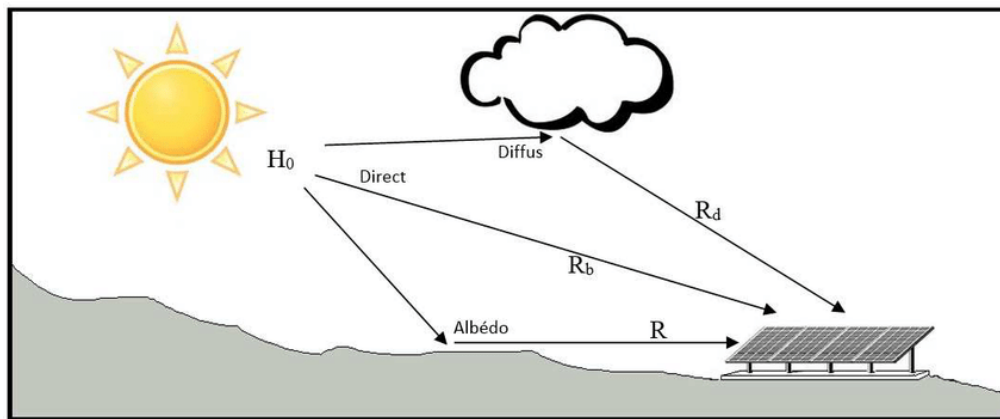


Figure I.3 Types de rayonnement solaire

I.3.2 Le spectre de rayonnement solaire

Le rayonnement solaire couvre un domaine très étendu de longueurs d'onde qu'on appelle le spectre solaire, allant de $10^{-4}\mu\text{m}$ jusqu'à 10^6 cm . Ce spectre comporte trois parties principales [2] :

- Ultraviolet (UV) de longueurs d'onde inférieures à $0,4\ \mu\text{m}$.
- Visible de longueurs d'onde comprises entre $0,4\ \mu\text{m}$ et $0,75\ \mu\text{m}$.
- Infrarouge de longueurs d'onde comprises entre $0,75\ \mu\text{m}$ et $2,4\ \mu\text{m}$.

Le rayonnement solaire se situe principalement dans la gamme des courtes longueurs d'onde, c'est-à-dire les longueurs d'onde inférieures à $4\ \mu\text{m}$ (98%). L'énergie solaire reste donc plus faible dans l'infrarouge. La Figure (I.4) illustre la répartition spectrale du

rayonnement solaire hors atmosphère. L'atmosphère absorbe une partie du rayonnement de sorte que l'éclairement atteignant la surface terrestre dépasse rarement $1,2 \text{ kW/m}^2$. [3]

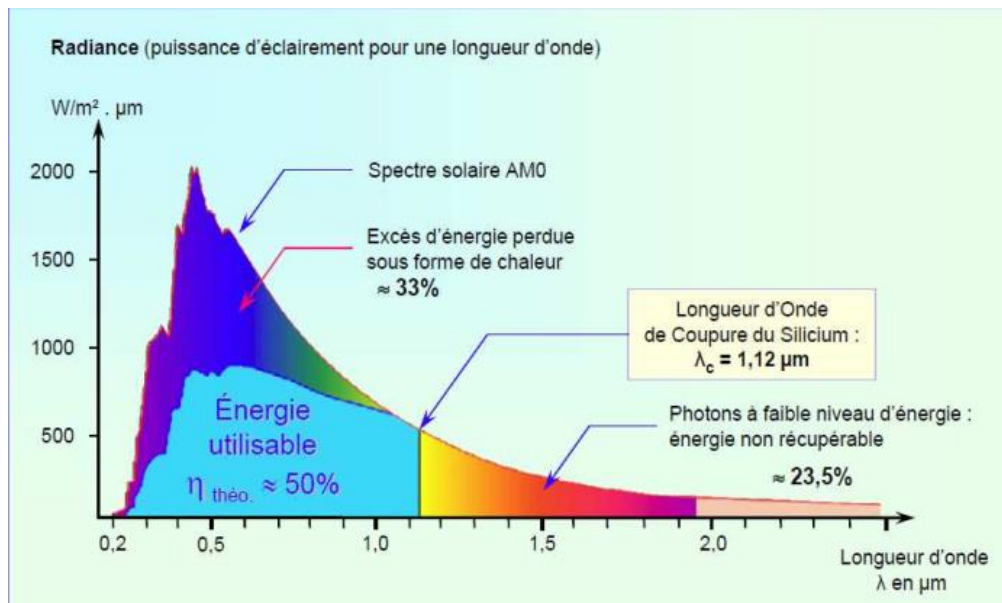


Figure I.4 Répartition spectrale du rayonnement solaire hors atmosphère. [3]

I.4 Gisement solaire en Algérie

Le gisement solaire est un ensemble de données décrivant l'évolution du rayonnement solaire disponible au cours d'une période donnée. Il est utilisé pour simuler le fonctionnement d'un système énergétique solaire et faire un dimensionnement le plus exact possible compte tenu de la demande à satisfaire [4].

Il est utilisé dans des domaines aussi variés que l'agriculture, la météorologie, les applications énergétiques et la sécurité publique [5].

De par sa situation géographique, l'Algérie dispose d'un des gisements solaires les plus élevés au monde comme le montre la figure I.5. [6]

La durée d'insolation sur la quasi-totalité du territoire national dépasse les 2000 heures annuellement et peut atteindre les 3900 heures (hauts plateaux et Sahara). L'énergie reçue quotidiennement sur une surface horizontale de 1 m^2 est de l'ordre de 5 kWh sur la majeure partie du territoire national, soit près de $1700 \text{ kWh/m}^2/\text{an}$ au Nord et $2263 \text{ kWh/m}^2/\text{an}$ au Sud du pays, Ce gisement solaire dépasse les 5 milliards de GWh [7]

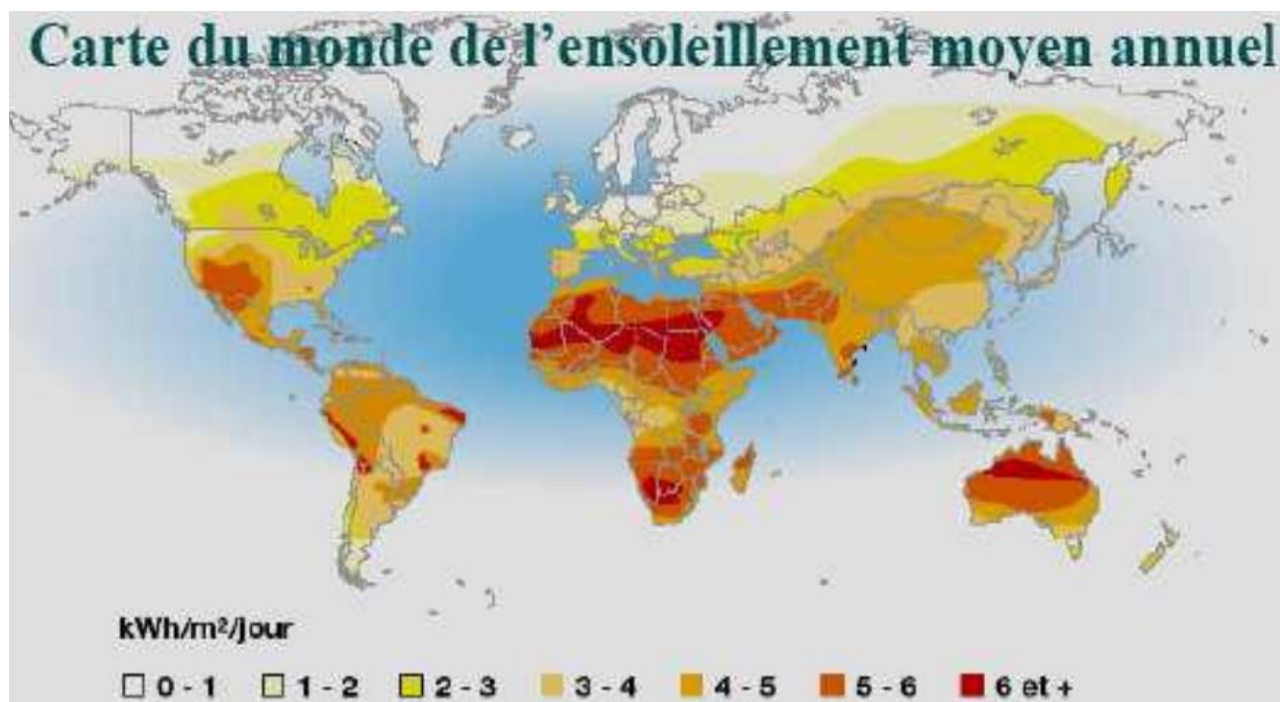


Figure I.5 Carte du monde de l'ensoleillement moyen annuel [6]

I.5 Composition d'un système photovoltaïque

Généralement un système photovoltaïque est composé d'une cellule, module et générateur PV, le paragraphe ci-dessous fait l'objet du système PV.

I.5.1 Cellule photovoltaïque

I.5.1.1 Définition

La cellule photovoltaïque est le plus petit composant du système photovoltaïque, elle est composée de tranches planes produites à base des matériaux semi-conducteurs du type PN qui ont la propriété de convertir l'énergie photonique du soleil en énergie électrique, elle est considérée comme un petit générateur du courant continu. La plupart des cellules photovoltaïques à l'heure actuelle sont fabriquées en silicium.

I.5.1.2 Principe de photovoltaïque

L'effet photovoltaïque utilisé dans les cellules solaires permet de convertir directement l'énergie lumineuse des rayons solaires en électricité par le biais de la production et du transport dans un matériau semi-conducteur de charges électriques positives et négatives sous l'effet de la lumière.

Ce matériau comporte deux parties, l'une présentant un excès d'électrons et l'autre un déficit en électrons, dites respectivement dopée de type N et dopée de type P. Lorsque la

première est mise en contact avec la seconde, les électrons en excès dans le matériau N diffusent dans le matériau P. La zone initialement dopée N devient chargée positivement, et la zone initialement dopée P chargée négativement. Il se crée donc entre elles un champ électrique qui tend à repousser les électrons dans la zone N et les trous vers la zone P. Une jonction PN a été formé [8].

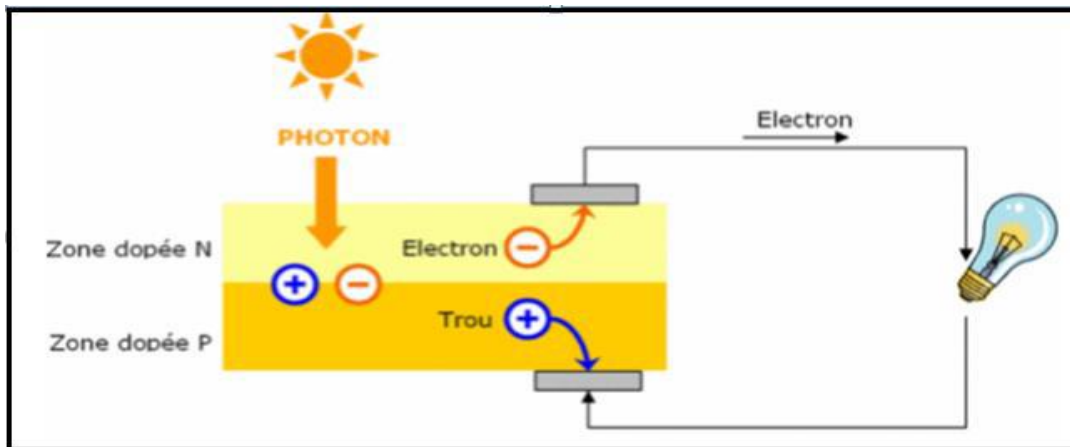


Figure I.6 Schéma simplifié de principe de jonction PN [9]

I.5.1.3 Les différentes technologies des cellules photovoltaïques

Plusieurs techniques permettant la conversion directe de la lumière solaire en électricité, et cela à l'aide de matériaux semi-conducteurs tel que le silicium (Si), le Germanium (Ge), le sélénium (Se) ou les composés semi-conducteurs tel que l'arséniure de gallium (GaAs), ou le tellure de cadmium (CdTe). Les cellules solaires de type GaAs sont très coûteuses dans leur fabrication et leur utilisation est en général limitée aux applications spatiales, mais le matériau le plus utilisé reste le silicium [10].

➤ Cellule monocristalline

Les cellules monocristallines sont des photopiles élaborées à partir de silicium cristallisé en un cristal unique. Leur rendement est de 10 % à 16 %, mais leur fabrication est complexe et consommatrice d'énergie [11].

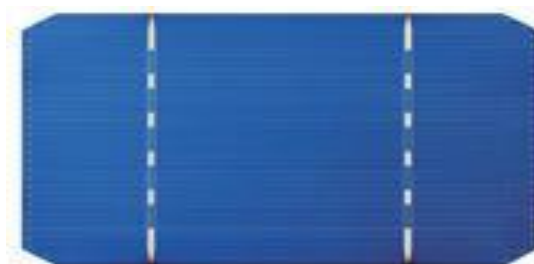


Figure I.7 Cellule photovoltaïque monocristalline.

➤ **Cellule poly-cristallin**

Les cellules poly-cristallines sont fabriquées à partir d'un bloc de silicium cristallisé sous forme de cristaux multiples. Leur rendement moyen est de 11% à 13 % et leur coût de production est un peu moins élevé que celui des cellules monocristallines.[11]

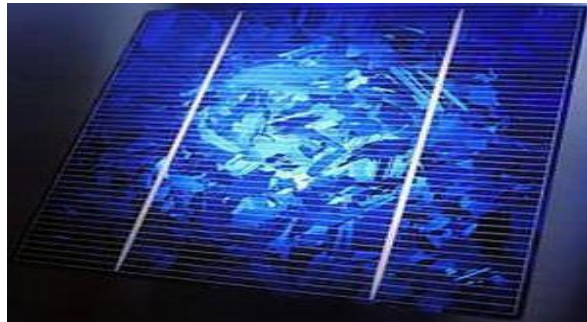


Figure I.8 Cellule photovoltaïque poly cristallin

➤ **Cellules amorphe :**

Les cellules amorphes se composent de couches de silicium très minces appliquées sur un support en verre, en plastique souple ou en métal. A l'origine, leur rendement était plus faible (6 à 10%), mais la technologie évolue rapidement, ils fonctionnent avec un éclairage faible ou diffus (même par temps couvert, y compris sous éclairage artificiel de 2 à 3000 lux) [11]



Figure I.9 Cellule amorphe

I.5.2 Module PV (panneau)

Les cellules photovoltaïques basiques constituent des générateurs de très faible puissance pour les besoins de la plupart des applications domestiques ou industrielles. Une cellule de base de plusieurs dizaines de centimètres carrés peut fournir jusqu'à plusieurs watts de puissance à moins d'un volt (tension de jonction PN). Pour générer plus de puissance, plusieurs cellules doivent être connectées ensemble pour créer un module. Connecter des

cellules en série peut facilement augmenter la tension globale, tandis que les connecter en parallèle augmente le courant.

Les cellules sont protégées de l'humidité par encapsulation dans du polymère EVA (éthylène acétate de vinyle) et sur la face avant un verre à haute transmission et bonne résistance mécanique, sur la face arrière du polyéthylène ou voir Figure (I.10) [12].

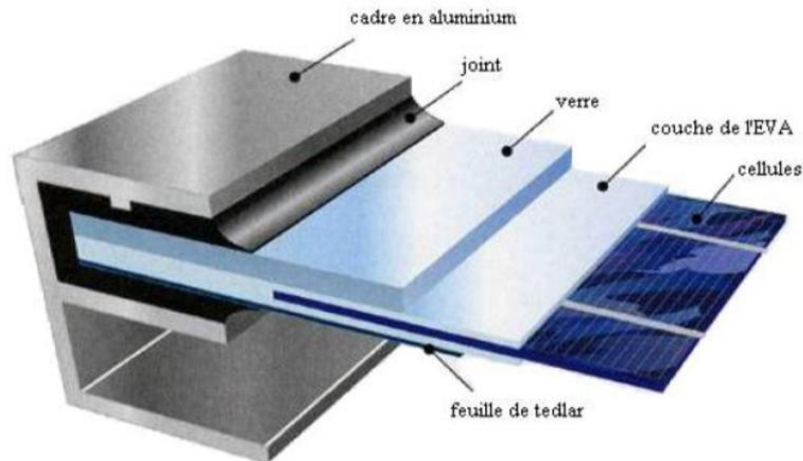


Figure I.10 Composition d'un module solaire photovoltaïque

I.5.2.1 Association des modules PV

Les modules peuvent également être connectés en série et en parallèle pour construire le champ photovoltaïque afin d'augmenter la tension et l'intensité d'utilisation. Toutefois, il importe de prendre quelques précautions car l'existence de cellules moins efficaces ou l'occlusion d'une ou plusieurs cellules (dus à de l'ombrage, de la poussière, etc.) peuvent endommager les cellules de façon permanente [13].

➤ Association en série

En additionnant des cellules ou des modules identiques en série, le courant de la branche reste le même mais la tension augmente proportionnellement au nombre de cellules (modules) en série [13].

$$V_{CONS} = V_{CO} \times N_S \quad (\text{I.1})$$

$$I_{CC} = I_{CCNS} \quad (\text{I.2})$$

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

I_{CC} : Courant de court-circuit de N_S cellules en série.

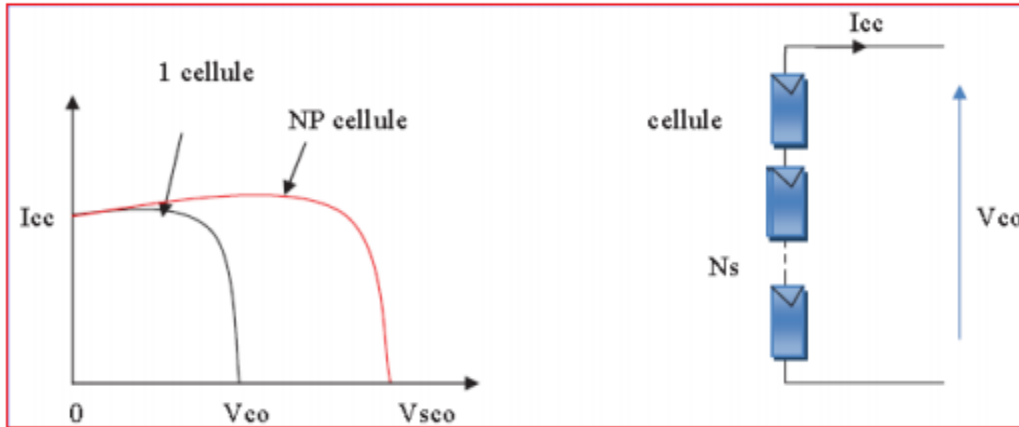


Figure I.11 Caractéristique courant tension de N_s cellule en série [14]

➤ Association en parallèle

En additionnant des modules ou cellules identiques en parallèle, la tension de la branche est égale à la tension de chaque module et l'intensité augmente proportionnellement au nombre de modules en parallèle dans la branche [13].

$$I_{CCNP} = N_P \times I_{CC}$$

(I.3)

$$V_{CO} = V_{CONP}$$

(I.4)

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

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

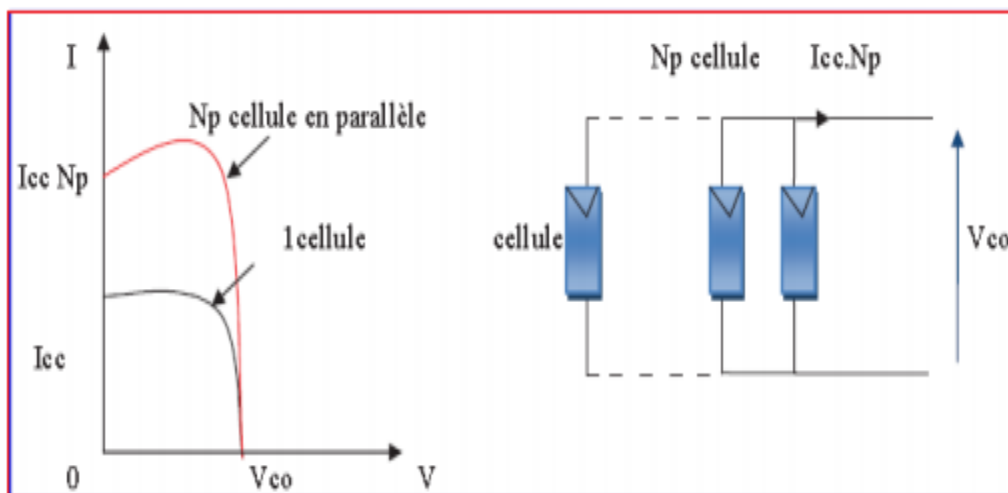


Figure I.12 Caractéristique courant tension de (N_p) cellule en parallèle [14]

➤ Association série-parallel

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 [14].

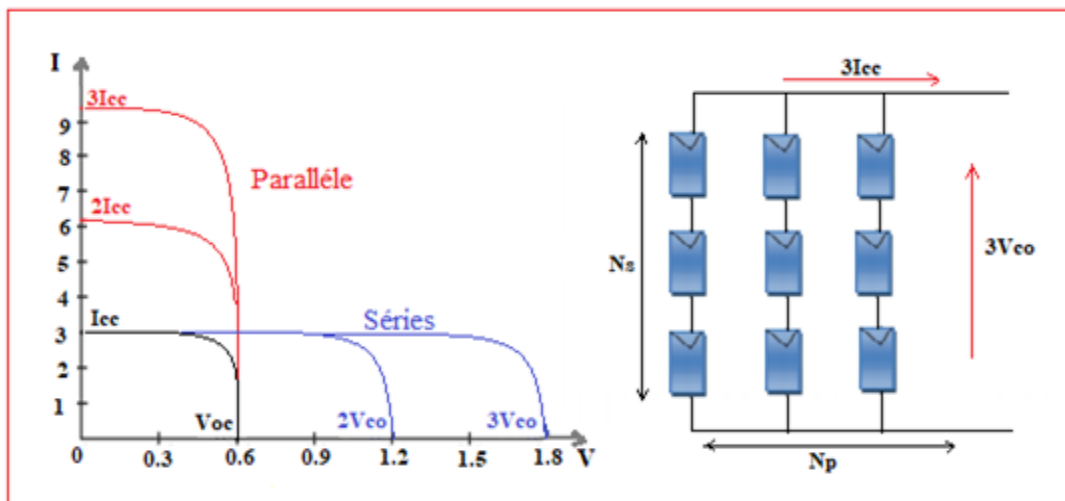


Figure I.13 Caractéristique courant-tension d'un regroupement série-parallel des cellules photovoltaïques

I.5.3 Générateur PV

L'interconnexion des modules entre eux, en série ou en parallèle, pour obtenir une puissance plus grande, définit la notion de générateur photovoltaïque. Le générateur photovoltaïque se compose de plusieurs modules et d'un ensemble de composants qui adapte l'électricité produite par les modules aux spécifications des récepteurs.[15]

I.6 Modélisation de la cellule PV

I.6.1 Cellule PV idéale

On peut représenter le schéma électrique d'une cellule photovoltaïque idéale par un générateur de courant I_{ph} en parallèle avec une diode comme suit :

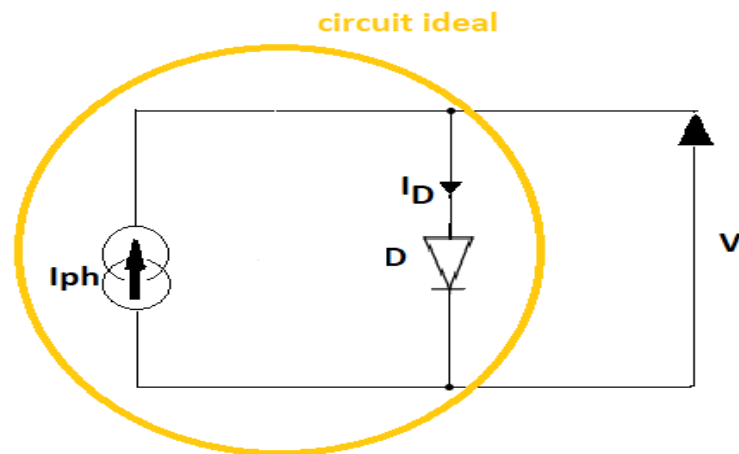


Figure I.14 Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque idéale

D'après la loi de nœuds, le courant fourni par la cellule est donné par la relation suivante :

$$I = I_{ph} - I_D \quad (\text{I.5})$$

Avec:

I : Courant fourni par la cellule

I_{ph} : courant généré par la photopile (A)

I_D : Le courant qui traverse la diode.

$$I_D = I_0 \left[\exp \left(\frac{q(V + R_s I)}{nKT} \right) - 1 \right] \quad (\text{I.6})$$

Avec :

I₀ : Le courant de saturation [A]

n : coefficient d'idéalité de la diode il varie entre 1 et 2.

q : charge de l'électron ($q = 1,602 \times 10^{-19} \text{ C}$).

K : constante de Boltzmann ($K = 1,38 \times 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$)

V : le courant aux bornes de la charge

R_s : La résistance série

I.6.2 Cellule PV à une seule diode (Modèle réelle)

Le fonctionnement d'un module photovoltaïque est décrit par le modèle « standard » à une diode, établi par William Shockley pour une seule cellule PV, est généralisé à un module PV en le considérant comme un ensemble de cellules identiques branchées en série ou en parallèle. [16]

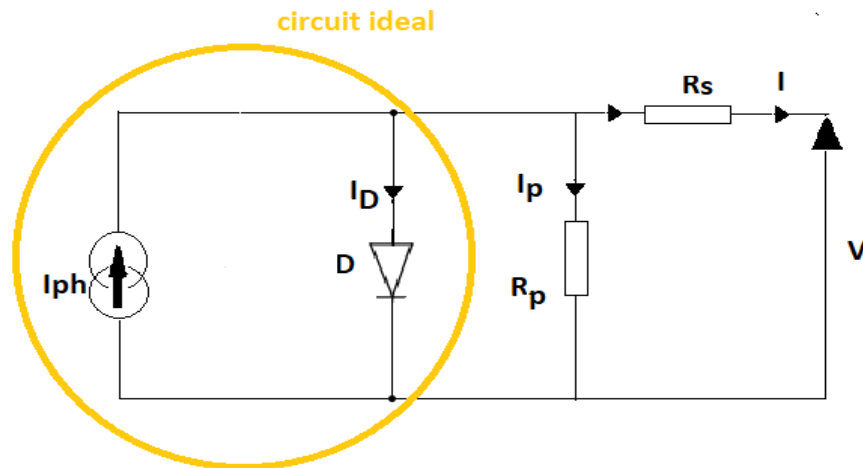


Figure I.15 Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque réelle

Le Courant fourni par la cellule devient de la sorte :

$$I = I_{ph} - I_D - I_p$$

(I.7)

I: Le courant délivré par le module (le courant de sortie)

I_{ph}: le courant produit par la cellule solaire

I_p: le courant de la résistance parallèle.

I_D: Le courant de la diode

L'expression du courant qui traverse la résistance parallèle est donnée par l'équation (I.8) :

$$I_p = \frac{V + I R_s}{R_p} \quad (\text{I.8})$$

L'expression du courant de la diode :

$$I_D = I_0 \left[\exp \left(\frac{q(V + R_s I)}{nKT} \right) - 1 \right] \quad (\text{I.9})$$

Donc au final, l'expression du courant photovoltaïque devient comme suit :

$$I = I_{ph} - I_0 \left[\exp \left(\frac{q(V + R_s I)}{nKT} \right) - 1 \right] - \frac{V + I R_s}{R_p} \quad (\text{I.10})$$

R_s: La résistance série [Ω]

R_p: La résistance parallèle [Ω]

V: La tension de sortie de PV [V]

I.6. 3 Cellule PV à deux diodes

Le modèle mathématique de la cellule à deux diodes est représenté par la figure ci-dessous (Fig.I.16) :

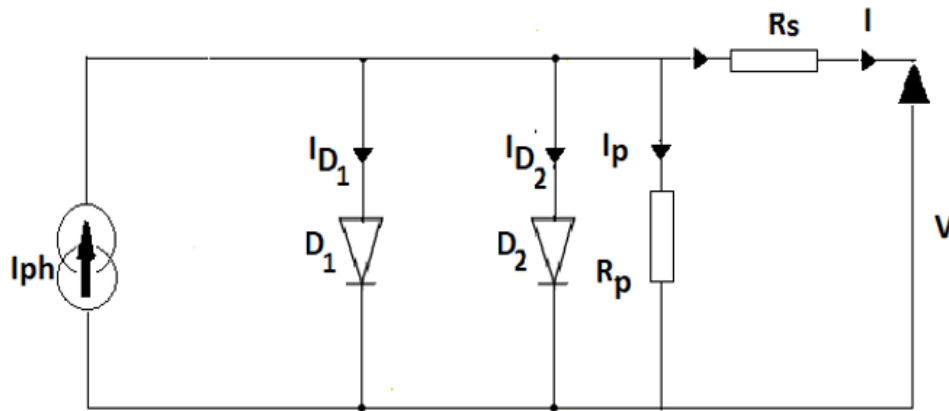


Figure I.16 Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque à deux diodes

L'expression du courant fourni par la cellule, s'écrit suivant l'équation (I.11) :

$$I = I_{ph} - I_{D1} - I_{D2} - I_p \quad (I.11)$$

En remplaçant à la fois l'expression du courant de la première diode I_{D1} , le courant de la deuxième diode I_{D2} , et l'expression du courant de la résistance parallèle, l'expression du courant PV devient comme suit :

$$I = I_{ph} - I_{01} \left[\exp \left(\frac{q(V + R_s I)}{n_1 K T} \right) - 1 \right] - I_{02} \left[\exp \left(\frac{q(V + R_s I)}{n_2 K T} \right) - 1 \right] - \frac{V + I R_s}{R_p} \quad (I.12)$$

Sachant que :

I_{D1} : Courant de saturation inverse de la diode D_1 .

I_{D2} : Courant de saturation inverse de la diode D_2 .

n_1 : Facteur d'idéalité de la jonction de la diode D_1 .

n_2 : Facteur d'idéalité de la jonction de la diode D_2 .

I.7 Caractéristique électrique d'une cellule Photovoltaïque :

Dans des conditions constantes d'irradiation et de température, la cellule PV est caractérisée par [17] :

➤ **La tension à circuit ouvert V_{CO}**

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

➤ **Le courant de court-circuit I_{CC}**

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

➤ **Puissance Maximale**

La puissance maximale délivrée à la charge est présentée par le rectangle hachuré

$$(P_{\max} = V_{\max} * I_{\max}).$$

➤ **Rendement**

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

$$\eta = FF \times \frac{P_{\max}}{P_{in}} = \frac{FF \times V_{CO} \times I_{CC}}{P_{in}} \quad (\text{I.13})$$

Tel que:

➤ **Le facteur de forme FF**

Le nom "facteur de forme" (fill factor) dérive de la représentation graphique. Il est défini par la relation suivante :

$$FF = \frac{P_m}{I_{CC} \times V_{CO}} \quad (\text{I.14})$$

1.7.1 Caractéristique courant tension (I_{pv} - V_{pv})

La figure (I.17) représente la caractéristique (courant-tension), (puissance-tension) dans les conditions constantes d'éclairement $E=1000\text{W}/\text{m}^2$ et de température de 25°C :

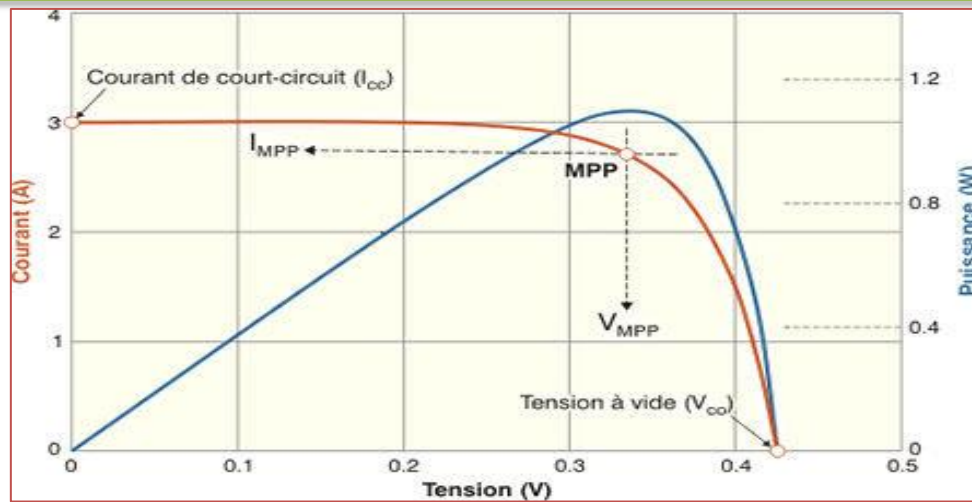


Figure I.17 Caractéristique courant-tension $I(V)$ et courbe de puissance d'une cellule photovoltaïque.

I.8 Simulation de la cellule PV

Pour simuler une cellule photovoltaïque et déduire leur caractéristiques $I(v)$ et $P(V)$, la librairie Simscape dans le Matlab lui donne une modélisation complète sur la cellule PV sous le nom "solaire Cell", les caractéristiques de cette cellule est illustrés dans le tableau (Tab I.1) :

Courant de court-circuit I_{sc}	3.8A
Tension à circuit ouvert	0.58V
L'éclairement	1000W/m ²
Facteur de qualité	1.5
Nombre des résistances en séries R_s	0 Ohm

Tableau I.1 Caractéristiques électriques d'une cellule photovoltaïque

La figure (I.18) illustre le modèle schématique sous Matlab/Simulink d'une cellule photovoltaïque.

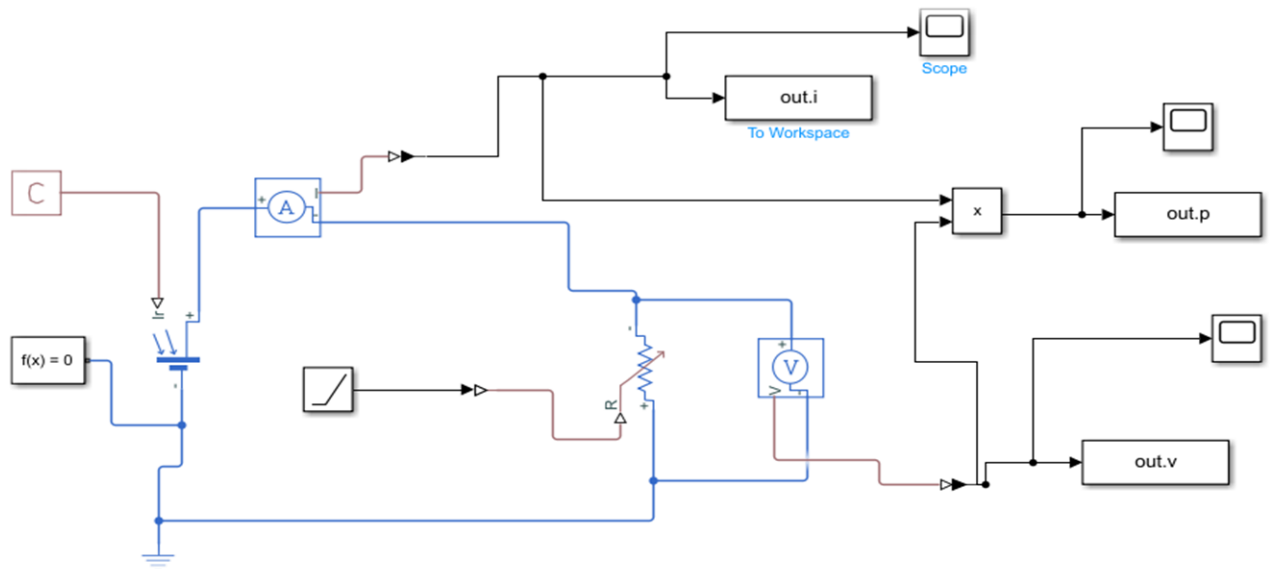


Figure I.18 Schéma block de la simulation d'une cellule photovoltaïque

Après avoir simulé le schéma block de la cellule PV, on obtient les caractéristiques I(V) et P(V) dans des conditions climatiques standards ($T=25^{\circ}\text{C}$ et $E=1000\text{W}/\text{m}^2$) à savoir :

- La figure (I.19) représente la caractéristique courant-tension de cette cellule PV

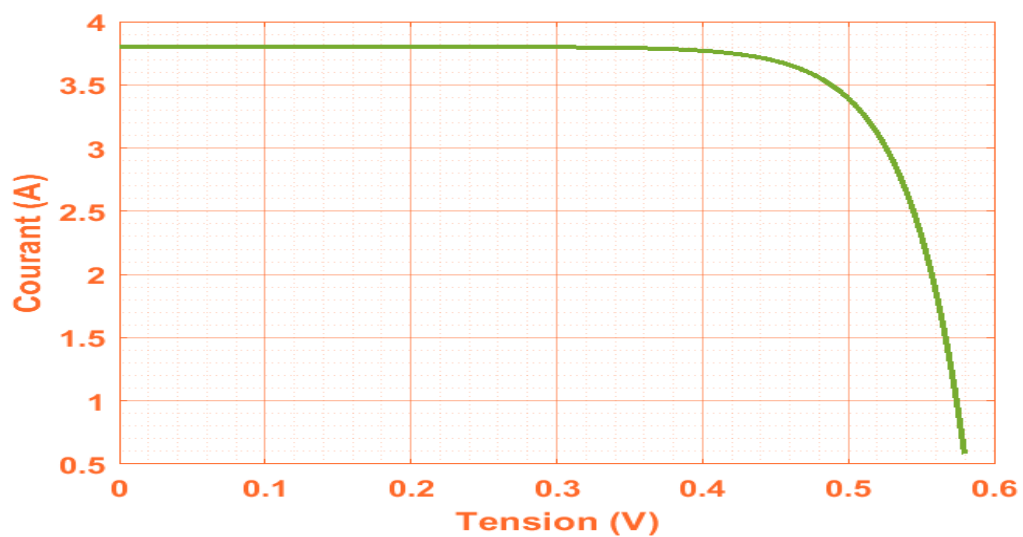


Figure I.19 Caractéristique I(V) d'une cellule photovoltaïque

D'après la caractéristique de la figure (I.19), on observe que lorsque la tension augmente le courant fait une décroissance légère jusqu'à ce que la tension atteigne la valeur maximale, le courant décroît rapidement.

- La figure (I.20) représente la caractéristique puissance-tension de la cellule PV

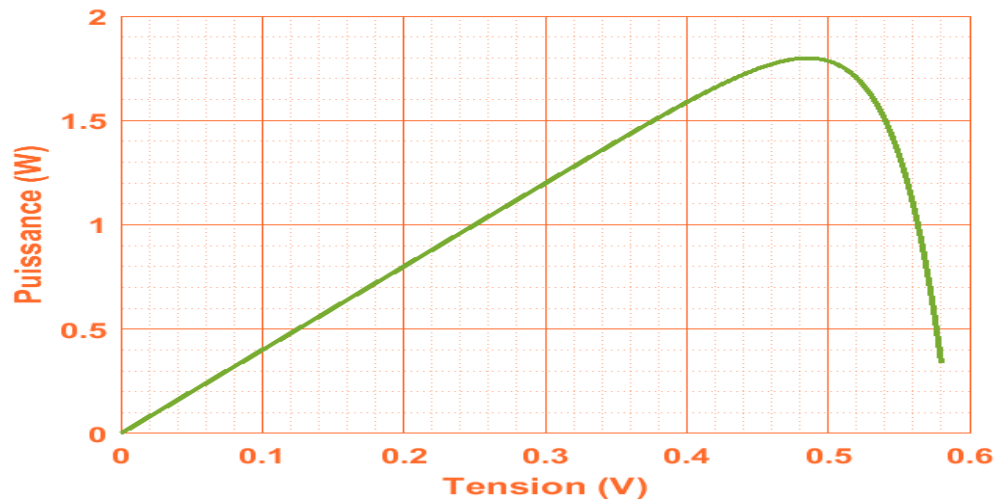


Figure I.20 Caractéristique $P(V)$ d'une cellule photovoltaïque

D'après l'allure de la caractéristique $P(V)$ on constate que, lorsque la tension augmente la puissance augmente aussi jusqu'à atteindre la valeur de la tension optimale, puis elle décroît lorsque la tension atteint sa valeur maximale (V_{oc}).

I.9 Simulation du module PV

Pour réaliser cette simulation, on a utilisé l'environnement 'MATLAB 2021b'. Le module photovoltaïque choisi un caractérisé comme suit (Tableau I.2) :

Puissance maximale (P_{max})	60.53 W
Tension à P_{max} (P_{mp})	17.0458 V
Courant à P_{max} (I_{mp})	3.5510197 A
Courant de court-circuit (I_{sc})	3.8 A
Tension à circuit ouvert (V_{oc})	21.1 V
Coefficient de température de I_{sc}	0.030706 %/deg.C
Coefficient de température de V_{oc}	-0.229 %/deg.C
Nombre des cellules par module	36 cellules

Tableau I.2 Caractéristiques électriques du module photovoltaïque

Après avoir simulé le schéma block du module PV, qui se compose de 36 cellules PV dans les mêmes conditions climatiques standards ($T=25^{\circ}\text{C}$ et $E=1000\text{W/m}^2$), on obtient les résultats qui représentent les caractéristiques $I(V)$ et $P(V)$ des figures (I.21 et I.22)

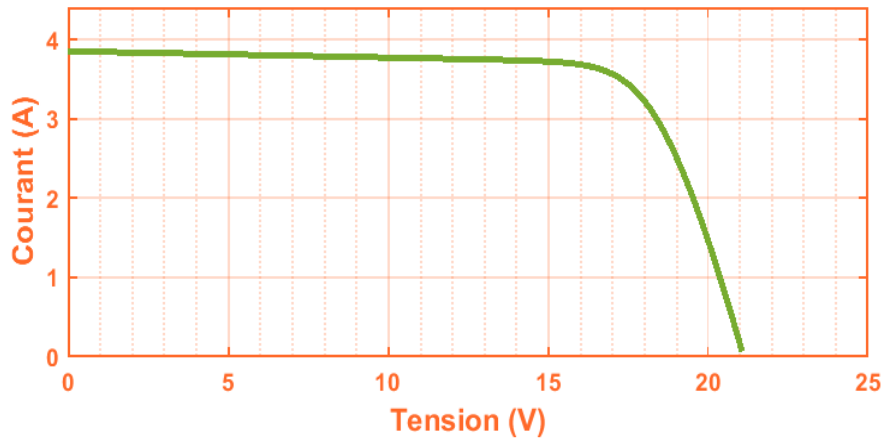


Figure I.21 Caractéristique $I_{pv}=f(V_{pv})$ d'un module photovoltaïque

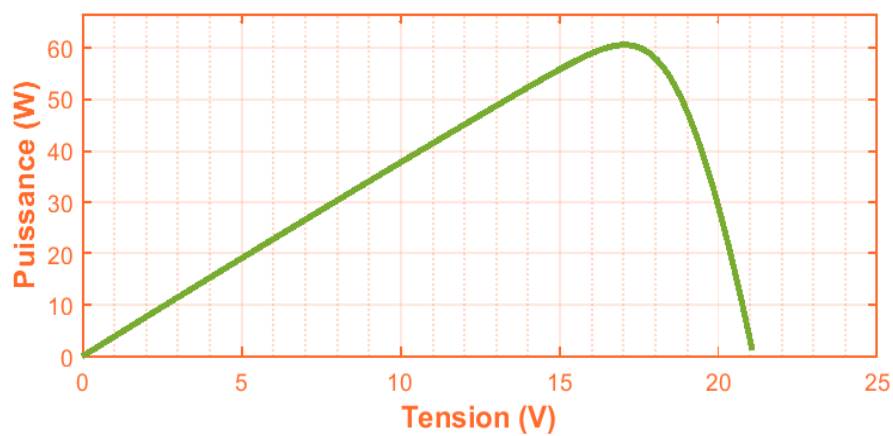


Figure I.22 Caractéristique $P_{pv}=f(V_{pv})$ d'un module photovoltaïque

I.10 Influence de la température et de l'éclairement sur un module photovoltaïque

I.10.1 Influence de la température

La figure (I.23) montre que la tension en circuit ouvert du module photovoltaïque diminue avec l'augmentation de la température, par contre, le courant de court-circuit varie très peu avec la température. La figure (I.24) montre que la puissance optimale P_m diminue avec l'augmentation de la température, la tension du point de puissance optimale diminue également [18].

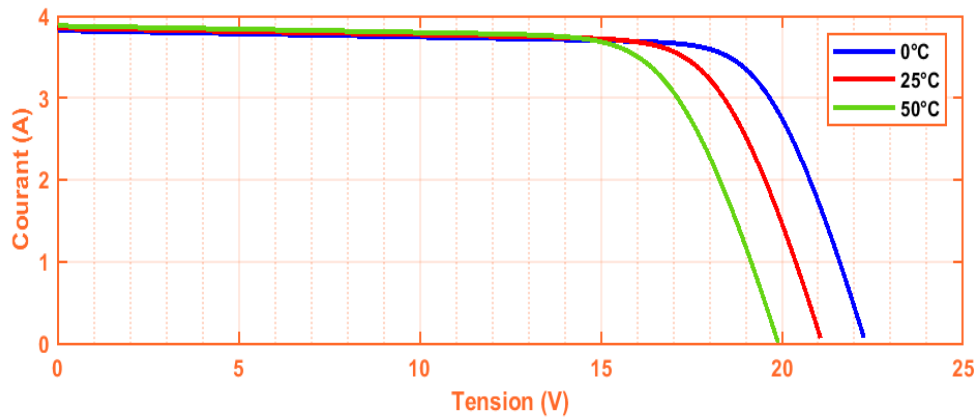


Figure I.23 Influence de la température sur la caractéristique $I_{pv}=f(V_{pv})$ avec un éclairement de 1000W/m^2 .

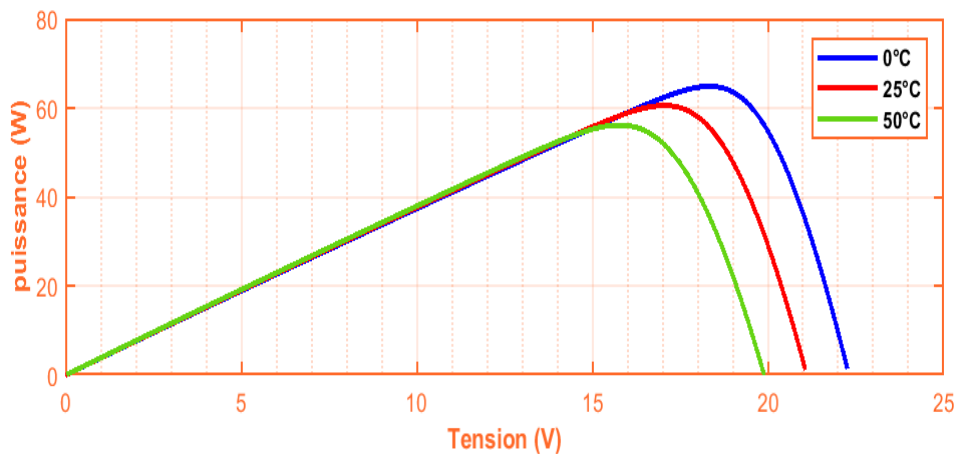


Figure I.24 Influence de la température sur la caractéristique $P_{pv}=f(V_{pv})$ avec un éclairement de 1000W/m^2 .

I.10.2 Influence de l'éclairement

La figure (I.25) montre que le courant de court-circuit du module photovoltaïque augmente fortement avec l'augmentation de l'éclairement solaire, par contre, la tension en circuit ouvert varie légèrement avec l'éclairement solaire.

La figure (I.26) montre que la puissance optimale P_m augmente avec l'augmentation de l'éclairement. Mais, les points de tension qui correspondent à la puissance optimale varient très légèrement.[18]

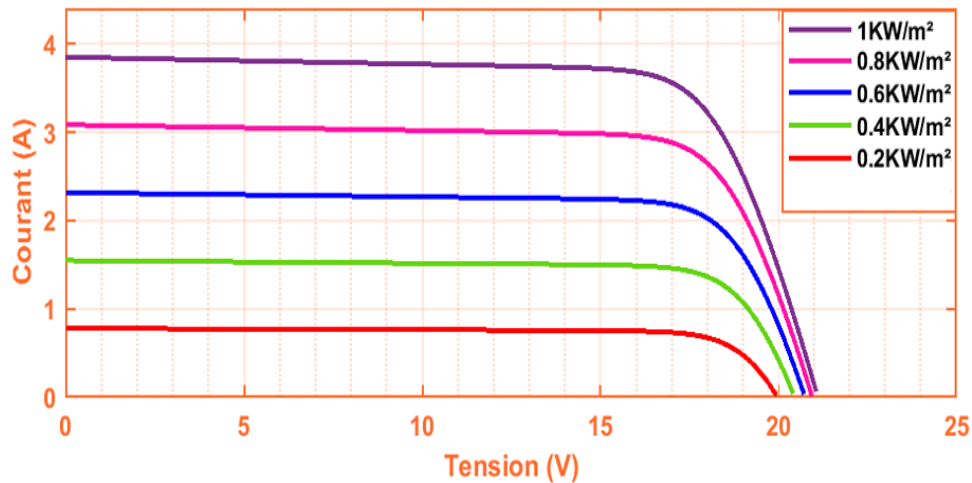


Figure I.25 Influence de l'éclairement sur la caractéristique $I_{pv}=f(V_{pv})$ avec une température de 25°C

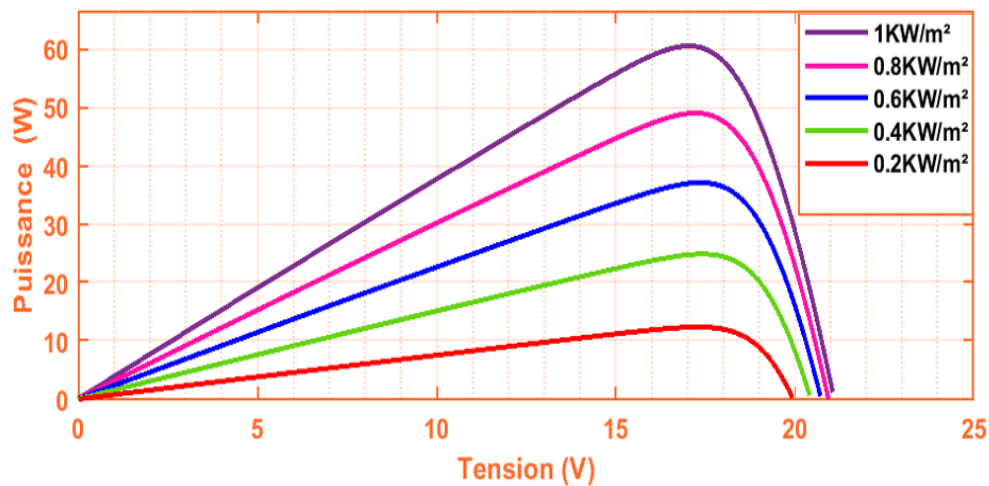


Figure I.26 Influence de l'éclairement sur la caractéristique $P_{pv}=f(V_{pv})$ avec une température de 25°C.

I.11 Les différents types du système PV

Les systèmes PV se composent de trois types : autonomes, en réseau et hybrides.

Le type est choisi en fonction de l'emplacement, du budget ou des exigences de la charge [19]

I.11.1 Systèmes autonomes

Une installation photovoltaïque autonome est une installation qui fonctionne indépendamment du réseau électrique ou toutes autres sources d'énergies.

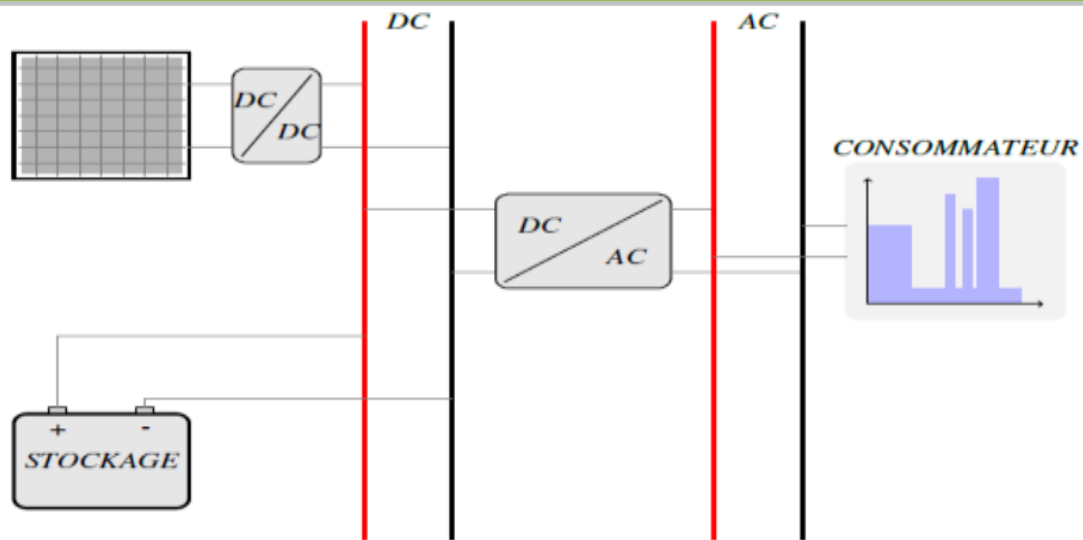


Figure I.27 Exemple d'installation photovoltaïque autonome [12]

Il est généralement utilisé pour faire fonctionner des maisons, des chalets ou des camps dans des régions éloignées ainsi que pour des applications telles que la surveillance à distance et le pompage d'eau.

Ce sont des systèmes qui fonctionnent 24h/24h avec la conversion de l'énergie solaire en énergie électrique sans l'aide d'aucune autre source électrique. Par conséquent, il est nécessaire de stocker une partie de la production quotidienne des unités PV dans les batteries.[19]

I.11.2 Systèmes hybrides

Il est également indépendant des réseaux de distribution d'électricité. À utiliser lorsque la demande d'énergie est élevée. Il s'agit d'un mélange de deux technologies complémentaires ou plus pour augmenter les alimentations, comme la combinaison de modules PV avec des éoliennes ou un générateur de carburant.

Un système hybride photovoltaïque optimise l'utilisation combinée de plusieurs sources d'énergies renouvelables et, ou fossiles et des moyens de stockage associés.[20]

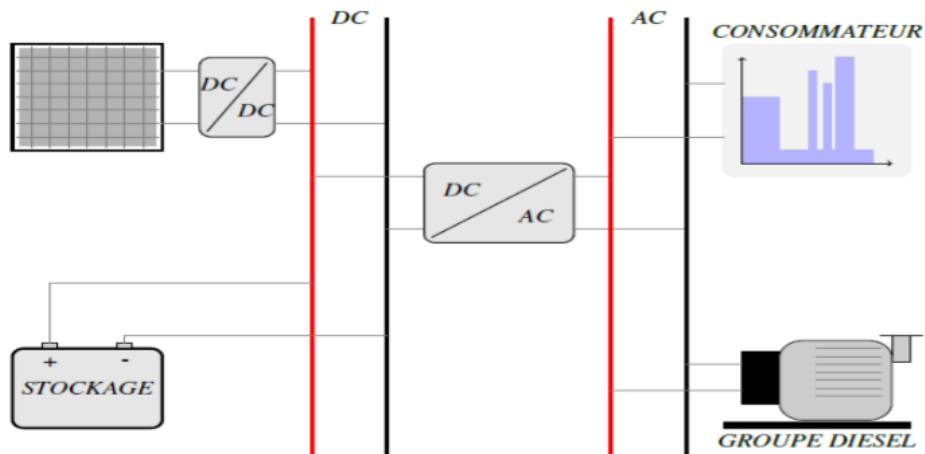


Figure I.28 Schéma synoptique d'un système photovoltaïque hybride.[12]

I.11.3 Systèmes accordés au réseau :

Il s'agit d'un système qui est directement couplé au réseau électrique à l'aide d'un onduleur qui convertit le courant résultant en courant alternatif proportionnel au réseau électrique. Dans ces systèmes, l'onduleur est l'élément principal, mais les batteries ne sont pas nécessaires, sauf si vous souhaitez obtenir une forme d'énergie indépendante pendant la panne de courant.[19]

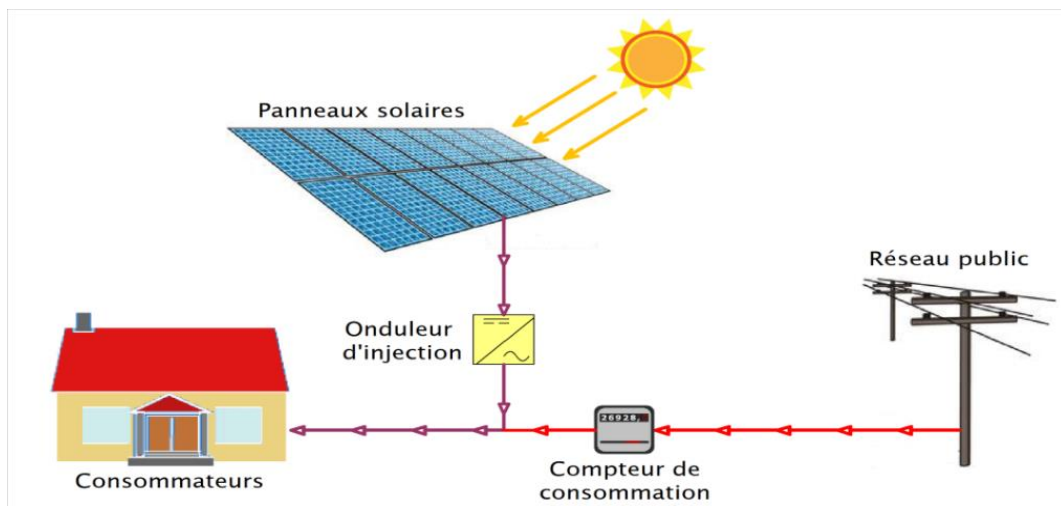


Figure I.29 Schéma d'un système accordé au réseau.

I.12 Conclusion :

Le contenu de ce chapitre a été consacré aux généralités sur les systèmes PV et particulièrement l'énergie solaire qui découle de ces derniers. On a mis l'accent sur la cellule photovoltaïque et son principe de fonctionnement pour la conversion électrique.

Puis on a exposé les types de cellules, et l'importance de la température ainsi que l'éclairement sur les caractéristiques d'un module PV.

Par la suite on a achevé ce chapitre par les différents types de système PV qui peuvent existés dans le domaine de l'énergie solaire photovoltaïque.

Chapitre 02

Convertisseur DC-DC Boost à un niveau contrôlé en MPPT

II.1 Introduction

Les convertisseurs DC/DC sont en effet des dispositifs de l'électronique de puissance utilisés pour convertir un niveau de tension continu (DC) en un autre niveau de tension continu, en utilisant généralement des interrupteurs électroniques commandés. Ces convertisseurs sont largement utilisés dans de nombreuses applications, notamment dans les systèmes d'alimentation électrique, les véhicules électriques, les énergies renouvelables, les télécommunications, etc.

Les principaux types de convertisseurs DC/DC comprennent les convertisseurs Buck, Boost, Buck-Boost et autre, ainsi que les convertisseurs DC/DC à plusieurs niveaux, appelé hacheurs multiniveaux.

Ce chapitre, fait l'objet d'un passage sur la technologie des composants à semi-conducteurs, qui constituent la cellule la plus importante dans la topologie des hacheurs (Diode, IGBT, MOSFET...).

Puis un rappel sur les structures des hacheurs à savoir, Buck et boost à un niveau. Ensuite dans la dernière partie de ce chapitre, la modélisation et simulation du boost à un niveau sont exposées et discutés, sous la mise en œuvre de la technique MPPT associé à un panneau PV, qui assure l'alimentation du boost sous un éclairage variable.

II.2 Les convertisseurs DC-DC (Hacheurs)

L'hacheur est un convertisseur continue/continue permettant de convertir une énergie continue à un niveau donné de tension (ou de courant) en une énergie continue à un autre niveau de tension (ou de courant). Son utilisation s'avère nécessaire pour stocker l'énergie photovoltaïque dans des batteries, où pour alimenter une charge continue [21]. Il se compose de condensateurs, d'inductances et de commutateurs. Dans le cas idéal, tous ces dispositifs ont un bon rendement, ils ne consomment aucune puissance active [21].

Les hacheurs sont des convertisseurs continus qui procèdent par découpage d'une grandeur d'entrée continue, tension ou courant et dont la grandeur de sortie est également continue ou à faible ondulation [21].

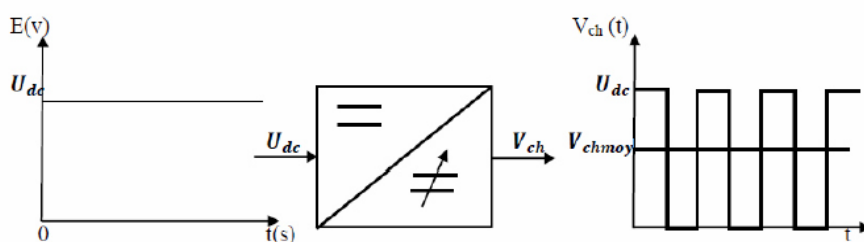


Figure II.1 Principe de base d'un hacheur [22]

II.3 Structure de base des convertisseurs DC-DC

Nous considérons dans la présentation des montages hacheurs que :

- La source d'entrée du convertisseur est une source de tension continue V_e .
- La sortie est également considérée comme une source de tension continue V_s .
- La charge est assimilable à une résistance R .

Le circuit d'un hacheur se compose essentiellement de condensateur, inductance et de semi-conducteur. Dans le cas idéal, tous ces dispositifs ne consomment aucune puissance active, c'est la raison pour laquelle ces convertisseurs ont un bon rendement [22]. Les semi-conducteurs sont : Les diodes et les interrupteurs commandables à l'ouverture et à la fermeture.

II.4 Le commutateur de puissance à semi-conducteurs

Pour la conversion de puissance, il est essentiel que le rendement soit maintenu élevé pour éviter la dissipation de la puissance et pour éviter les échauffements excessifs dans les composants électroniques. Pour cette raison toute la conversion de puissance échangée doit être réalisée autour des composants de stockage d'énergie (inductances et condensateurs) et les commutateurs.

Les commutateurs (interrupteurs) de puissance utilisés dépendent du niveau de la puissance à convertir ou à commander. Les MOSFETS (transistor à effet de champ d'oxyde de métal) sont habituellement utilisés à la puissance relativement basse (quelques kW) et les IGBTs (transistors bipolaires à gâchette isolée) à des puissances plus élevées. Les thyristors ont été généralement utilisés et acceptés dans les plus hauts niveaux de puissance [23]. De ce fait, un convertisseur DC/DC doit en effet le sujet des compétences suivantes [24] :

- Délivrer une ou souvent plusieurs tensions parfaitement continues, éventuellement ajustables et stables quel que soit le courant demandé.
- Posséder un rendement élevé.
- Être la plus petite et la plus légère possible.
- Et bien entendu être de préférence peu coûteuse.

II.4.1 Composants de puissance (IGBT, MOSFET) [25][26].

L'apparition des semi-conducteurs : les diodes, thyristors, transistors bipolaires, IGBT, MOSFET et GTO permettant le contrôle de courants et de tensions importants a été un essor considérable de cette technique dans le domaine de commande et de contrôle de l'énergie

électrique. Le tableau (II.1) présente une comparaison des composants de puissance et quelques domaines d'applications.

II.4.2 Tableau composant de puissance

Eléments de Puissances	Non commandé	Commandé	Avantages	Inconvénients
Diodes	Oui	Non	Puissance plus élevée que celle du thyristor.	Aucune intervention Externe n'est possible.
Thyristor	Non	Oui	Très fortes puissances ; Idéal pour des montages redresseurs.	Lent ; commande uniquement à la fermeture.
Transistors bipolaires	Non	Oui	Puissance élevée ; pertes réduites.	Command de base complexe ; Lent.
IGBT	Non	Oui	Commutation assez rapide ; Energie de command faible ; Puissance élevée ; Pertes de conduction faible ; Utiliser pour de fortes tension .	Fréquence de commutation limitée ; Plus lent que le MOSFET à l'ouverture
GTO	Non	Oui	Un petit courant de grille permet la conduction et sa désactivation ; Utilisé pour de plus grandes puissance	Commande complexe ; Lent et fragile
MOSFET	Non	Oui	Fréquence de communication élevée ; Rapidité de commutation ; Pertes en commutation très faible.	Pertes élevées en conduction ; Puissance d'utilisation limitée.
Triac	Non	Oui	Pertes de conduction faible	Puissance d'utilisation limitée.

Tableau II.1 Comparaison des éléments de l'électronique de puissance [27]

II.4.3 Evaluation de tension et de courant

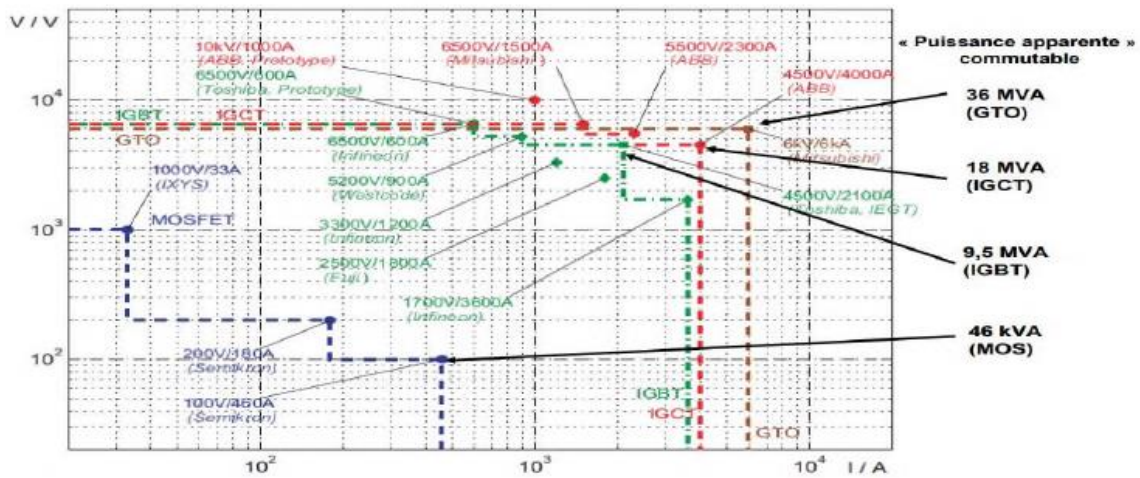


Figure II.2 Evolution de la tension et du courant « commutable [28]

II.4.4 Limites fréquence de découpage - Puissance apparente commutée

Le tableau ci-dessous (Tab.II.2), présente les propriétés des composants à semi-conducteurs.

Semi-conducteur	Niveau de puissance pouvant manipuler	Vitesse de commutation « 3fréquence »
MOSFET	Faible	Rapide
IGBT	Moyen	Moyen
GTO	plus élevée	Faible

Tableau II.2 Tableau récapitulatif des niveaux de puissances et des fréquences des semi-conducteurs [29].

II .4.5. Technologies de semi-conducteurs modernes

- ❖ MOSFET : 30 V – 200 A
- 75 V – 300 A
- 1200 V – 100 A (Sic)



Les mieux adaptés aux basses tensions (moins de 48 V), composants les plus rapides nouvelles technologies (Cool MOS ou MOS à super jonction) adaptée aux tensions entre 500 et 1000 V [29].

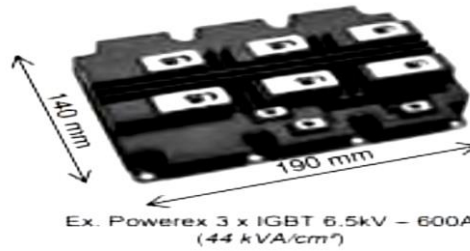
❖ **IGBT:** (Insulated Gate Bipolar Transistor)

250 V – 600 A

1700 V – 2,4 kA

3300 V – 1,2 kA

6500 V – 600 A



Bien adaptés aux moyennes et hautes tensions (de 200 V à 5 kV). Offre très étendue, possibilités de compromis chute de tension/rapidité [28].

❖ **Thyristors GTO et GCT :** (Gate Turn Off, Gate Controlled Thyristors)

3 à 6 kV – 1 à 5 Ka



Bien adaptés aux très hautes tensions et très fortes puissances (Meilleur refroidissement avec boîtiers presse-pack, fiabilité) mais la concurrence de l'IGBT est de plus en plus forte [29].

II.5 Représentation du convertisseur DC/DC

Un convertisseur DC/DC a pour vocation d'assurer le transfert d'énergie entre une source de tension continue et une source de courant continu. La représentation symbolique la plus couramment utilisée est donnée par la figure (II. 3)[30]

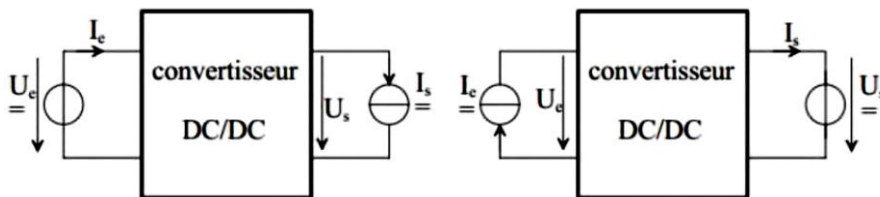


Figure II.3 Convertisseur DC/DC (source : tension/ courant ou source : courant/ tension) [31]

L'alimentation peut être une source de tension, ou bien une source de courant. Au niveau de la sortie la charge peut être une source de courant, ou bien une source de tension.

II.6 Domaine d'utilisation des hacheurs

Un des gros domaines d'utilisation des hacheurs est la variation de vitesse du moteur à courant continu (MCC), Ils équipent par exemple la majorité des engins de moyenne traction, tels que ceux utilisés pour le métro. La première génération de TGV est équipée d'ensembles hacheurs-moteurs à courant continu.

On trouve aussi des hacheurs dans tous les équipements destinés à l'utilisation de l'énergie éolienne ou solaire [31].

- Les chargeurs de batterie (téléphone portable, batterie de véhicule).
- Dans la variation des machines a courant continue.
- Systèmes des énergies renouvelables : Systèmes photovoltaïques, éolienne...etc.,

II.7 Différents types des hacheurs

Il existe plusieurs types des convertisseurs DC- DC parmi ces types :

II.7.1 Hacheur abaisseur « Buck »

Le convertisseur Buck est le convertisseur dévolteur peut être souvent appelé dans la littérature hacheur Buck ou hacheur série. La figure (II.4), présente le schéma de principe du convertisseur dévolteur. Son application typique est de convertir sa tension d'entrée en une tension de sortie inferieure [32].

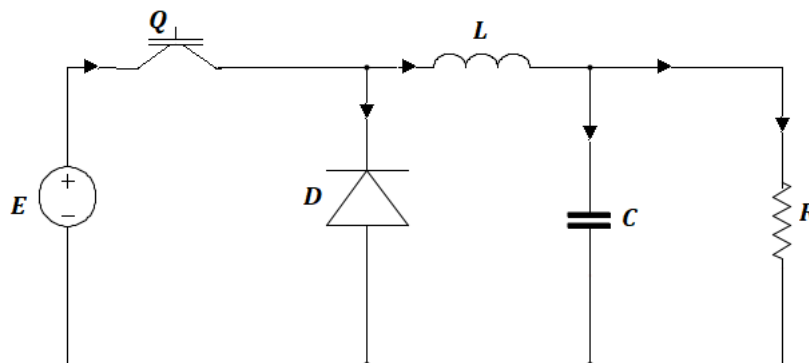


Figure II.4 Schéma de principe du convertisseur abaisseur 'Buck'.

II.7.2 Hacheur élévateur « Boost »

Ce dernier est un convertisseur survolteur, connu aussi sous le nom de « Boost » ou hacheur parallèle ; son schéma de principe de base est celui de la figure (II.5). Son application typique est de convertir sa tension d'entrée en une tension de sortie supérieure [32].

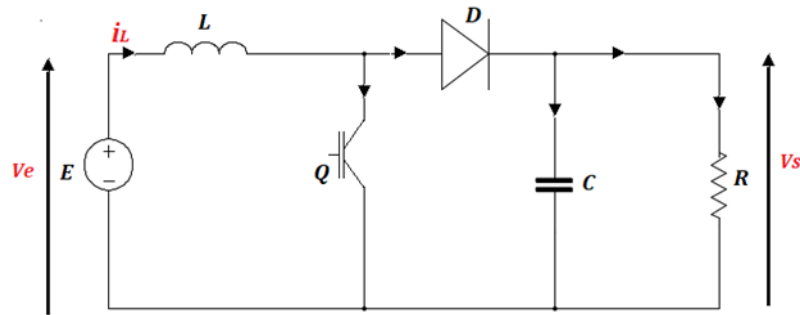


Figure II.5 Schéma de principe du convertisseur élévateur 'Boost'.

II.7.2.1 Principe de fonctionnement de l'hacheur Boost (parallèle, élévateur)

L'interrupteur est fermé pendant la fonction de temps αT de la période de découpage T . Le courant dans l'inductance croît progressivement, qui emmagasine de l'énergie, jusqu'à la fin de la première période.

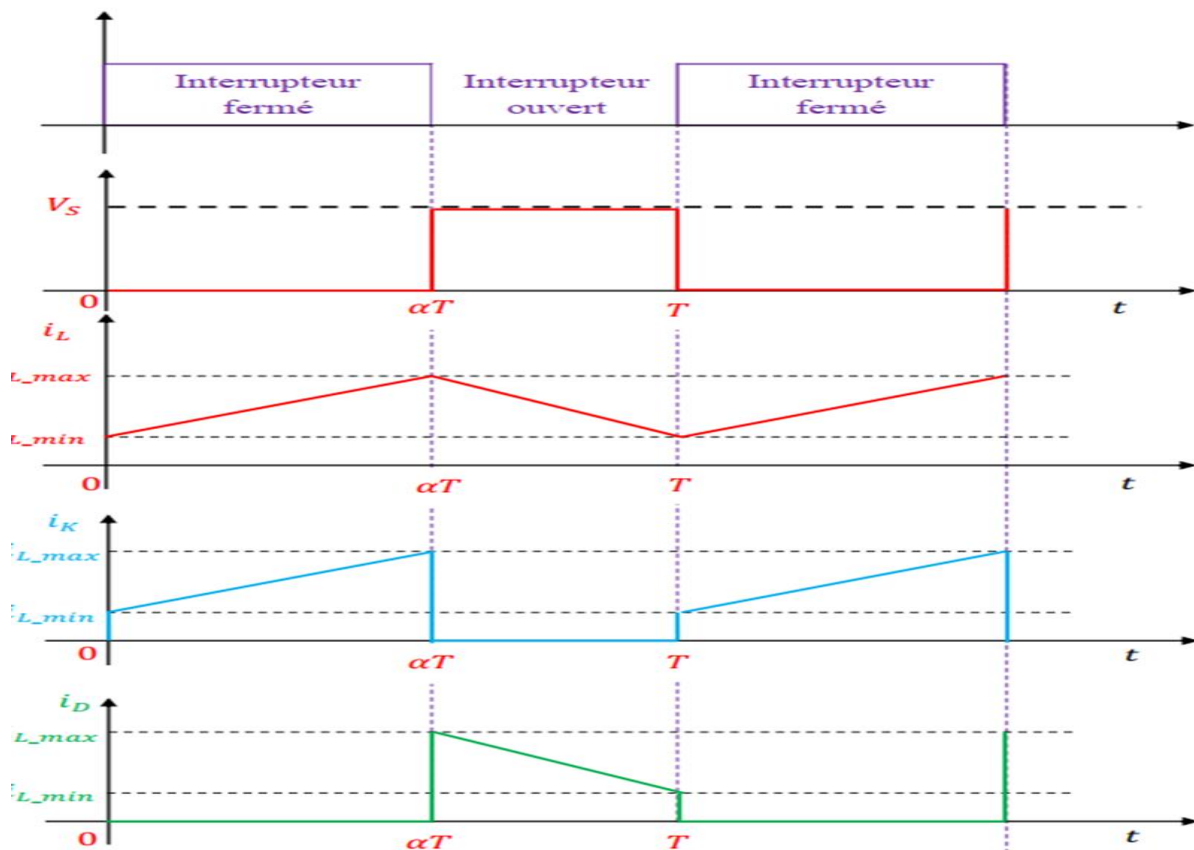


Figure II.6 Chronogramme d'un hacheur Boost

Lors du blocage du transistor, la diode assure la continuité du courant dans l'inductance. L'énergie emmagasinée dans cette inductance est alors déchargée dans le condensateur et la résistance de charge. Ce convertisseur a deux phases de fonctionnement :

Phase 1 : Pour $0 < t < \alpha T$, l'interrupteur Q fermé ($Q=1$) :

- La diode D est bloquée
- Le courant augmente dans l'inductance.
- La charge est alors déconnectée de l'alimentation

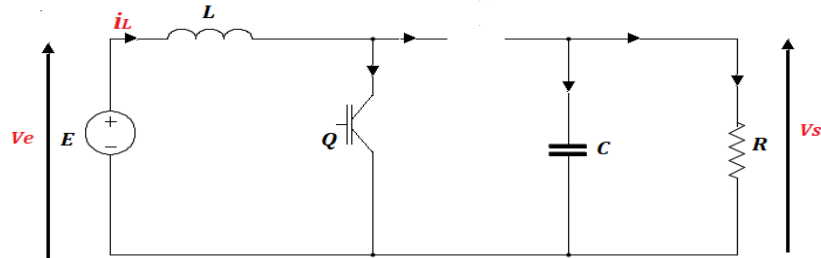


Figure II.7 Schéma équivalent de la phase 1

En appliquant la loi des mailles, on obtient l'équation suivante :

$$V_e = L \frac{di}{dt}, V_s = 0 \quad (\text{II.1})$$

Par intégration, on déduit le courant i_L :

$$i_L = \int \frac{V_e}{L} dt \quad (\text{II.2})$$

$$i_L = \frac{V_e}{L} t + i_{L-min} \quad (\text{II.3})$$

α : c'est le rapport cyclique qui représente la durée de la période T pendant laquelle l'interrupteur Q conduit.

Phase 2 : Pour $\alpha T < t < T$, l'interrupteur Q fermé, durant cet intervalle le courant i_L décroît rapidement et l'inductance délivre son énergie accumulée vers la capacité.

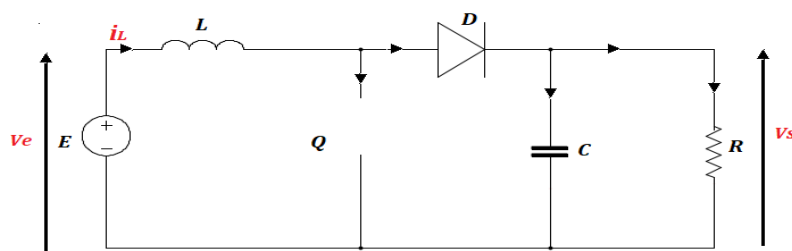


Figure II.8 Schéma équivalent de la phase 2

En appliquant la loi des mailles, on obtient l'équation suivante :

$$V_e = L \frac{di}{dt} + V_s \quad (\text{II.4})$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{V_e - V_s}{L} \quad (\text{II.5})$$

Par intégration, on déduit le courant i_L :

$$i_L = \int \frac{V_e - V_s}{L} dt \quad (\text{II.6})$$

$$i_L = \frac{V_e - V_s}{L} (t - \alpha T) + i_{L-max} \quad (\text{II.7})$$

➤ La valeur moyenne de la tension aux bornes de l'inductance :

$$V_{L-moy} = \frac{1}{T} \int_0^T V(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^T L \frac{di}{dt} dt = \frac{L}{T} [i_L(T) - i_L(0)] \quad (\text{II.8})$$

La variation du courant traversant l'inductance i_L est le même au début et à la fin de chaque cycle de commutation (le courant $i_L(t)$ est périodique de période T), Ce qui peut s'écrire de la façon suivante :

$$i_L(T) = i_L(0) \quad (\text{II.9})$$

On obtient que :

$$V_{L-moy} = 0 \quad (\text{II.10})$$

D'autre part, on a :

$$V_{L-moy} = \frac{1}{T} \int_0^T V(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^{\alpha T} V(t) dt + \frac{1}{T} \int_{\alpha T}^T V(t) dt \quad (\text{II.11})$$

➤ Pour $0 < t < \alpha T$:

$$V = L \frac{di}{dt} = V_L(t) \quad (\text{II.12})$$

➤ Pour $\alpha T < t < T$:

$$V = L \frac{di}{dt} + V_s = V_L(t) + V_s \quad (\text{II.13})$$

$$V_{L-moy} = \frac{1}{T} \int_0^{\alpha T} V dt + \frac{1}{T} \int_{\alpha T}^T V - V_s dt = \frac{\alpha T}{T} + \frac{(V - V_s)(T - \alpha T)}{T} \quad (\text{II.14})$$

$$= \alpha V + (V - V_s)(1 - \alpha)$$

$$V_{L-moy} = V - V_s(1 - \alpha) \quad (\text{II.15})$$

$$\text{Puisque } V_{L-moy} = 0 \Rightarrow V - V_s(1 - \alpha) = 0 \quad (\text{II.16})$$

$$V_s = \frac{V}{1 - \alpha} \quad (\text{II.17})$$

Le rapport cyclique : $0 < \alpha < 1$, donc, la tension de sortie V_S est supérieure par rapport à la tension d'entrée V (hacheur Boost).

Si on suppose que le courant d'entrée est parfaitement continu, on peut écrire :

$$I_S = \langle i_s(t) \rangle = \frac{1}{T} \int_{\alpha T}^T I_{pv} \cdot dt \quad (\text{II.18})$$

Ce qui conduit à ;

$$I_S = I_{pv}(1 - \alpha) \quad (\text{II.19})$$

Cette expression montre bien que l'hacheur Boost est un abaisseur de courant. Au regard de ces différentes expressions, on peut remarquer que le rapport cyclique α . permet de régler la tension moyenne de sortie (respectivement le courant moyen de sortie) pour une tension moyenne d'entrée donnée (respectivement un courant moyen d'entrée). Il est donc possible de régler le transfert moyen de puissance entre l'entrée et la sortie de la structure à partir du rapport cyclique α .

Le transfert moyen de puissance est [33] :

$$P = \langle p \rangle = (1 - \alpha)V_S \cdot I_{pv} \quad (\text{II.20})$$

- **Expression de ΔI_L [33]**

L'ondulation absolue du courant i_L est défini par $\Delta I_L = I_{L_{max}} - I_{L_{min}}$

a parti des relations précédentes, à $t = \alpha T$, on peut écrire $I_{L_{max}} = \frac{V_{pv}}{L} \alpha T - I_{L_{min}}$ on en déduit

l'expression de ΔI_L suivante ; $\Delta I_L = \frac{\alpha V_{pv}}{L \cdot f}$ cette expression nous montre que l'ondulation en courant diminue lorsque la fréquence de commutation f ou la valeur de l'inductance L augmente.

Comme $V_{pv} = V_S(1 - \alpha)$, on peut écrire :

$$\Delta I_L = \frac{\alpha(1-\alpha)V_S}{L \cdot f} \quad (\text{II.21})$$

En résolvant $\frac{d\Delta I_L}{d\alpha} = 0$, on trouve que l'ondulation en courant ΔI_L est maximale pour $\alpha = \frac{1}{2}$. Le dimensionnement de l'inductance L , à partir d'une ondulation en courant donnée, s'effectue à l'aide l'inéquation suivante :

$$L \geq \frac{V_S}{4f\Delta I_{Lmax}} \quad (\text{II.22})$$

- **Ondulation de tension [33]**

Pour déterminer l'expression de l'ondulation en tension ΔV_S on fait l'hypothèse que le courant I_S est parfaitement constant. On a la relation suivante $i_c = C \frac{dV_S}{dt}$ or, pour $0 \leq t \leq \alpha T$: on a $i_c = -I_S$ la résolution de cette équation différentielle nous donne :

$$V_S = -\frac{I_S}{C} t + V_{Smax} \quad (\text{II.23})$$

At $= \alpha T$, on a :

$$V_S(\alpha T) = V_{Smin} = -\frac{I_S}{C} \alpha T + V_{Smax} \quad (\text{II.24})$$

Et par suit on a

$$\Delta V_S = V_{Smax} - V_{Smin} = \frac{I_S}{C} \alpha T \quad (\text{II.25})$$

Finalement :

$$\Delta V_S = \frac{\alpha V_S}{R.C.f} \quad (\text{II.26})$$

Cette expression montre que l'ondulation en tension diminue lorsque la fréquence de Commutation f ou les valeurs du condensateur C augmente.

Le dimensionnement du condensateur C , à partir d'une ondulation en tension donnée, s'effectue à l'aide de l'inéquation suivante :

$$C \geq \frac{\alpha_{max} V_S}{R.\Delta V_S.f} \quad (\text{II.27})$$

II.7.3 Hacheur abaisseur élévateur « Buck-Boost »

Les hacheurs à liaison indirecte ou à accumulation, qui associent deux sources de même nature à stockage inductif, connues par (série – parallèle) ou Buck –Boost.

La topologie de ce dernier est donnée par la figure (II.9).

$$U_s = \frac{\alpha}{(1-\alpha)} U_e \quad (\text{II.28})$$

L'équation (II.28), décrit la relation entre les tensions entrée et sortie du Buck –Boost [32].

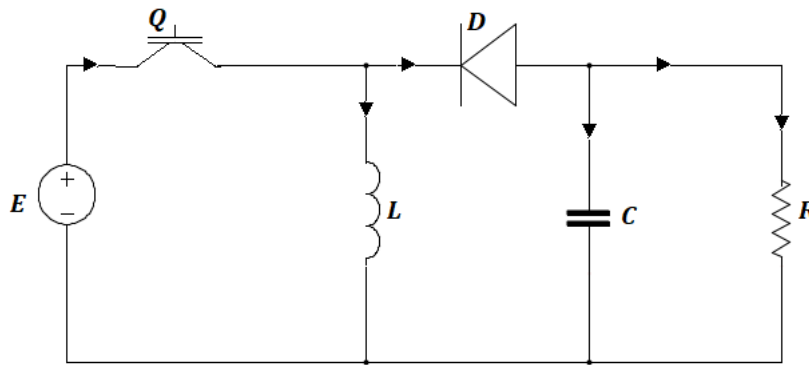


Figure II.9 Schéma de principe du convertisseur ‘Buck Boost’.

II.8 Modélisation du hacheur Boost [34]

II.8. 1 Structure hacheur Boost

La figure (II.10) représente le schéma de principe d’un convertisseur Boost.

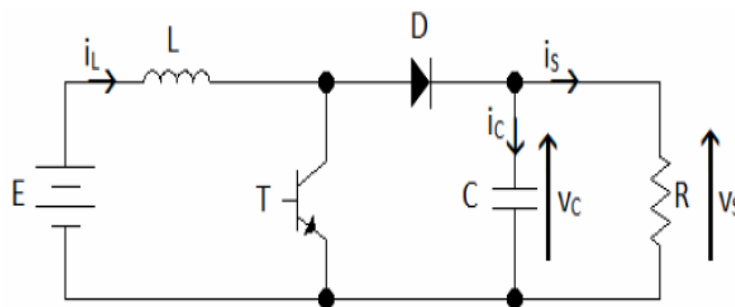


Figure II.10 Schéma du hacheur Boost

Les grandeurs d’état sont définies comme suit :

- le courant dans l’inductance i_L
- la tension V_S aux bornes de condensateur

On pose le vecteur d’état $X = \begin{bmatrix} i_L \\ V_S \end{bmatrix}$

Etat 1 : L’interrupteur est fermé suivant la figure (II.11) :

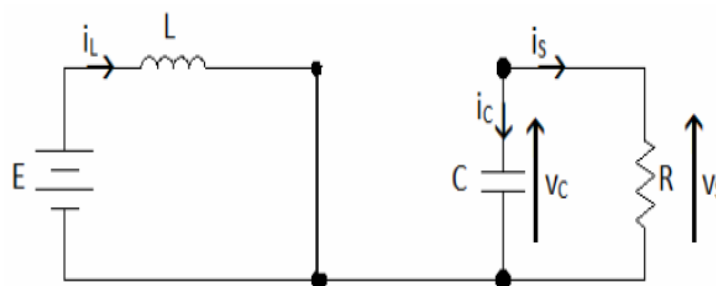


Figure II.11 Schéma du hacheur Boost quand l’interrupteur est fermé

On obtient les relations (II.29) et (II.30) faisant intervenir les différentes grandeurs d'état :

$$E = L \frac{di_L}{dt} \quad (\text{II.29})$$

$$i_C + i_S = 0 \Rightarrow C \frac{dv_S}{dt} + \frac{v_S}{R} = 0 \quad (\text{II.30})$$

En combinant les deux relations, on obtient :

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{E}{L} \quad (\text{II.31})$$

$$\frac{dv_S}{dt} = -\frac{v_S}{CR} \quad (\text{II.32})$$

On peut récrire ce système d'équations sous la forme d'une équation d'état :

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} \frac{1}{L} \\ 0 \end{bmatrix} E = A_1 x + B_1 E \quad (\text{II.33})$$

Etat 2 : L'interrupteur est ouvert représenté par figure (II.12) :



Figure II.12 Schéma du hacheur Boost quand l'interrupteur est ouvert

On considère les relations suivantes :

$$E = L \frac{di_L}{dt} + v_S \quad (\text{II.34})$$

$$i_C + i_S = i_L \Rightarrow C \frac{dv_S}{dt} + \frac{v_S}{R} = i_L \quad (\text{II.35})$$

En combinant les relations II.34 et II.35, on obtient :

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{E}{L} - \frac{v_S}{L} \quad (\text{II.36})$$

$$\frac{dv_S}{dt} = \frac{i_L}{C} - \frac{v_S}{CR} \quad (\text{II.37})$$

On obtient l'équation d'état suivante II.10 comme suit :

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{C} & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} \frac{1}{L} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} E = A_2 x + B_2 E \quad (\text{II.38})$$

II.8.2 Obtention du modèle d'état instantané

Pour obtenir le modèle d'état instantané, il suffit de combiner les équations (II.33) et (II.38), on obtient :

(II.33) $\times \alpha +$ (II.38) $\times (1 - \alpha)$ ce qui donne l'équation (II.39) :

$$\dot{x} = (A_1 \alpha + A_2(1 - \alpha))x + (B_1 \alpha + B_2(1 - \alpha))E \quad (\text{II.39})$$

Après le calcul on obtient le modèle suivant :

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & -\frac{(1-\alpha)}{2L} \\ \frac{(1-\alpha)}{C} & -\frac{(2-\alpha)}{RC} \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} \frac{1}{L} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} E = Ax + BE \quad (\text{II.40})$$

II.8.3 Le model moyen

Pour passer au modèle moyen, on pose les grandeurs moyennes comme suit :

$$\begin{cases} \alpha = \alpha_e + \tilde{\alpha} \\ X = X_e + \tilde{x} \end{cases} \quad (\text{II.41})$$

Tel que :

- X_e : désigne la valeur à l'équilibre de la grandeur x
- \tilde{x} : désigne une variation basse fréquence (par rapport à la fréquence de découpage) de cette grandeur.
- α_e : désigne la valeur de à l'état d'équilibre.

II.8.4 Etude de l'état d'équilibre

Le point d'équilibre X_e est calculé en imposant $\tilde{x} = \mathbf{0}$. Cette équation conduit à l'expression suivante :

$$X_e = -A^{-1}BE \quad (\text{II.42})$$

Ce qui donne le résultat suivant :

$$\begin{cases} i_{L_e} = \frac{E}{R(1-\alpha_e)^2} \\ V_{se} = \frac{E}{(1-\alpha_e)} \end{cases} = \mathbf{X}_e \quad \text{(II.43)}$$

II.8.5 Linéarisation autour de l'état d'équilibre ($\mathbf{X}_e ; \alpha_e$)

Le modèle moyen obtenu est un modèle non-linéaire, Donc Pour obtenir le modèle d'état petit signaux du hacheur, nous allons linéariser le modèle d'état moyen autour de l'état d'équilibre ($\mathbf{X}_e ; \alpha_e$).

On considère le système d'état linéaire représenté par l'équation II.44 :

$$\dot{\tilde{\mathbf{x}}} = \mathbf{A}\tilde{\mathbf{x}} + \mathbf{B}\tilde{\alpha} \quad \text{(II.44)}$$

Tel que :

$$\mathbf{A} = \mathbf{A}_1\alpha_e + \mathbf{A}_2(1 - \alpha_e) \quad \text{(II.45)}$$

$$\mathbf{B} = (\mathbf{A}_1 - \mathbf{A}_2)\mathbf{X}_e \quad \text{(II.46)}$$

Alors l'équation d'état s'écrit comme suit :

$$\dot{\tilde{\mathbf{x}}} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & -\frac{(1-\alpha_e)}{2L} \\ \frac{(1-\alpha_e)}{C} & -\frac{(2-\alpha_e)}{RC} \end{bmatrix} \tilde{\mathbf{x}} + \begin{bmatrix} \frac{E}{L(1-\alpha_e)} \\ -\frac{E}{RC(1-\alpha_e)^2} \end{bmatrix} \tilde{\alpha} \quad \text{(II.47)}$$

- Les paramètres du système sont :

L'inductance de la bobine L en [H], la capacité du condensateur C en [F] et la résistance de la charge R en [Ω].

La figure (II.13) représente le modèle mathématique du Boost à un niveau, inspiré du système (II.47).

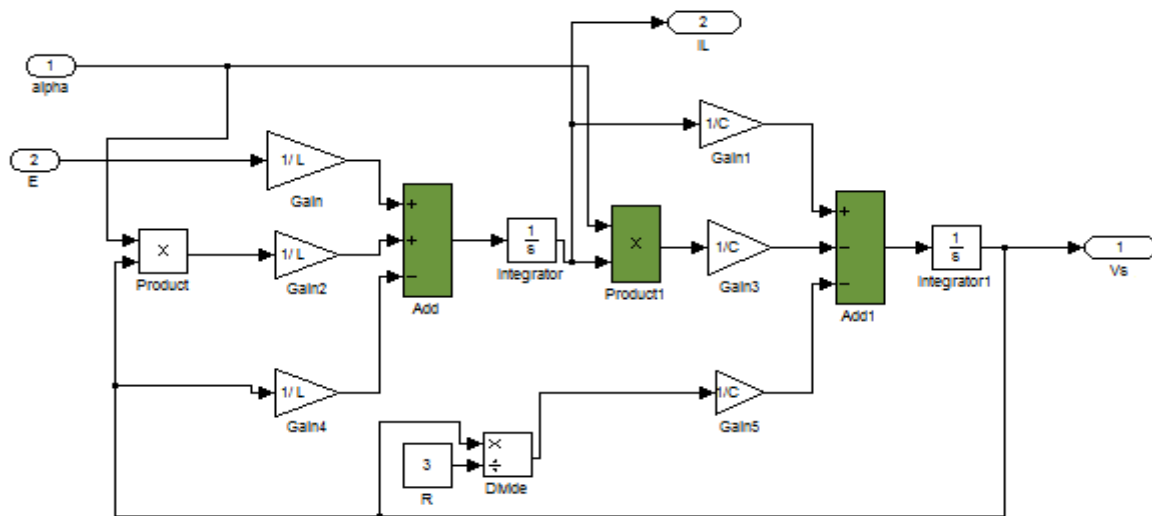


Figure II.13 Model du Boost d'un seul niveau sous Simulink

II.9 Dimensionnement et choix des composants L et C de l'hacheur Boost

Le dimensionnement des différents composants du circuit du convertisseur est indispensable de manière que les ondulations des courants et des tensions ne convergent pas hors le taux d'ondulation souhaités.

Un calcul de ces composants en fonction des ondulations voulues est nécessaire.

Cette opération est très importante surtout pour le dimensionnement de l'inductance L, afin de respecter le courant admissible par l'interrupteur où dans le cas pratique les ondulations du courant sont plus importantes par rapport aux autres ondulations [33].

Le dimensionnement est effectué par l'intermédiaire des deux équations suivante (II .48 et II.49) : généralement pour $\Delta V_S = 5\%$ et un ΔI_L voulue, on peut écrire.

$$C \geq \frac{\alpha \times P_{max}}{\Delta V_S \times f \times V_S} = \frac{\alpha \times P_{max}}{5\% \times f \times V_S^2} \quad (\text{II.48})$$

$$L \geq \frac{V_S}{4 \times f \times \Delta I_L} \quad (\text{II.49})$$

Avec un rapport cyclique :

$$\alpha = 1 - \frac{V_{pv}}{V_S} \quad (\text{II.50})$$

II.10 Technique 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.

Ces 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. Ces commandes sont connues sous le nom de MPPT 'Maximum Power Point Tracking' associées à l'hacheur, lequel assure le couplage entre le générateur PV et le récepteur en forçant le premier à délivrer sa puissance maximale.

Les techniques MPPT sont utilisées dans les systèmes photovoltaïques pour maximiser la puissance délivrée par le panneau photovoltaïques en poursuivant continuellement le point de puissance maximale, ce qui n'est pas évident à atteindre. En effet, ce problème de poursuite fait jusqu'à nos jours l'objet de plusieurs recherches. Aussi, plusieurs méthodes ont été élaborées et utilisées [35].

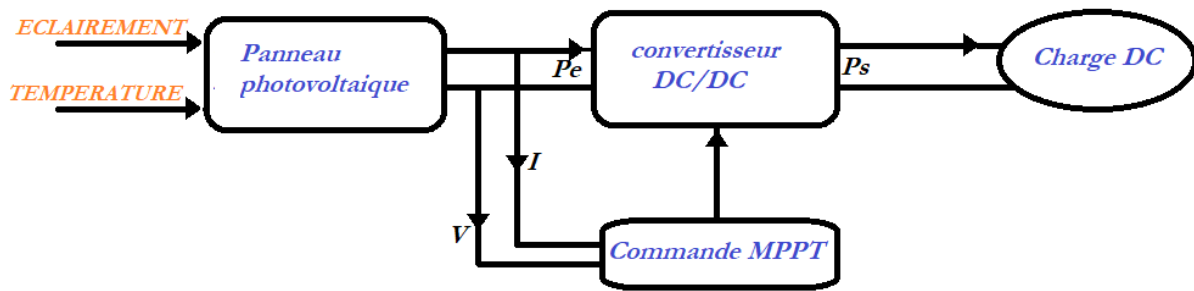


Figure II.14 Principe de la commande MPPT d'un système photovoltaïque à base d'un hacheur

II.11 Principe de la recherche du point de puissance maximal

Cette méthode permet au générateur PV de travailler à sa puissance maximale quel que soit les conditions météorologiques d'irradiations et de température. Un contrôleur MPPT permet donc de piloter le convertisseur statique reliant la charge et le panneau photovoltaïque de manière à fournir en permanence le maximum de puissance à la charge chaque instant [36].

L'algorithme MPPT peut être plus ou moins compliqué pour rechercher le MPP. En général, il est basé sur la variation du rapport cyclique du CS en fonction de l'évolution des paramètres d'entrée de ce dernier (I et V et par conséquent de la puissance du GPV) jusqu'à se placer sur le MPP. Plusieurs algorithmes sont disponibles [37].

II.12 Types d'algorithme de MPPT

On a plusieurs algorithmes de MPPT, les plus utilisés sont :

- Algorithmes Perturber et Observer (P&O).
- Algorithmes de la conductance incrémentale (INC).
- Algorithme "Hill Climbing".

II.12.1 Algorithmes Perturber et Observer (P&O)

Le principe de la commande MPPT de type P&O consiste à perturber la tension V_{PV} d'une faible amplitude autour de sa valeur initiale et d'analyser le comportement de la variation de puissance P_{PV} qui en résulte ainsi, comme l'illustre la figure (II.14). On peut déduire que si une incrémentation positive de la tension V_{PV} engendre un accroissement de la puissance P_{PV} , cela signifie que le point de fonctionnement se trouve à gauche du PPM. Si au contraire, la puissance décroît, cela implique que le système a dépassé le PPM.

Un raisonnement similaire peut être effectué lorsque la tension décroît. A partir de ces diverses analyses sur les conséquences d'une variation de tension sur la caractéristique $P_{pv}(V_{pv})$, il est alors facile de situer le point de fonctionnement par rapport au PPM, et de faire 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 P_{pv} augmente, la direction de perturbation est maintenue. Dans le cas contraire, elle est inversée pour reprendre la convergence vers le nouveau PPM. La figure (II.15) 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 [38].

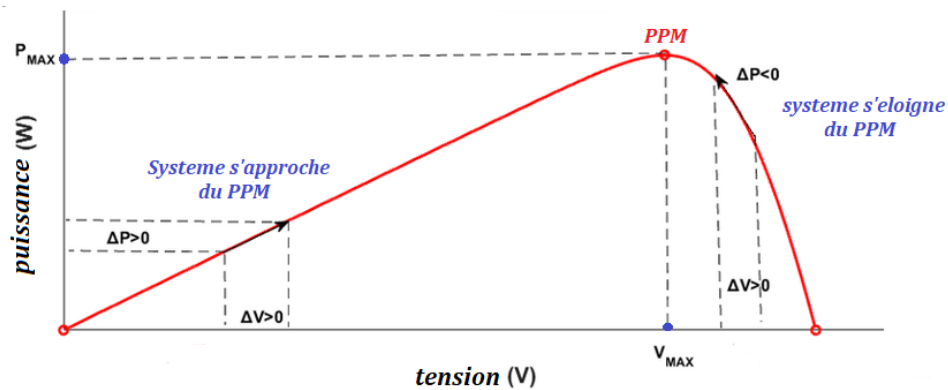


Figure II.15 Illustration de la méthode P&O

Pour ce type de commande, deux capteurs (courant et tension du GPV) sont nécessaires pour déterminer la puissance du GPV à chaque instant.

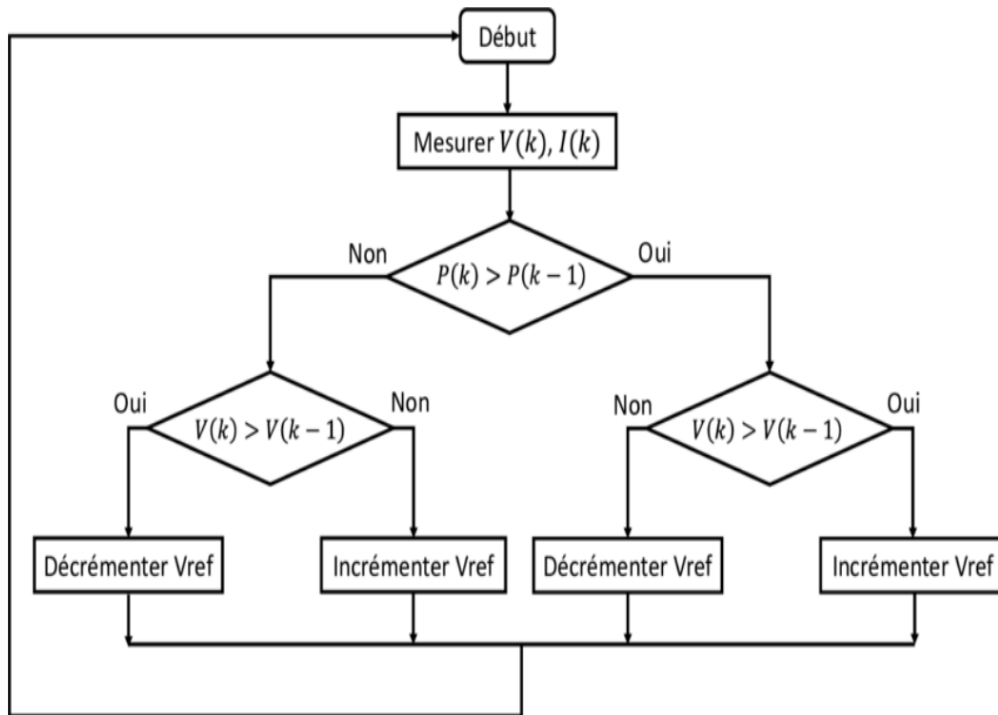


Figure II.16 Algorithme de MPPT à base de la méthode P&O

II.12.2 Algorithmes de la conductance incrémentale (INC) [39][40]

Pour rechercher les PPM, cette autre technique se base sur la connaissance de la variation de conductance du GPV et des conséquences sur la position du point de fonctionnement par rapport à un PPM de la figure (II.16). Ainsi, la conductance du module photovoltaïque est définie par le rapport entre le courant et la tension du GPV.

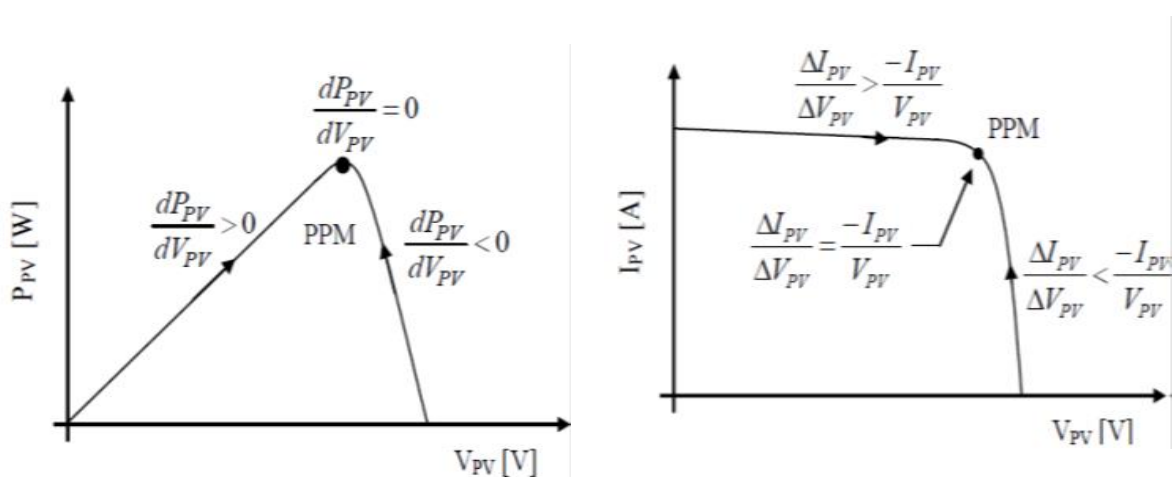


Figure II.17 Positionnement du point de fonctionnement suivant le signe.

- (a) $\frac{dp_{pv}}{dV_{pv}}$ sur la caractéristique de puissance, (b) $\frac{\Delta I_{pv}}{\Delta V_{pv}}$ sur la caractéristique de courant

Le schéma de principe de cette méthode est illustré sur la figure (II.17)

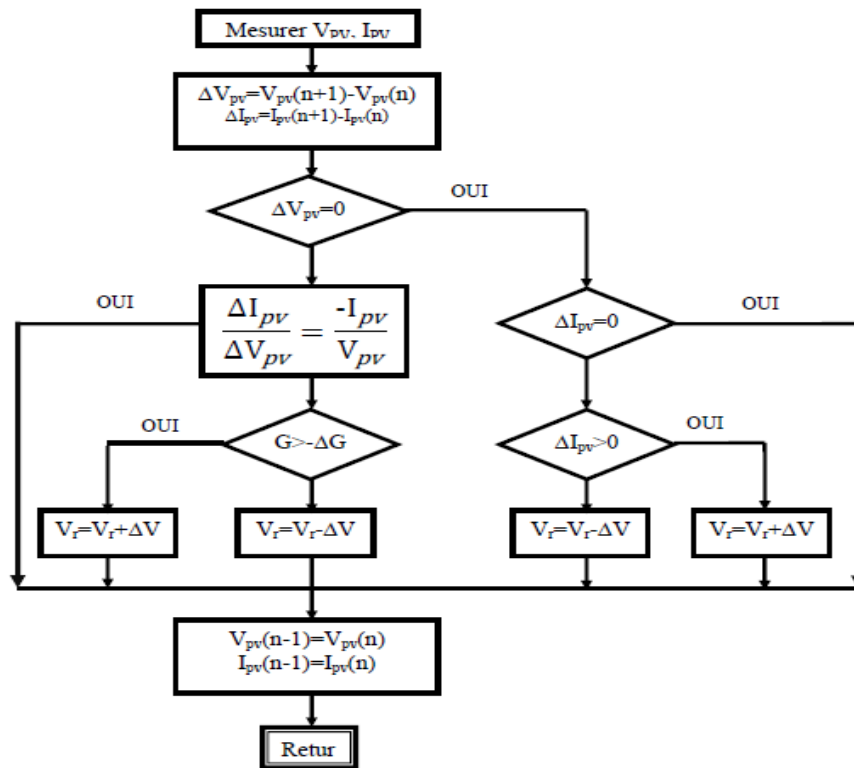


Figure II.18 Algorithme d'une commande MPPT basée sur la méthode Increment de Conductance

II.13 Simulation

II.13.1 Calcul des valeurs des composants L et C du Boost :

Dans cette partie, on a effectué le calcul des éléments passifs du Boost (La capacité C et L'inductance L) pour obtenir une tension de sortie élevée égale 48V au point de puissance maximale du panneau, à partir d'une tension d'entrée égale à 17.04V. On a réalisé cette simulation pour un éclairage variable ($E=500W/m^2$, $E=800W/m^2$, $E=10000W/m^2$), avec une température fixée à $T=25^\circ C$.

Les paramètres de simulation adaptée à notre hacheur Boost à un niveau sont :

- Fréquence de hachage fixé à 11KHz
- Taux d'ondulation de tension : $V_S \leq 5\% V_S$
- Taux d'ondulation du courant : $I_L \leq 0.1A$
- Tension d'entrée : $V_{entrée} = 17.04 V$
- La puissance maximale du panneau PV : $P_{max} = 60.54 W$
- Tension de sortie choisie $V_{sortie} = 48 V$
- Le courant maximale : $I_{max} = \frac{P_{max}}{V_{sortie}} = 1.26125A$

➤ La résistance : $R_s = \frac{V_s}{I_{max}} = 38.0574 \text{ Ohm}$

❖ Calcul des composants C, L et α :

On utilisant les relations (II.28, II.29 et II.30), on détermine facilement les valeurs de grandeurs suivantes :

▪ **Le gain α :**

$$\alpha = 1 - \frac{V_{entrée}}{V_{sortie}} = \alpha = 0.645$$

▪ **Le condensateur C :**

$$C \geq \frac{\alpha \times P_{max}}{f \times \Delta V_s \times V_s^2} = \frac{0.64 \times 60.54}{11000 \times 5\% \times 48^2} = 3.0809 \times 10^{-5} \text{ F}$$

▪ **L'inductance L :**

$$L \geq \frac{V_{sortie}}{4 \times f \times \Delta I_L} = \frac{48}{4 \times 11000 \times 0.1} = 0.0109 \text{ Henry}$$

II.13.2 Simulation d'un hacheur Boost à un niveau contrôlé en MPPT

II.13.2.1 Simulation par la méthode perturber et observer P&O

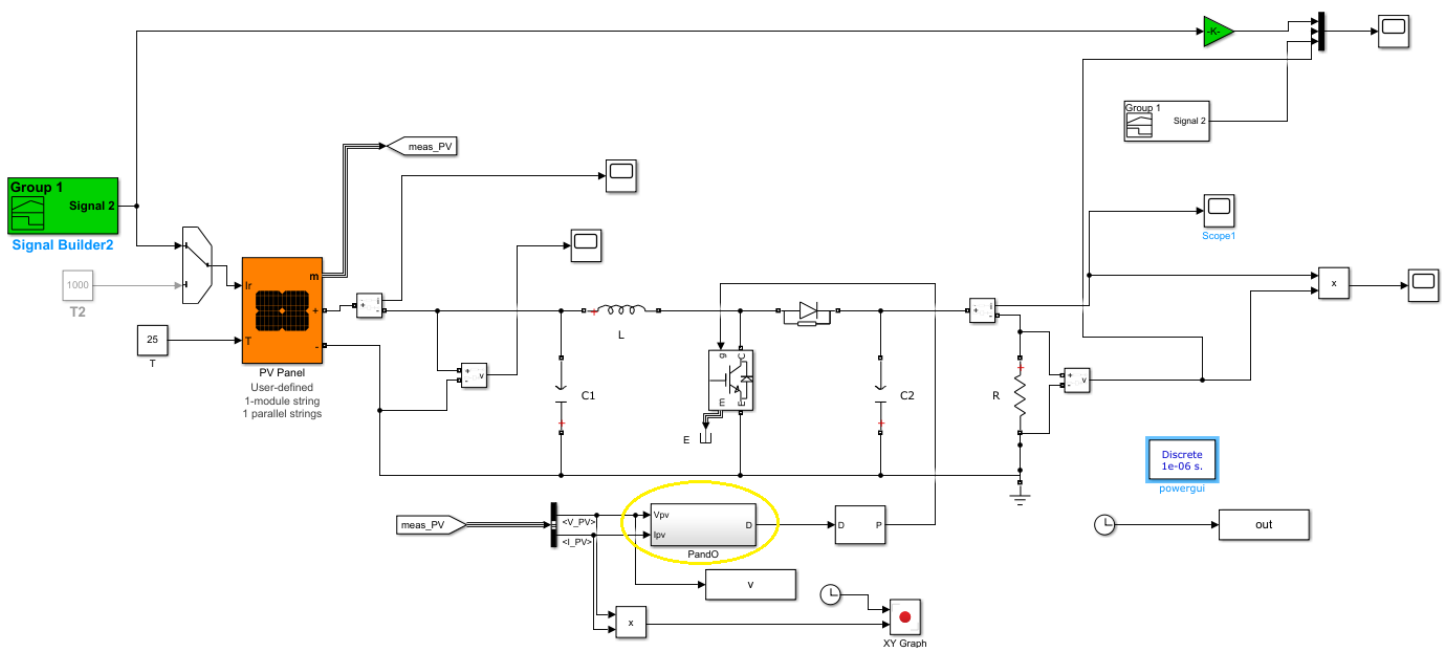


Figure II.19 Schéma block de la simulation d'un hacheur Boost à un niveau à MPPT- P&O

❖ **Variation de l'éclairement :**

L'allure de l'éclairement en fonction du temps est décrite suivant la figure (II.19), où on propose trois éclairements successivement différents ($E=500\text{W/m}^2$, $E=800\text{W/m}^2$, $E=10000\text{W/m}^2$), puis un éclairement décroissant à partir de la première seconde jusqu'à la deuxième seconde (de 10000W/m^2 à 400W/m^2).

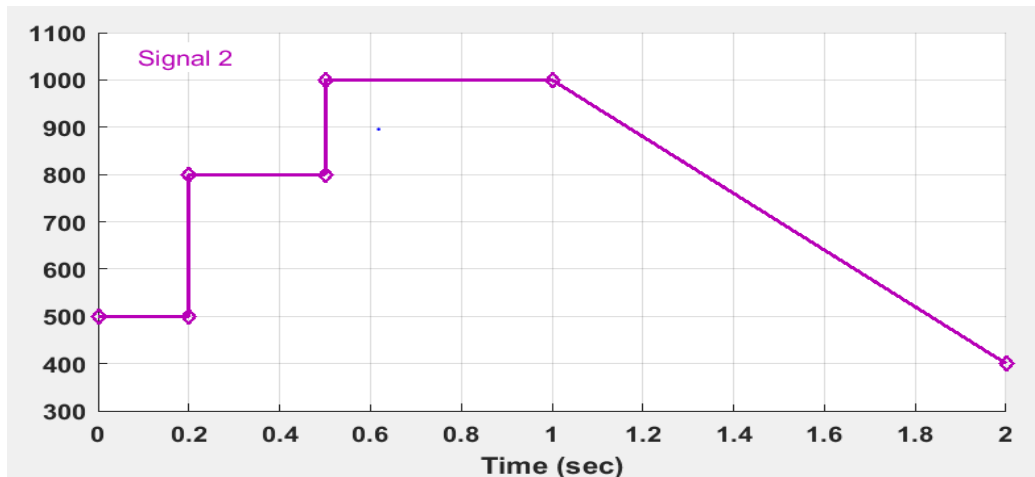


Figure II.20 Signal de l'éclairement appliqué.

Après avoir simulé le schéma block d'un module PV avec un hacheur Boost à un niveau, pour un l'éclairement variable et une température fixée à $T=25^\circ\text{C}$, on obtient les résultats suivants :

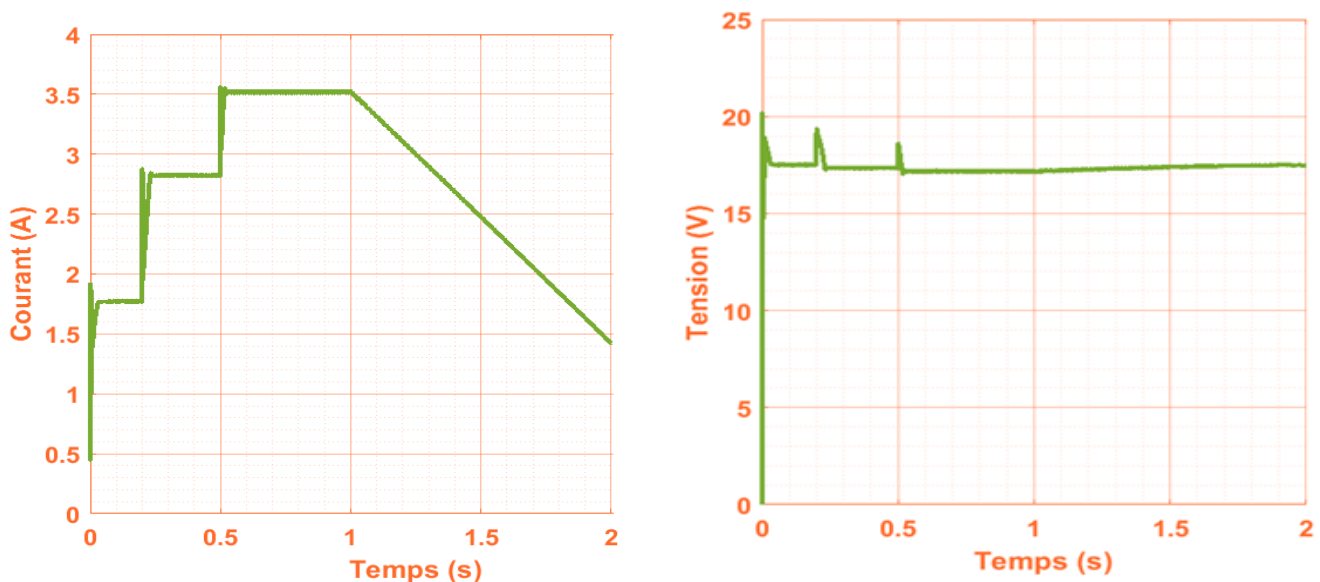


Figure II.21 Courant et tension d'entrée en fonction du temps

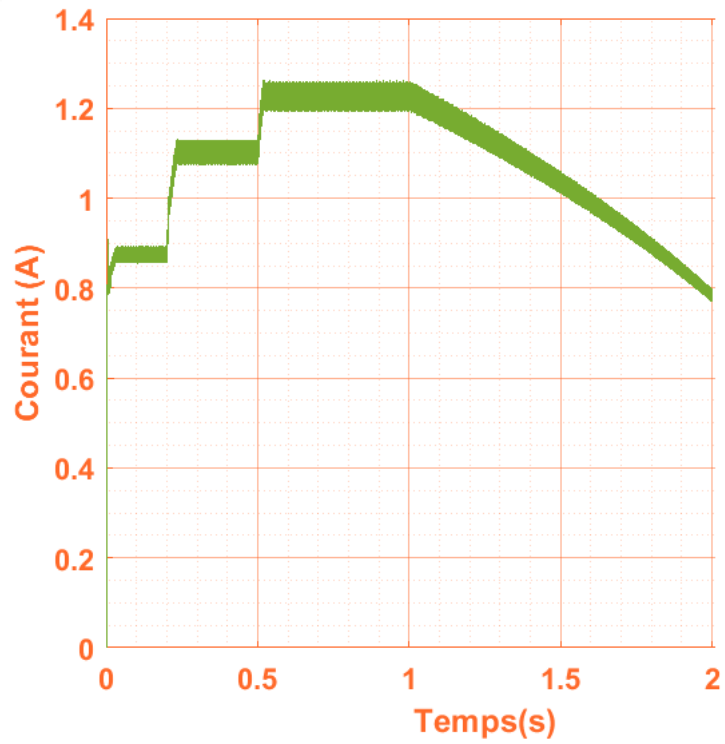


Figure II.22 Courant de sortie par la méthode P&O

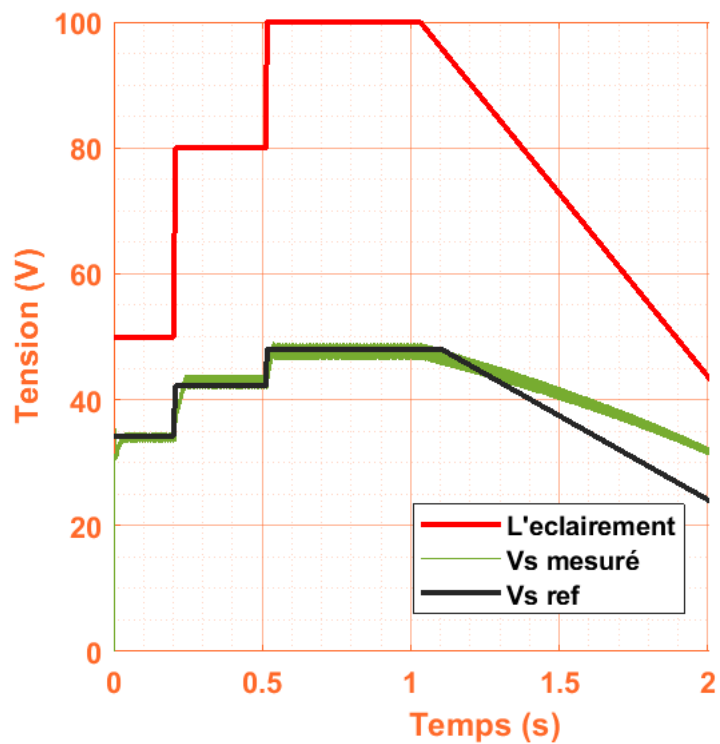


Figure II.23 Tension de sortie par la méthode P&O

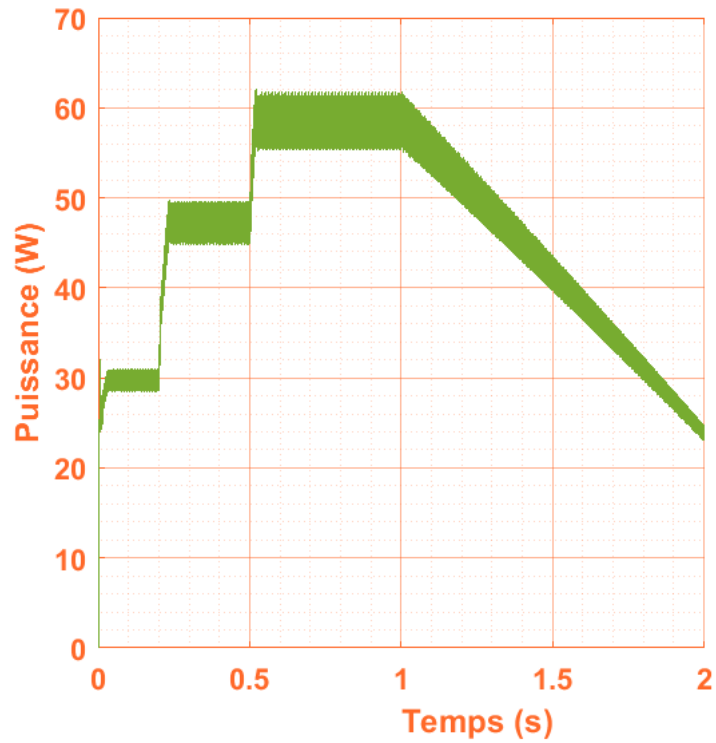


Figure II.24 Puissance par la méthode P&O

II.13.2.2 Simulation par la méthode de la conductance incrémentale (INC)

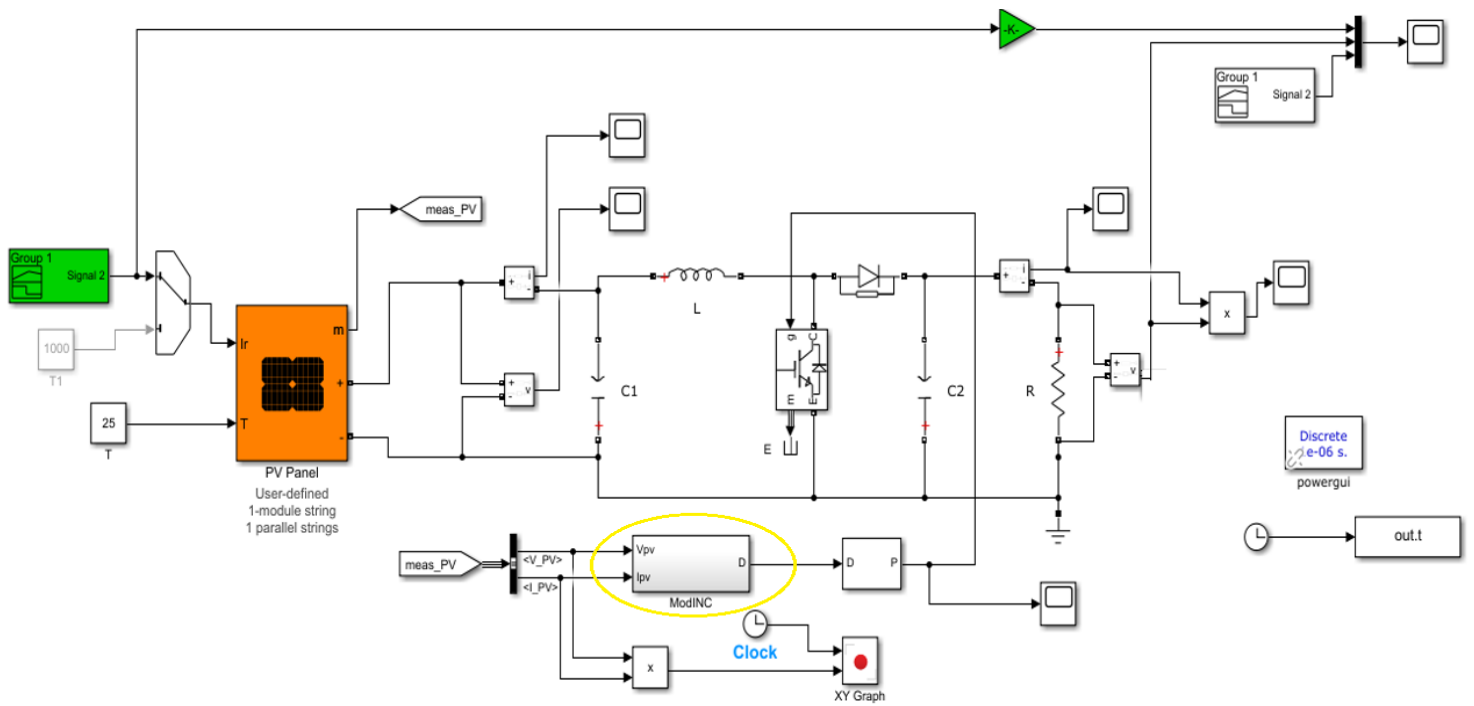


Figure II.25 Schéma de la simulation d'un hacheur Boost à un niveau à MPPT (INC)

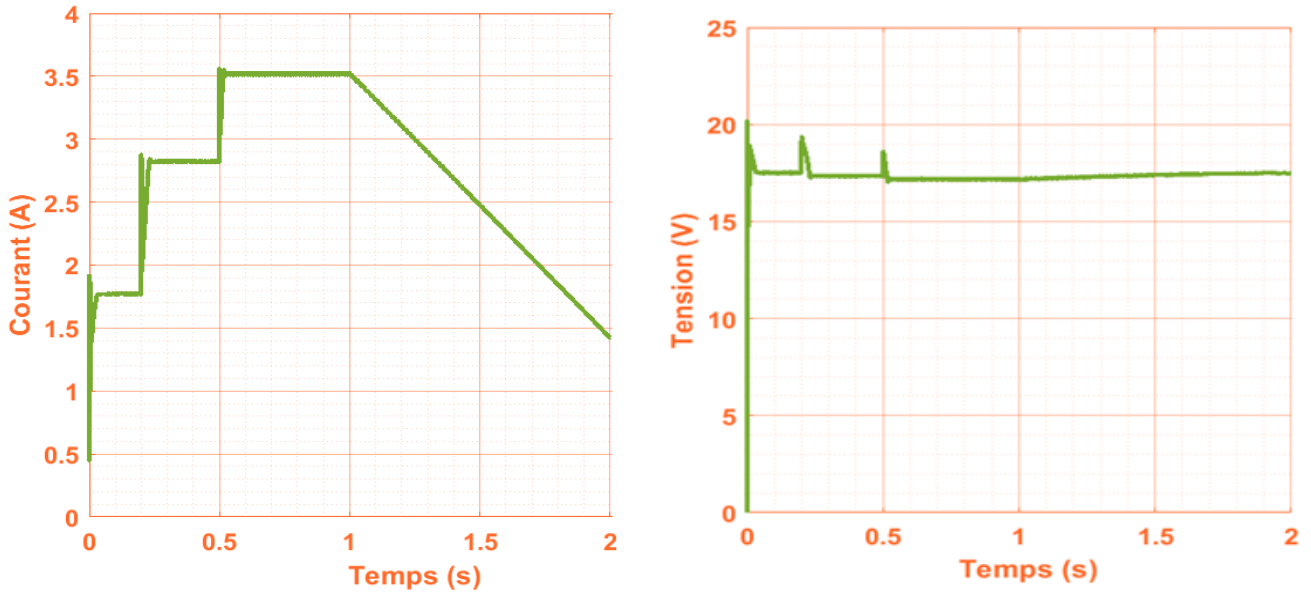


Figure II.26 Courant et tension d'entrée

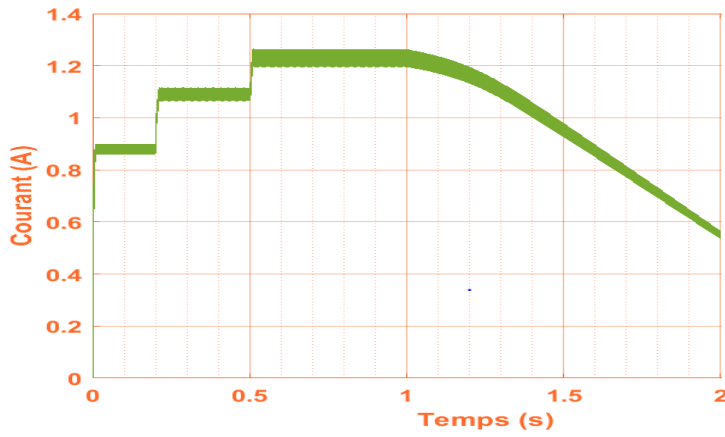


Figure II.27 Courant de sortie par la méthode INC

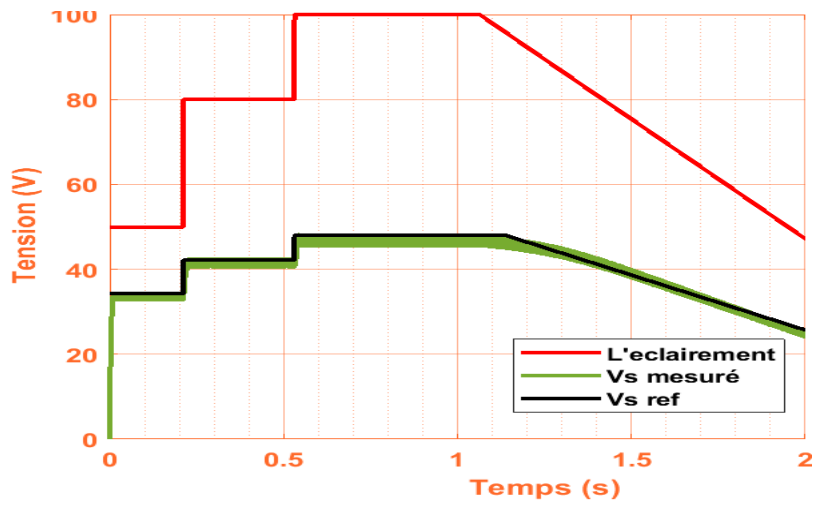


Figure II.28 Tension de sortie et l'éclairage

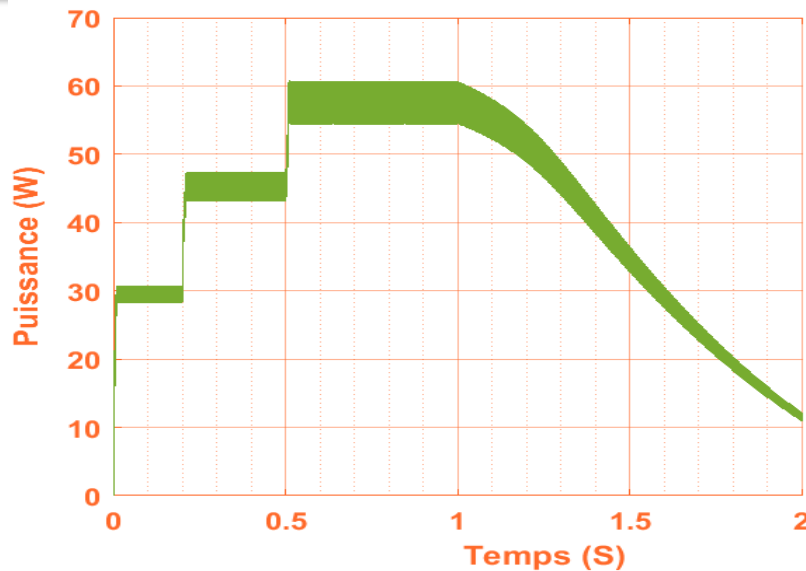


Figure II.29 Puissance par la méthode INC

- **Interprétations des résultats obtenus :**

Les figures qui représentent la tension et le courant de sortie en fonction de temps dans les deux méthodes (P&O et la méthode incrémentale) confirment le rôle du convertisseur Boost à un niveau, qui sert à augmenter la valeur de tension d'entrée de 17.04V à 48V à la sortie en donnant un rapport cyclique de $\alpha_{\max} = 0.645$, ce qui confirme l'efficacité du dimensionnement effectuée sur les éléments passifs L et C.

On constate que le suivi de la puissance et de la tension de sortie par la méthode incrémentale est très performant par rapport à la méthode P&O. La tension mesurée à la sortie du boost suit correctement sa référence pour chaque nouvelle valeur de l'éclairement (voir figure (II.27)- méthode incrémentale).

En revanche la tension mesurée à la sortie du boost subit un retard par rapport à la tension de sortie de référence, dès l'allure descendante de l'éclairement (voir figure (II.22)- méthode P&O). On remarque aussi la réduction des fluctuations dans l'allure du courant de sortie du boost de la méthode incrémentale (voir figure (II.26), par rapport à la méthode P&O (voir figure (II.21)).

Donc la méthode MPPT incrémentale, permet un bon suivi de la référence et réduction des fluctuations des signaux.

II.14 Comparaison des deux algorithmes P&O et INC

La méthode de P&O est une méthode Simple, robuste et efficace dans des conditions de changement rapide de la luminosité solaire. Elle ne nécessite pas des modèles mathématiques complexes mais elle a des problèmes de stabilité. La méthode P&O souffre pour déduire le

point de puissance maximale elle fonctionne autour de la PPM ce qui fait des fluctuations et réduit l'efficacité du système.

Par contre la méthode incrémentale est la solution pour un résultat stable sans des oscillations autour du point de puissance maximale elle converge aussi vers ce point d'une façon rapide que le P&O, mais nécessite une conception plus complexe.

II.15 Conclusion

Après un rappel sur les différents types d'hacheur et leurs modes de fonctionnement, particulièrement le boost à un niveau et son modèle mathématique. On a mis en œuvre les deux techniques de contrôle MPPT (P&O et INC) pour la commande du boost à un niveau. Les résultats de simulations obtenus pour différentes valeurs d'ensoleillement, ont montré l'efficacité de la technique incrémentale (suivi de la référence et réduction des fluctuations de courant) par rapport à la méthode P&O, ainsi que le bon fonctionnement du boost à un niveau sous les deux techniques de contrôle.

Le chapitre suivant, fera l'objet de la modélisation et simulation d'un hacheur Boost multi-niveaux.

Chapitre 03

Modélisation et simulation des convertisseurs-DC-DC Boost multi-niveaux

III.1. Introduction

Un hacheur multi-niveau est un type de convertisseur avancé de puissance utilisé en électronique de puissance. Contrairement aux hacheurs classiques à un niveau qui ne peuvent produire qu'un seul niveau de tension de sortie. Les hacheurs multi-niveaux peuvent produire plusieurs niveaux de tension de sortie en modifiant la structure du convertisseur en se basant sur le nombre de condensateurs utilisés à la sortie ou le nombre de semi-conducteurs à l'entrée du convertisseur.

La modélisation est une étape importante qui permet d'introduire un certain nombre de modèles, traduisant les relations électriques qui gèrent ainsi le fonctionnement du convertisseur statique. Ce chapitre, a pour objet la modélisation et la simulation d'un hacheur Boost à deux et à trois niveaux. Les résultats obtenus sont exposés et critiqués.

III.2 Le convertisseur multi-niveau

Un convertisseur statique est dit « multi-niveaux » 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 multi-niveaux 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 multi-niveaux 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 multi-niveaux permet de supprimer des familles entières de raies harmoniques [41].

III.3. Les différentes topologies du Boost multi niveaux

On distingue trois topologies qui représentent les convertisseurs DC-DC Boost multi-niveaux.

La figure (III.1) représente les schémas de base de ces types de convertisseurs :

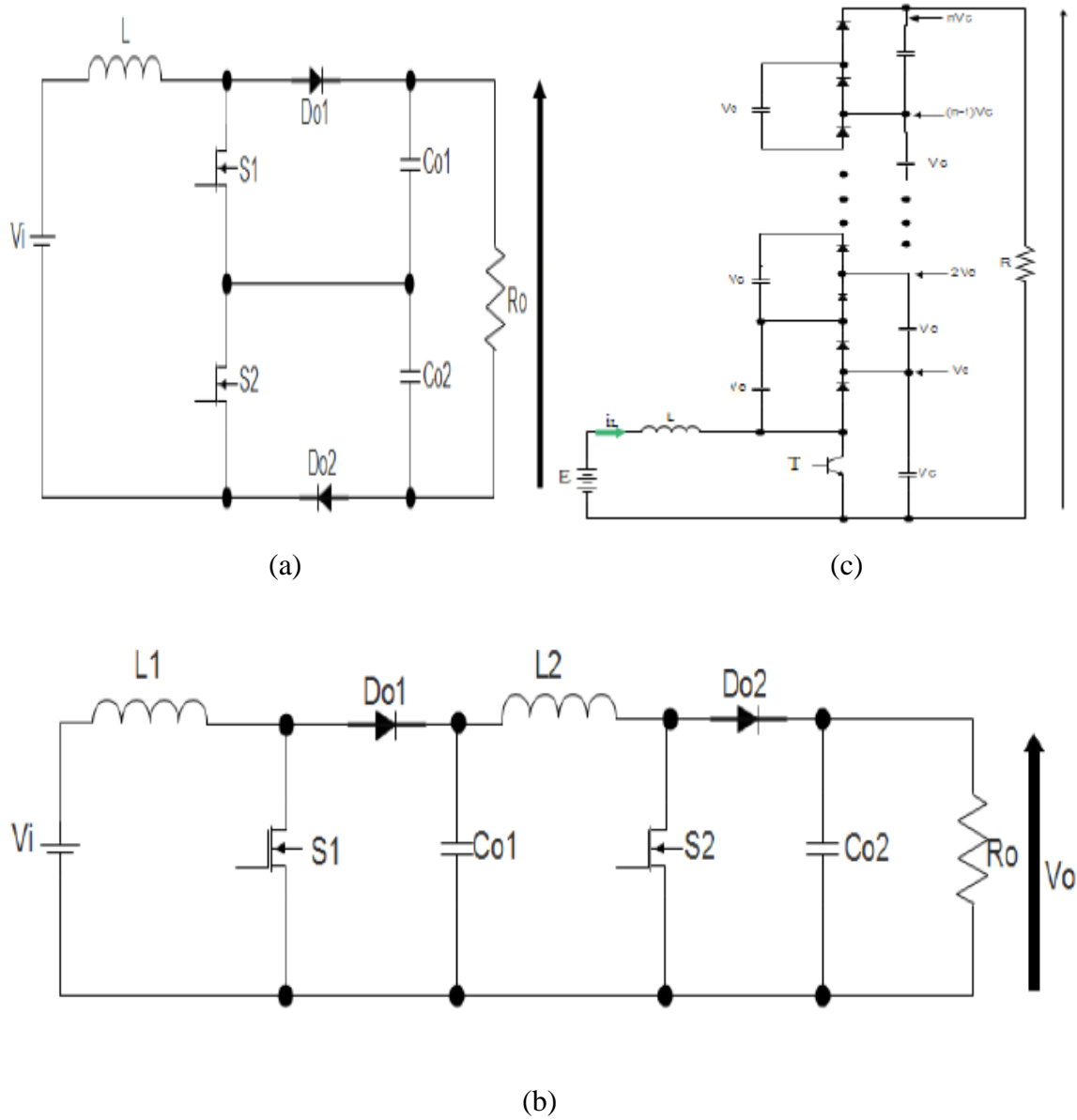


Figure III.1 Différents types de topologie des convertisseur DC-DC Boost multi-niveaux [42][43]

❖ **Avantages et les inconvénients des convertisseurs DC-DC Boost multi-niveaux**

Les types de topologie	Les avantages	Les inconvénients
Un hacheur Boost en Cascade (a)	- Gain de tension est élevé - Faible ondulation de tension	- Complexité de la commande - Ondulations de courant - Pertes élevées - Prix élevé.
Un hacheur Boost trois niveaux conventionnel (b)	- Faible ondulation de tension - Faible ondulation du courant.	- Faible gain de tension - Complexité de la commande - Pertes élevées
Un hacheur Boost multi-niveaux (c)	- Gain de tension élevé - Auto équilibrage des capacités. - Simple commande. - Un seul commutateur de puissance.	- Plus le nombre de niveaux augmente plus le nombre de composant augmente. - Plus le nombre de composants augmente plus le prix augmente.

Tableau III.1 Comparatif des différentes structures [44]

❖ **Tableau de gain en tension**

Convertisseurs	Gain
BOOST UN NIVEAU	$\frac{1}{1 - \alpha}$
BOOST A DEUX NIVEAUX	$\frac{2}{1 - \alpha}$
CASCADE BOOST	$\left(\frac{1}{1 - \alpha}\right)^2$
BOOST MULTI-NIVEAUX	$\left(\frac{N}{1 - \alpha}\right)^2$

Tableau III.2 Gain en tension des convertisseurs

III.4 Modélisation des hacheurs Boost multi-niveaux

III.4.1 Modèle moyen de convertisseur DC/DC multi-niveaux

Le modèle moyen est obtenu en considérant la moyenne des deux ou trois équations d'état selon le mode de fonctionnement du convertisseur (mode de conduction continue ou bien discontinue) sur une période de découpage. Chaque configuration du circuit d'un

convertisseur est représentée par un modèle linéaire à temps continu. Les expressions mathématiques des dynamiques continues sont obtenues en appliquant les lois de Kirchhoff qui décrivent le comportement du convertisseur dans chacune des configurations [45].

Le vecteur d'état des différents modèles est composé par le courant dans les inductances et la tension aux bornes des condensateurs. L'entrée des modèles est donnée par la tension d'alimentation E et par la grandeur de commande correspondant au rapport cyclique.

Dans de tel systèmes, l'ordre d'équations d'états est égal au nombre des variables d'état.

Dans le cas où le système considéré est linéaire, la représentation d'état se met sous la forme [45]:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{Ax} + \mathbf{Bu} \\ \mathbf{y} = \mathbf{Cx} \end{cases}$$

Sachant que :

\mathbf{x} : Vecteur d'état

\mathbf{u} : Vecteur de commande.

\mathbf{A} : matrice d'état.

\mathbf{B} : matrice d'entrée.

\mathbf{y} : Le vecteur de sortie.

\mathbf{C} : matrice de sortie.

III.4.2. Modélisation d'un hacheur Boost à deux niveaux [46]

III.4.2.1. La structure du Boost à deux niveaux

La figure (III.2) représente le schéma de principe d'un convertisseur Boost de deux niveaux.

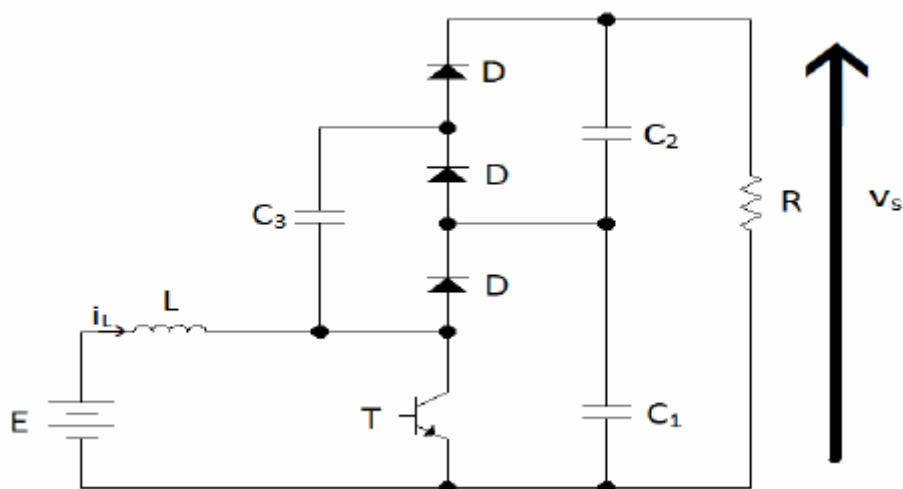


Figure III.2 Schéma de principe du Boost à deux niveaux

- **Fonctionnement :**

- **Etat 1 :** L'interrupteur T est fermé suivant la figure III.3 :

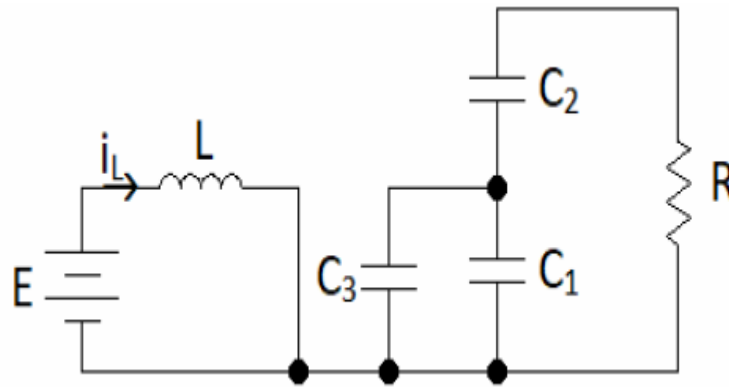


Figure III.3 Schéma du Boost à deux niveaux quand l'interrupteur T est fermé

- **Etat 2** : L'interrupteur est ouvert (figure III.4)

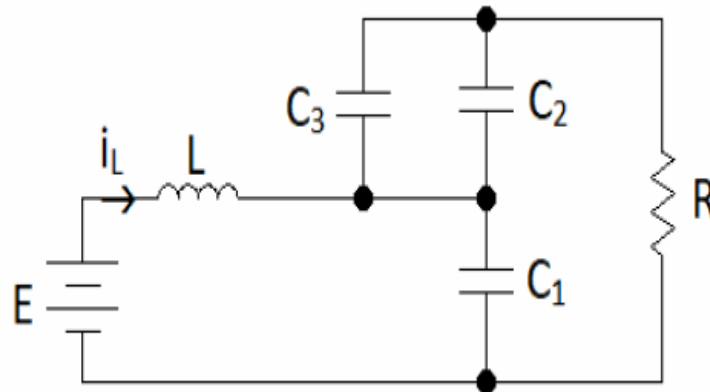


Figure III.4 Schéma du Boost à deux niveaux quand l'interrupteur T est ouvert

Dans le but de réduire l'ordre de système on considère les deux circuits équivalent quand l'interrupteur est fermé (III.5) et ouvert (III.6)

Dans ces deux topologies on considère que :

$$C_1 = C_2 = C_3 = C \quad (\text{III.1})$$

$$C_{eq1} = (C_1 // C_3) = 2C \quad (\text{III.2})$$

$$C_{eq2} = C_1 = C \quad (\text{III.3})$$

De plus, la tension dans chaque sortie de condensateur C_1 et C_2 est égale à la moitié de la tension de sortie V_S :

$$V_1 = V_2 = \frac{V_S}{2} \quad (\text{III.4})$$

La figure (III.5) illustre le schéma réduit du hacheur boost (niveau 2) quand l'interrupteur est fermé.

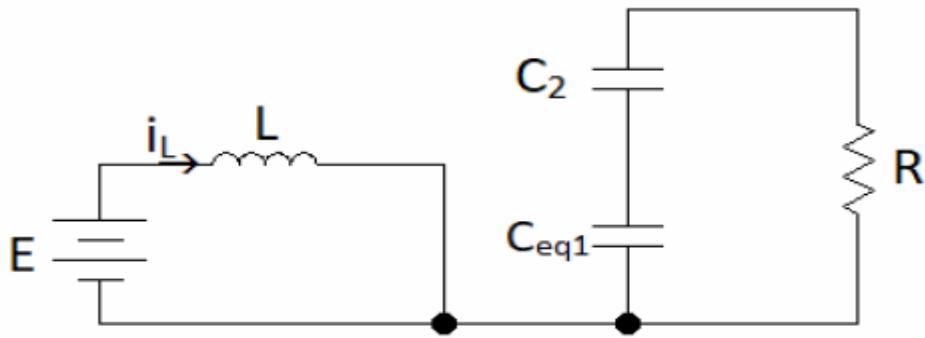


Figure III.5 Schéma réduit du Boost à deux niveaux quand l'interrupteur T est fermé

On pose le vecteur d'état comme suit :

$$X = \begin{bmatrix} i_L \\ v_s \end{bmatrix} \tag{III.5}$$

On obtient alors les relations suivantes :

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{E}{L} \tag{III.6}$$

$$\frac{dv_s}{dt} = -\frac{2V_s}{RC_{eq1}} \tag{III.7}$$

On peut réécrire ce système d'équations sous la forme d'une équation d'état :

$$x = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & -\frac{2}{RC_{eq1}} \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} \frac{1}{L} \\ 0 \end{bmatrix} E = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} \frac{1}{L} \\ 0 \end{bmatrix} E = A_1 x + B_1 E \tag{III.8}$$

La figure (III.6) illustre le schéma réduit de du Boost à deux niveau quand l'interrupteur Test ouvert.

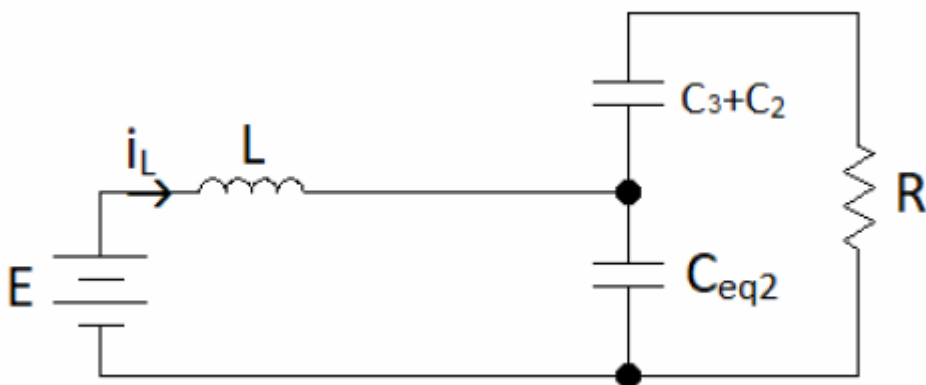


Figure III.6 Schéma réduit du Boost à deux niveaux quand l'interrupteur Test ouvert

On a alors les relations suivantes :

$$\frac{di_l}{dt} = \frac{E}{L} - \frac{V_s}{2L} \quad (\text{III.9})$$

$$\frac{dv_s}{dt} = \frac{i_l}{C_{eq2}} - \frac{2V_s}{RC_{eq2}} \quad (\text{III.10})$$

On obtient l'équation d'état suivante :

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \frac{1}{C_{eq2}} & -\frac{2}{RC_{eq2}} \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} \frac{1}{L} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} E = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \frac{1}{2L} \\ \frac{1}{C} & -\frac{2}{RC} \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} \frac{1}{L} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} E = A_2 x + B_2 \quad (\text{III.11})$$

III.4.2.2. Obtention du modèle d'état instantané : le modèle d'état instantané, est donné par la combinaison des équations (III.8) et (III.11) :

(III.8) × α + (III.11) × (1 - α) ce qui donne l'équation (III.12) :

$$\dot{x} = (A_1 \alpha + A_2 (1 - \alpha)) x + (B_1 \alpha + B_2 (1 - \alpha)) E \quad (\text{III.12})$$

Après le calcul on obtient le modèle suivant :

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & -\frac{(1-\alpha)}{2L} \\ \frac{(1-\alpha)}{C} & -\frac{(2-\alpha)}{RC} \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} \frac{1}{L} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} E = Ax + BE \quad (\text{III.13})$$

III.4.2.3 Le model moyen du Boost à deux niveaux

Comme le convertisseur Boost à un niveau, on pose les grandeurs moyennes suivant (III.14) :

$$\begin{cases} \alpha = \alpha_e + \tilde{\alpha} \\ X = X_e + \tilde{x} \end{cases} \quad (\text{III.14})$$

III.4.2.4 Etude de l'état d'équilibre

Le point d'équilibre X_e est obtenu lorsque $\dot{x} = 0$, ce qui donne le résultat suivant :

$$\begin{cases} i_{le} = \frac{4E}{R(1-\alpha_e)^2} \\ V_{se} = \frac{2E}{(1-\alpha_e)} \end{cases} = X_e \quad (\text{III.15})$$

III.4.2.5 Linéarisation autour de l'état d'équilibre ($x_e ; \alpha_e$)

Le système d'état linéarisé est donné par l'équation (III .16):

$$\dot{\tilde{x}} = A\tilde{x} + B\tilde{\alpha} \tag{III.16}$$

Avec :

$$A = A_1\alpha_e + A_2(1 - \alpha_e) \tag{III.17}$$

$$B = (A_1 - A_2)X_e \tag{III.18}$$

Alors l'équation d'état s'écrit comme suit :

$$\dot{\tilde{x}} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{(1-\alpha_e)}{2L} \\ \frac{(1-\alpha_e)}{C} & -\frac{(2-\alpha_e)}{RC} \end{bmatrix} \tilde{x} + \begin{bmatrix} \frac{E}{L(1-\alpha_e)} \\ -\frac{2E(1-\alpha_e)}{RC(1-\alpha_e)^2} \end{bmatrix} \tilde{\alpha} \tag{III.19}$$

La figure (III.7) représente le model mathématique du Boost à deux niveaux, inspiré du Système (III.19).

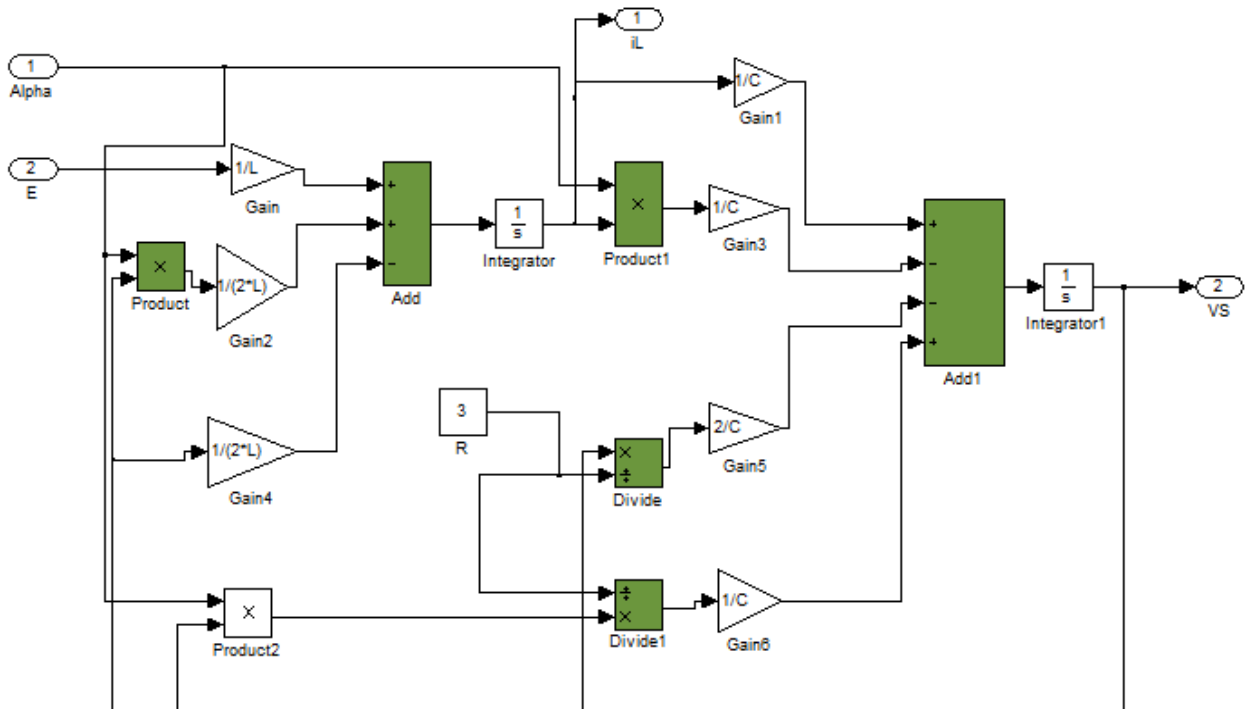


Figure III.7 Model du Boost à deux niveaux sous Simulink

III.4.3 Modélisation du Boost à trois niveaux [47]

III.4.3.1 Structure du Boost à trois niveaux

La figure (III.8) représente le principe d'un convertisseur Boost à trois niveaux.

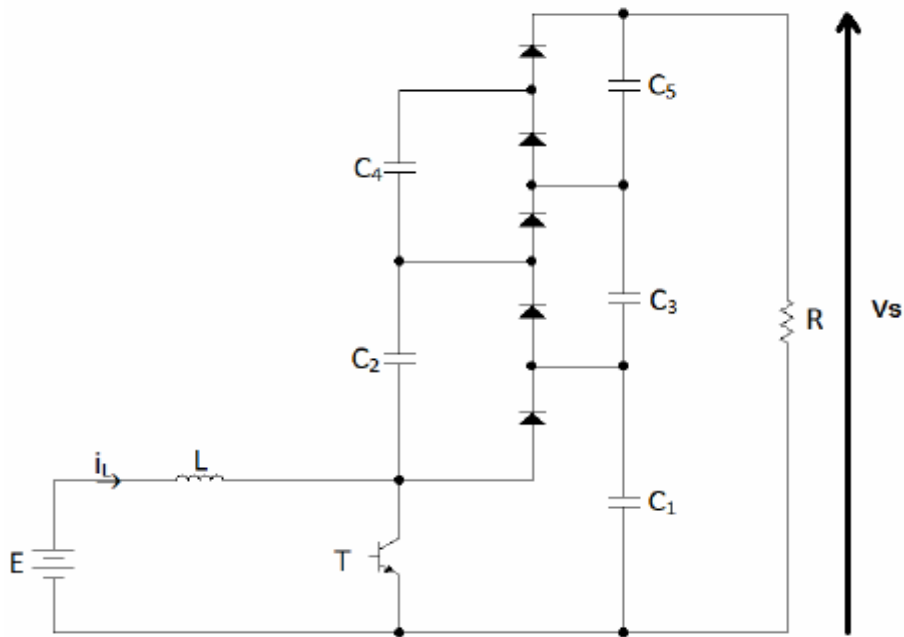


Figure III.8 Schéma de principe du Boost à trois niveaux

Etat 1 : L'interrupteur est fermé (figure III.9)

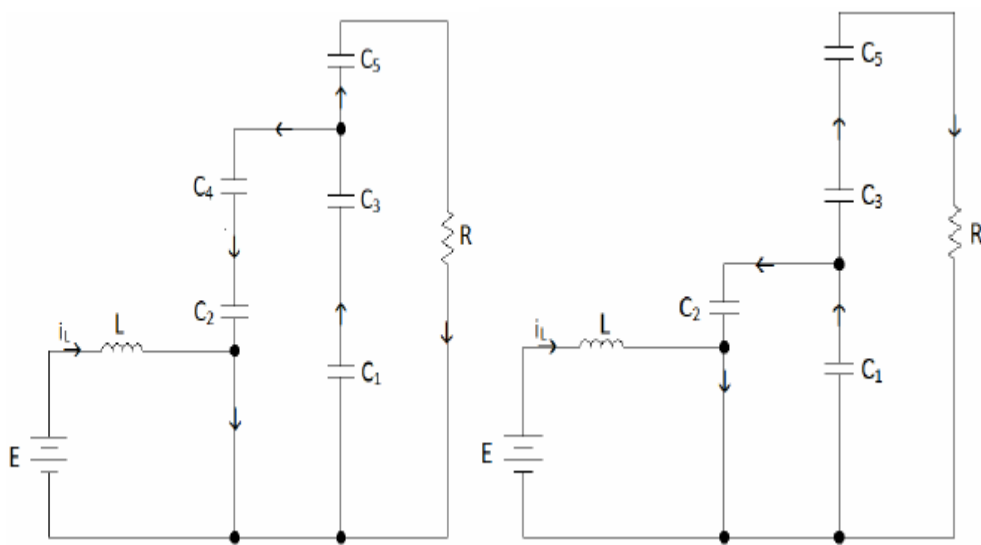


Figure III. 9 Schéma du Boost à trois niveaux quand l'interrupteur T est fermé

Etat 2 : L'interrupteur est ouvert (figure III.10)

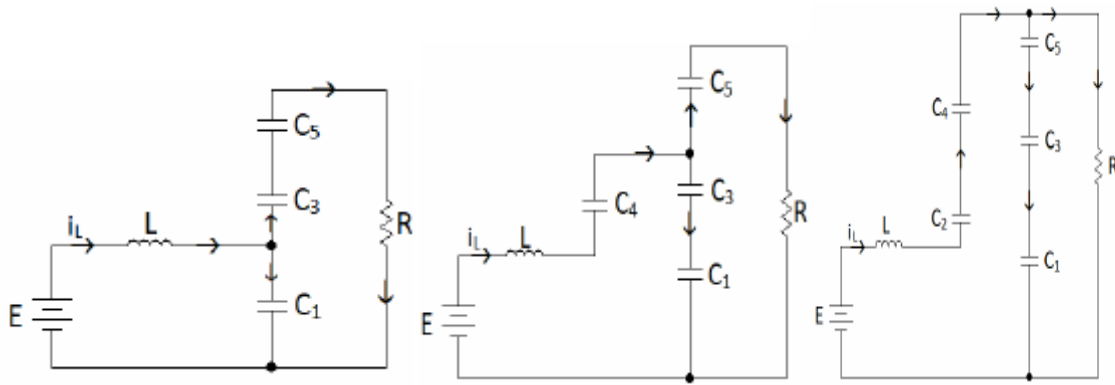


Figure III.10 : Schéma du Boost à trois niveaux quand l'interrupteur T est ouvert

Dans le but de réduire l'ordre de système on considère les deux circuits équivalent quand l'interrupteur est fermé (III.11) et ouvert (III.12)

Dans ces deux topologies on considère que :

$$C_1 = C_2 = C_3 = C_4 = C_5 = C \tag{III.20}$$

$$C_{eq1} = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} + \frac{C_3 C_4}{C_3 + C_4} = C \tag{III.21}$$

$$C_{eq2} = C_1 = C \tag{III.22}$$

$$C_{eq1} = \frac{C_2 C_3}{C_2 + C_3} + \frac{C_4 C_5}{C_4 + C_5} = C \tag{III.23}$$

De plus, la tension dans chaque sortie de condensateur C1, C2 et C3 est égale à la tiers du la tension de sortie V_s :

$$V_1 = V_2 = V_3 = \frac{V_s}{3} \tag{III.24}$$

La figure (III.11) : illustre le schéma réduit du Boost à trois niveau quand l'interrupteur T est fermé.

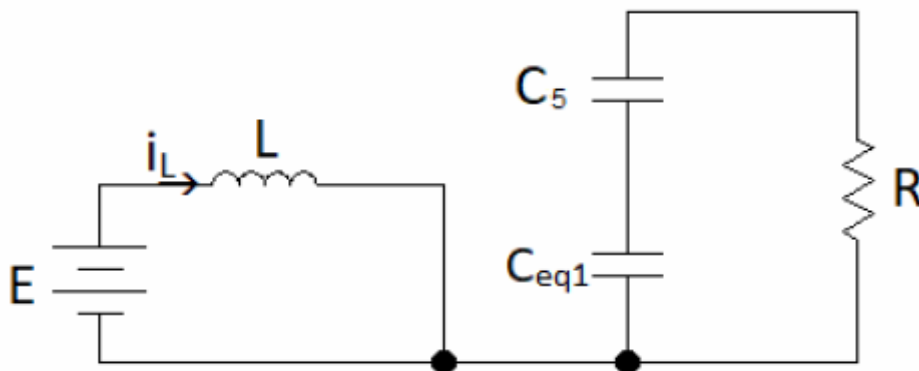


Figure III.11 Schéma réduit du hacheur Boost à trois niveaux quand l'interrupteur T est fermé

On pose le vecteur d'état

$$x = \begin{bmatrix} i_L \\ v_s \end{bmatrix} \quad (\text{III.25})$$

On obtient alors les relations suivantes :

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{E}{L} \quad (\text{III.26})$$

$$\frac{dv_s}{dt} = -\frac{3v_s}{RC_{eq1}} \quad (\text{III.27})$$

On peut réécrire ce système d'équation sous la forme d'une équation d'état :

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & -\frac{3}{RC_{eq1}} \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} E = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & -\frac{3}{RC} \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} E = A_1 x + B_1 E \quad (\text{III.28})$$

La figure (III.12) présente le schéma réduit du Boost à trois niveaux quand l'interrupteur T est ouvert.

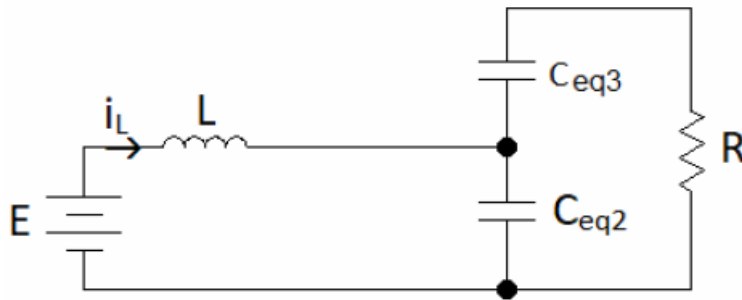


Figure III.12 Schéma réduit du Boost à trois niveau quand l'interrupteur T est ouvert

Ce qui permet d'écrire les équations (III.29 et III.30) :

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{E}{L} - \frac{v_s}{3L} \quad (\text{III.29})$$

$$\frac{dv_s}{dt} = \frac{i_L}{C_{eq2}} - \frac{3v_s}{RC_{eq2}} \quad (\text{III.30})$$

Par la suite et après développement, on obtient le système d'équations d'état suivant(III.31) :

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{3L} \\ \frac{1}{C_{eq1}} & -\frac{3}{RC_{eq2}} \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} E = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{3L} \\ \frac{1}{C} & -\frac{3}{RC} \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} E = A_2 x + B_2 E \quad (\text{III.31})$$

III.4.3.2 Obtention du modèle d'état instantané

Le modèle d'état instantané, est donné par la combinaison des équations (III.28) et (III.31)

(III.28) $\times \alpha + (III.31) \times (1 - \alpha)$, ce qui donne l'équation (III.32)

$$\dot{x} = (A_1\alpha + A_2(1 - \alpha))x + (B_1\alpha B_2(1 - \alpha))E \quad (III.32)$$

Après le calcul on obtient le modèle suivant du système (III.33) :

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & -\frac{(1-\alpha)}{3L} \\ \frac{(1-\alpha)}{C} & -\frac{3}{RC} \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} E = Ax + BE \quad (III.33)$$

III.4.3.3 Le model moyen

Comme le convertisseur Boost à un niveau, on pose les grandeurs moyennes suivantes :

$$\begin{cases} \alpha = \alpha_e + \tilde{\alpha} \\ x = x_e + \tilde{x} \end{cases} \quad (III.34)$$

III.4.3.4 Etude de l'état d'équilibre

Le point d'équilibre X_e est obtenu lorsque $\dot{x} = \mathbf{0}$, ce qui donne le résultat suivant :

$$\begin{cases} i_{le} = \frac{9E}{R(1-\alpha)^2} \\ v_{se} = \frac{3E}{(1-\alpha)} \end{cases} = X_e \quad (III.35)$$

III.4.3.5 Linéarisation autour de l'état d'équilibre ($X_e ; \alpha_e$)

Pour obtenir le modèle d'état petit signaux du hacheur, nous allons linéariser le modèle d'état moyen autour de l'état d'équilibre ($X_e ; \alpha_e$). Dans ce cas le système d'état linéaire est exprimé comme suit :

$$\dot{\tilde{x}} = A\tilde{x} + B\tilde{\alpha} \quad (III.36)$$

Tel que :

$$A = A_1\alpha_e + A_2(1 - \alpha_e) \quad (III.37)$$

$$B = (A_1 - A_2)X_e \quad (III.38)$$

Le courant maximale : $I_s = \frac{P_{max}}{V_{sortie}} = 0.6306 \text{ A}$

La résistance : $R_s = \frac{V_s}{I_s} = 152.22 \text{ Ohm}$

➤ **Calcul des composants C, L et α :**

- **Le gain α :** le rapport cyclique est comme suit :

$$\alpha = 1 - \frac{V_{entree}}{V_{sortie}} = \alpha = 0.82$$

- **Le condensateur C :** La capacité est déterminée par l'équation déjà utilisé plus haut :

$$C \geq \frac{\alpha \times P_{max}}{f \times \Delta V_s \times V_{sortie}^2} = \frac{0.82 \times 60.54}{11000 \times 5\% \times 96^2} = 9.7327 \times 10^{-6} \text{ Farad}$$

- **Inductance L :** de la même manière la valeur de l'inductance L est déduite comme suit

$$L \geq \frac{V_{sortie}}{4 \times f \times \Delta i_L} = \frac{96}{4 \times 11000 \times 0.1} = 0.02181 \text{ Henry}$$

III.5.1.1 Simulation du hacheur Boost à deux niveaux

La figure (III.14) représente le schéma bloc de simulation du hacheur Boost à deux niveaux sous Simulink.

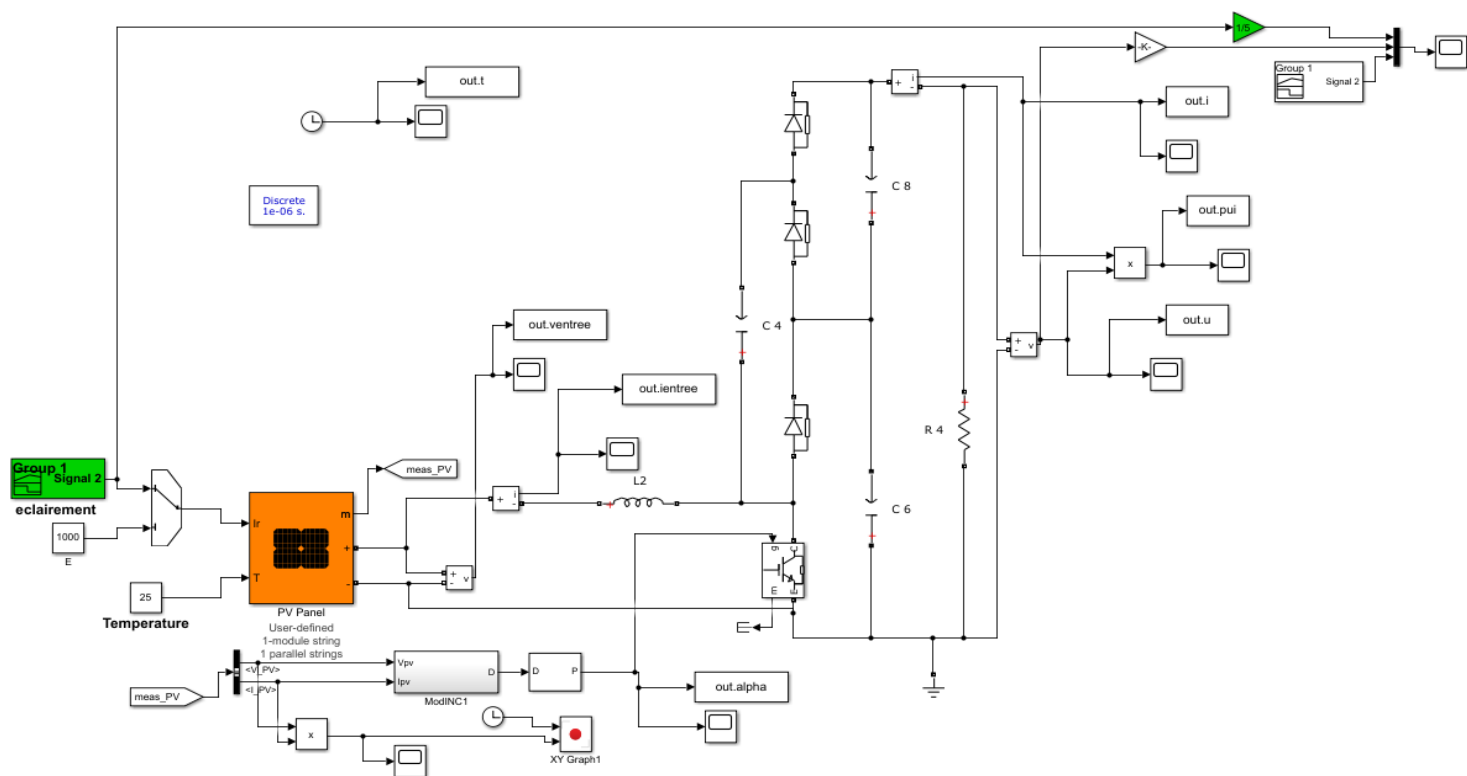


Figure III.14 Schéma de simulation d'un panneau PV avec un hacheur Boost à deux niveaux

➤ **Variation de l'éclairement :**

L'allure de l'éclairement en fonction du temps est décrite suivant la figure (III.15), où on propose trois éclairements successivement différents ($E=500\text{W/m}^2$, $E=800\text{W/m}^2$, $E=10000\text{W/m}^2$), puis un éclairement décroissant à partir de la première seconde jusqu'à la deuxième seconde (de 10000W/m^2 à 400W/m^2).

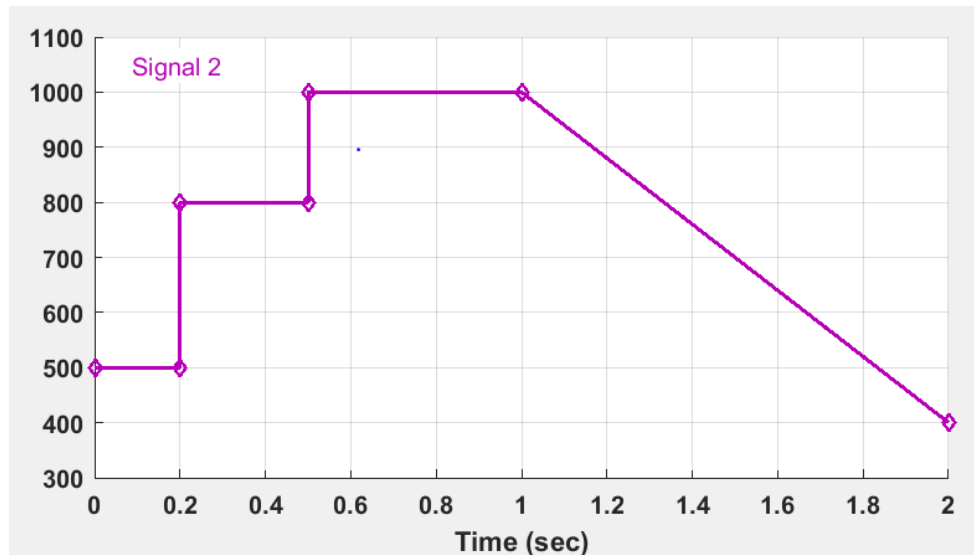


Figure III.15 Signal de l'éclairement appliqué.

L'allure du signal de référence est illustrée sur la figure (III.16), appliqué à la sortie du Boost à deux niveaux, qui doit être doublé à celui du hacheur à un seul niveau.

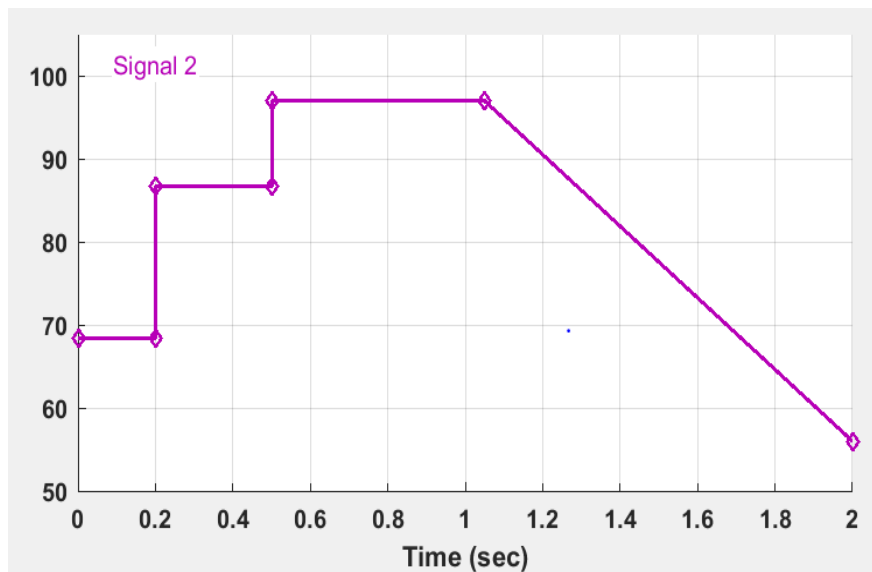


Figure III.16 Tension de référence à la sortie du Boost à deux niveaux

La mise en œuvre du bloc de simulation du Boost à deux niveaux, lorsque la charge est une résistance, pour un l'éclairage variable et une température fixée à $T=25^{\circ}\text{C}$, a donné les résultats suivants décrits ci-dessous :

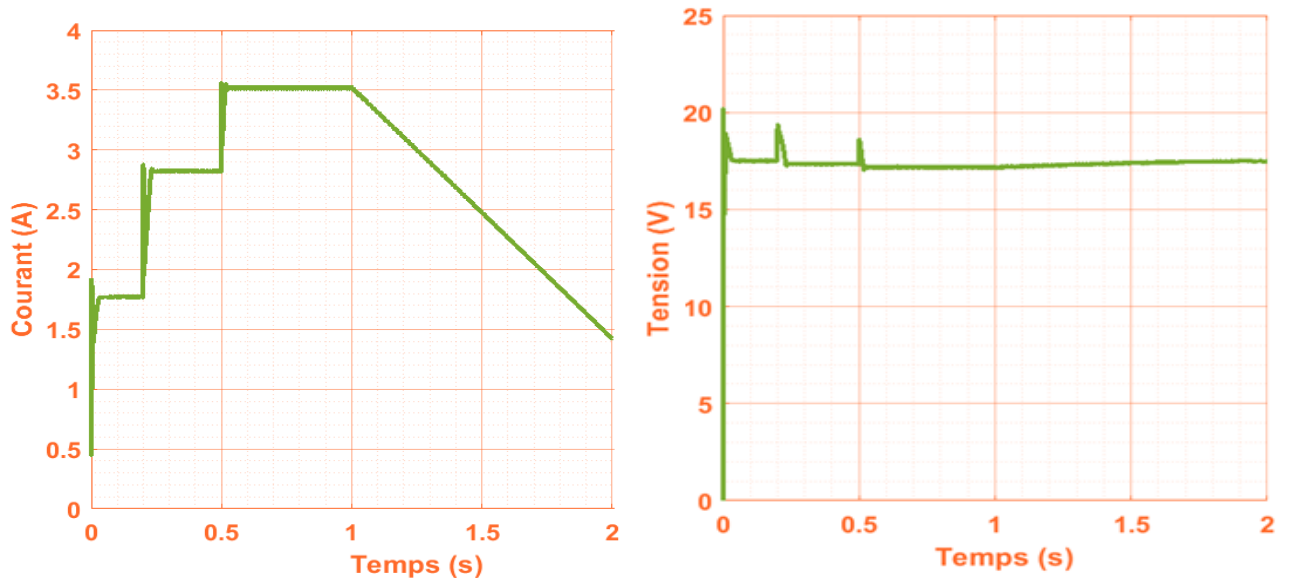


Figure III.17 Courant et tension d'entrée en fonction du temps

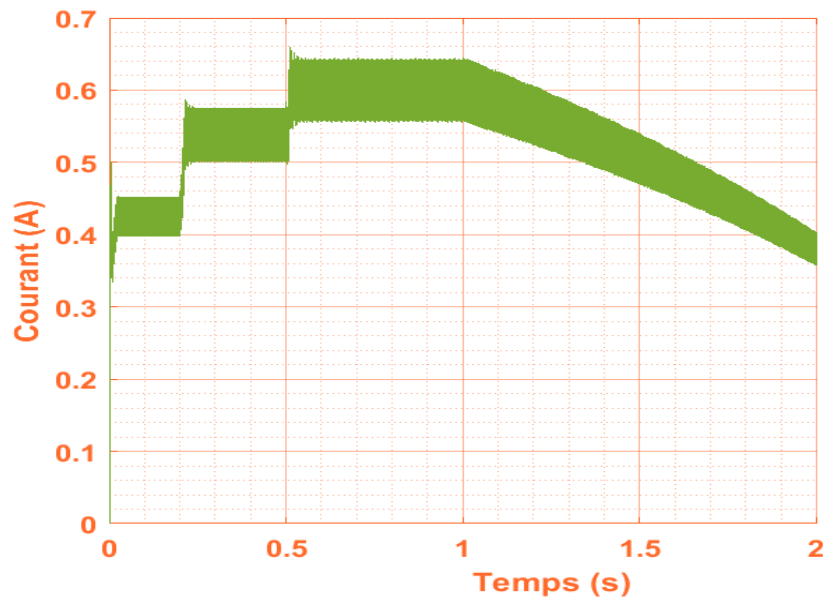


Figure III.18 Courant de sortie avec un Boost à deux niveaux

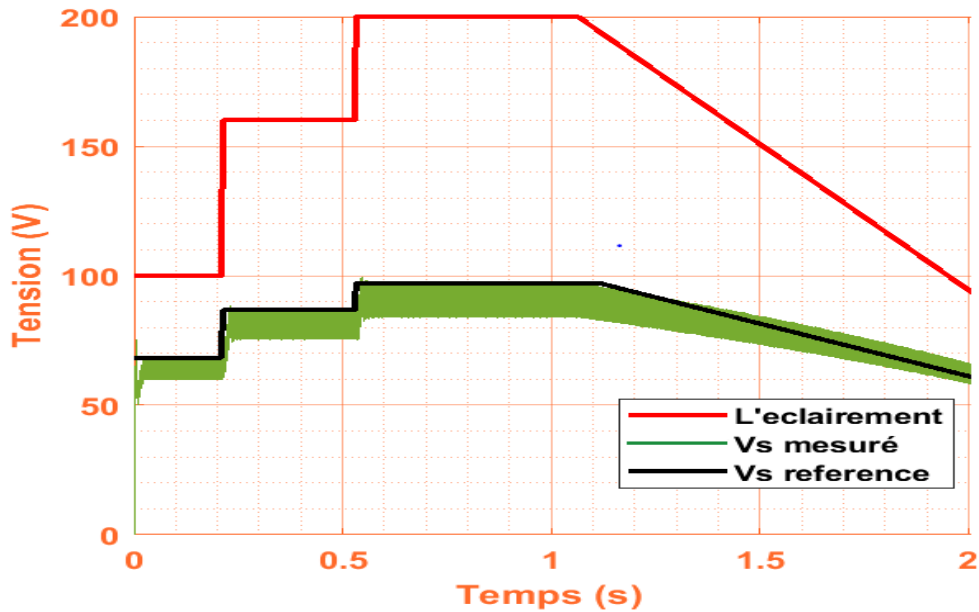


Figure III.19 Tension de sortie avec un Boost à deux niveaux

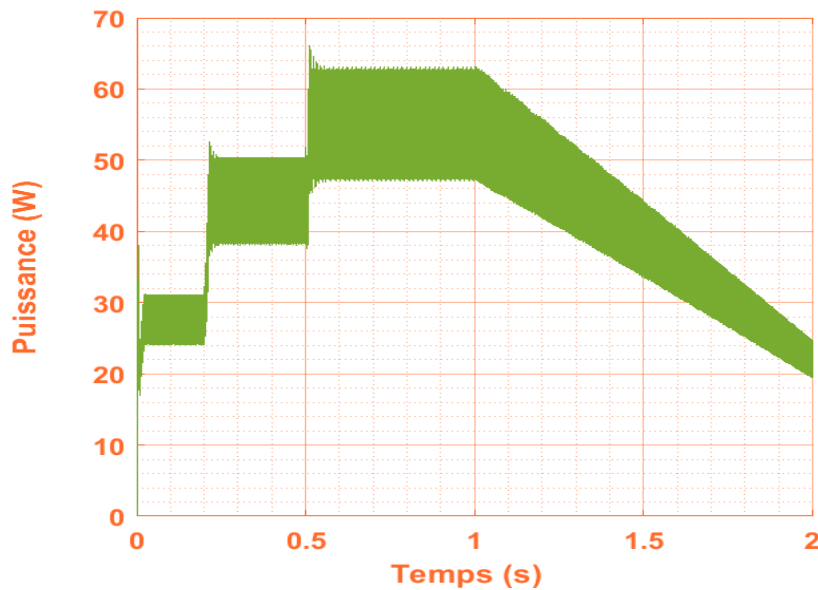


Figure III.20 Puissance d'un Boost à deux niveaux

La figure (III.20) exprime les changements de puissance en fonction du temps où on confirme la valeur maximale de puissance de ce panneau, qui atteint la valeur de 60.54W pour un éclairement de $E=1000\text{W/m}^2$.

- **Interprétations des résultats obtenus :**

Les figures qui représentent la tension et le courant de sortie en fonction de temps à base de la technique MPPT incrémentale confirment le rôle du convertisseur Boost à deux niveaux, qui sert à augmenter la valeur de tension d'entrée de 17.04V à 96V à la sortie en

donnant un rapport cyclique de $\alpha_{\max} = 0.082$, ce qui confirme l'efficacité du dimensionnement effectuée sur les éléments passifs L et C.

On constate que le suivi de la puissance et de la tension de sortie par la méthode incrémentale reste très performant. La tension mesurée à la sortie du boost suit correctement sa référence pour chaque nouvelle valeur de l'éclairement (voir figure (III.19))

En déduit suivant la tension mesurée à la sortie du boost ($V_s=96$ V), que celle-ci représente le double de la tension obtenue par un boost à un niveau ($V_s=48$ V), Donc le rôle du convertisseur Boost à deux niveaux permet d'augmenter la valeur de la tension de sortie à N fois la valeur de la tension de sortie à un seul niveau. Ce qui permet d'écrire la relation suivante :

$V_{sN} = N * V_{s1niv}$, avec N est le niveau de tension du boost désiré, dans notre cas :

$V_{s1niv} = 48$ V, cela veut dire pour un boost à 2niv, donne :

$V_{s2} = 2 * V_{s1niv} = 2 * 48 = 96$ V, ce résultat confirme les allures des tensions obtenus ci-dessus.

III.5.2 Calcul des valeurs des composants L et C du Boost à trois niveaux :

Pour un Boost à trois niveaux on calcule les éléments passifs de manière, on obtient une tension de sortie trois fois la valeur de la tension de sortie d'un Boost à un seul niveau.

Les propriétés électriques qui adaptent notre Boost à trois niveaux sont les suivants :

- Fréquence de hachage fixé à 10KHz
- Avec une ondulation de tension : $V_S \leq 5\% V_S$
- Avec une ondulation du courant : $I_L \leq 0.1$ A

Tension d'entrée : $V_{\text{entrée}} = 17.04$ V

La puissance maximale du panneau PV : $P_{\max} = 60.54$ W

Tension de sortie choisie $V_{\text{sortie}} = 144$ V

Le courant maximale : $I_s = \frac{P_{\max}}{V_{\text{sortie}}} = 0.42$ A

La résistance : $R_s = \frac{V_s}{I_s} = 342.51$ Ohm

- **Calcul des composants C, L et α :**

- **Le gain α :**

$$\alpha = 1 - \frac{V_{\text{entrée}}}{V_{\text{sortie}}} = \alpha = 0.88$$

▪ **Le condensateur C :**

$$C \geq \frac{\alpha \times P_{max}}{f \times \Delta V_s \times V_{sortie}^2} = \frac{0.885 \times 60.54}{10000 \times 5\% \times 144^2} = 5.1384 \times 10^{-6} \text{ Farad}$$

▪ **L'inductance L :**

$$L \geq \frac{V_{sortie}}{4 \times f \times \Delta i_L} = \frac{144}{4 \times 10000 \times 0.1} = 0.036 \text{ Henry}$$

III.5.2.1 Simulation du Boost à trois niveaux

La figure (III.17) représente le schéma bloc de simulation du hacheur Boost à trois niveaux sous Matlab/Simulink.

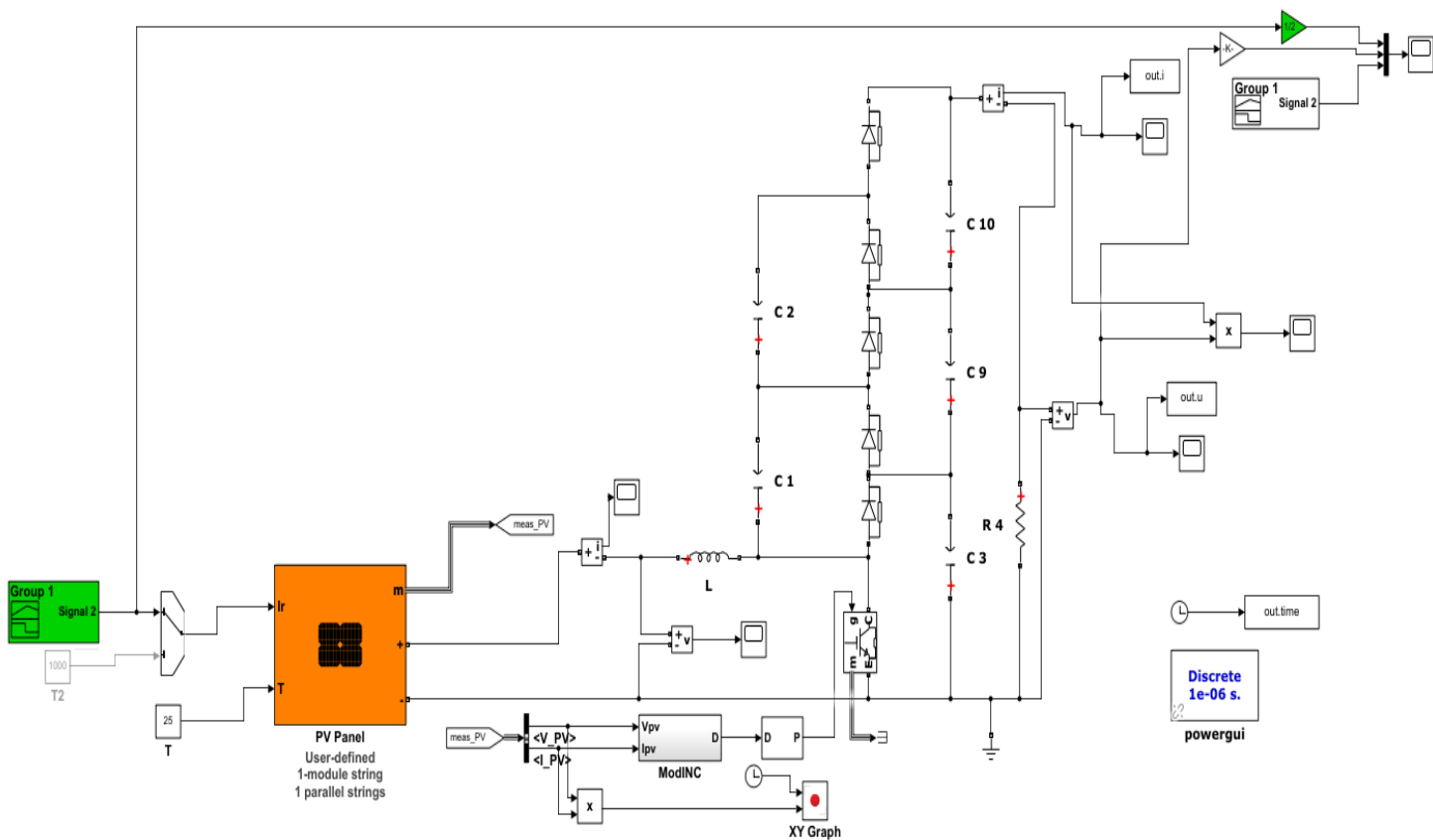


Figure III.21 Schéma de simulation d'un panneau PV avec un hacheur Boost à trois niveaux

➤ **Variation de l'éclairement :**

L'allure de l'éclairement en fonction du temps est décrite suivant la figure (III.22), où on propose trois éclairements successivement différents ($E=500\text{W/m}^2$, $E=800\text{W/m}^2$, $E=10000\text{W/m}^2$), puis un éclairement décroissant à partir de la première seconde jusqu'à la deuxième seconde (de 10000W/m^2 à 400W/m^2).

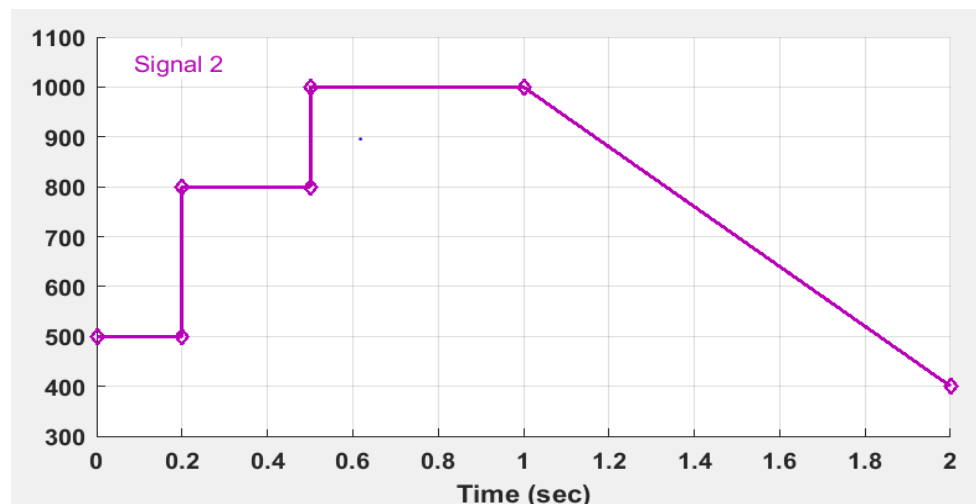


Figure III.22 Signal de l'éclairage appliqué.

L'allure du signal de référence est illustrée sur la figure (III.23), appliqué à la sortie du Boost à trois niveaux, qui doit être triplé à celui du hacheur à un seul niveau.

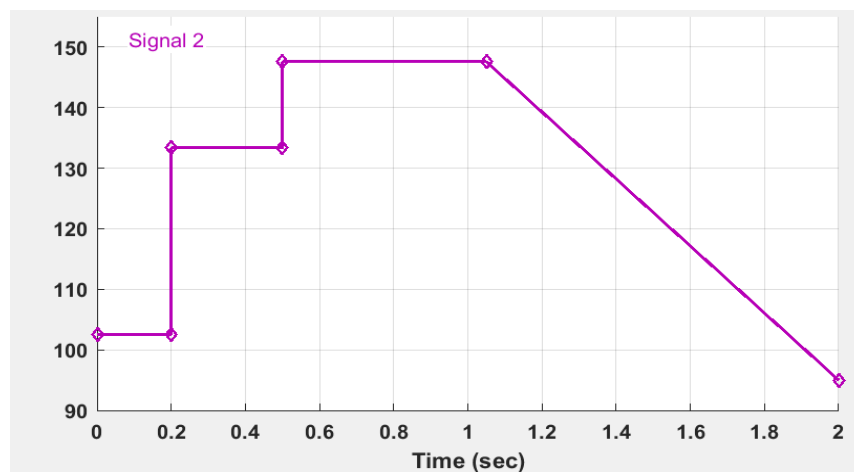


Figure III.23 Tension de référence à la sortie du Boost à trois niveaux

La mise en œuvre du bloc de simulation du Boost à trois niveaux, lorsque la charge est une résistance, pour un l'éclairage variable et une température fixée à $T=25^{\circ}\text{C}$, a donné les résultats suivants décrits ci-dessous :

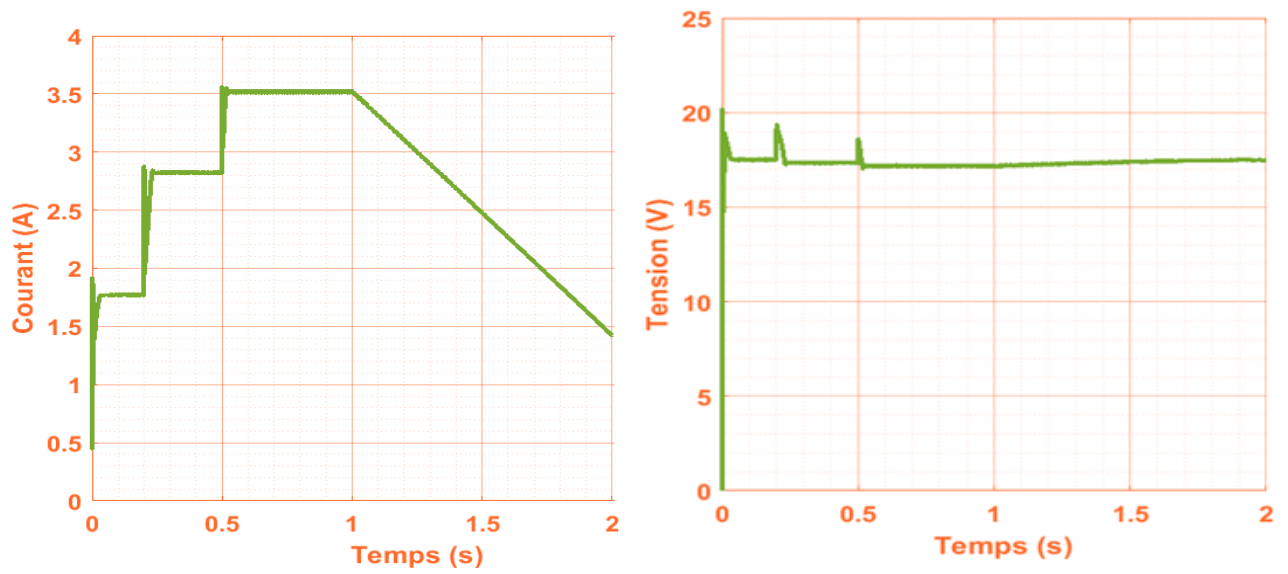


Figure III.24 Courant et tension d'entrée en fonction du temps

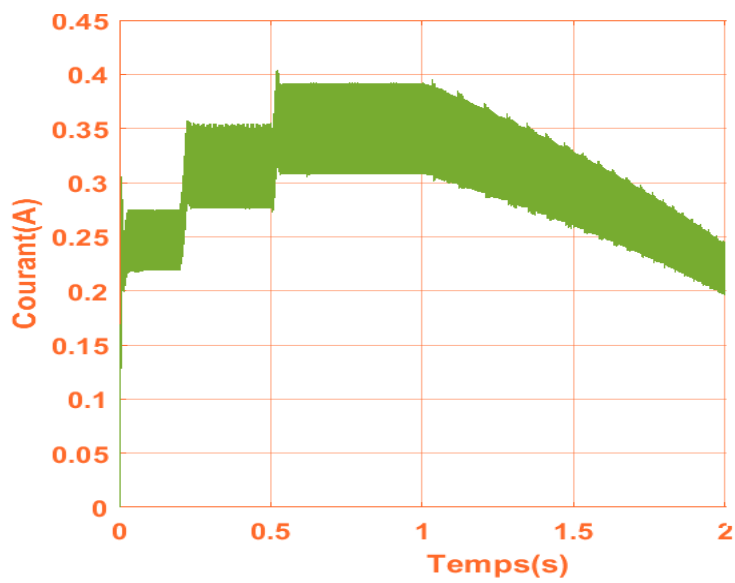


Figure III.25 Courant de sortie avec un Boost à 3niveaux

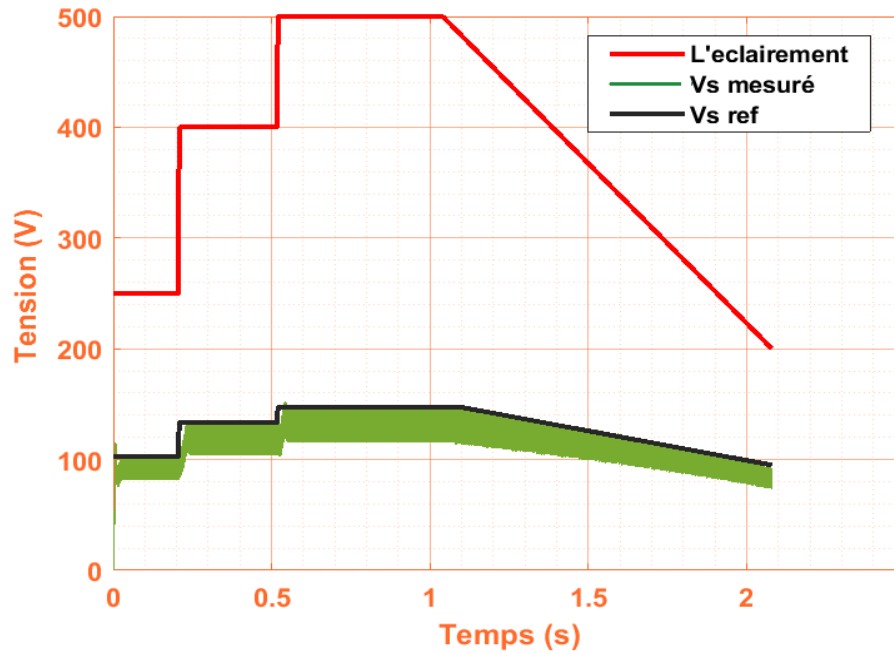


Figure III.26 Tension de sortie avec un Boost à 3 niveaux

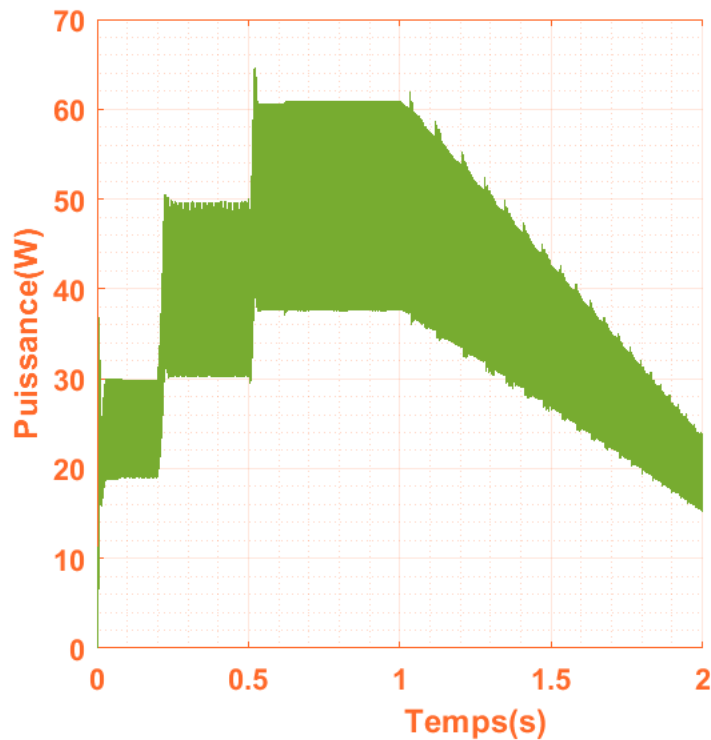


Figure III.27 Puissance du Boost à 3 niveaux

La figure (III.27) exprime les changements de puissance en fonction du temps où on confirme la valeur maximale de puissance de ce panneau, qui atteint la valeur de 60.54W pour un éclairement de $E=1000\text{W/m}^2$.

• **Interprétations des résultats obtenus :**

Les figures qui représentent la tension et le courant de sortie en fonction de temps à base de la technique MPPT incrémentale confirment le rôle du convertisseur Boost à trois niveaux, qui sert à augmenter la valeur de tension d'entrée de 17.04V à 144V à la sortie, en donnant un rapport cyclique de $\alpha_{max} = 0.88$, ce qui confirme l'efficacité du dimensionnement effectuée sur les éléments passifs L et C.

On constate que le suivi de la puissance et de la tension de sortie par la méthode incrémentale reste très performant. La tension mesurée à la sortie du boost suit correctement sa référence pour chaque nouvelle valeur de l'éclairage (voir figure (III.26))

En déduit suivant la tension mesurée à la sortie du boost ($V_s=144\text{ V}$), que celle-ci représente le triple de la tension obtenue par un boost à un niveau ($V_s=48\text{ V}$), Donc le rôle du convertisseur Boost à trois niveaux permet d'augmenter la valeur de la tension de sortie à N fois la valeur de la tension de sortie à un seul niveau. Ce qui permet d'écrire la relation suivante :

$V_{sN}=N * V_{s1niv}$, avec N est le niveau de tension du boost désiré, dans notre cas :

$V_{s1niv}=48\text{V}$, cela veut dire pour un boost à 3niv, donne :

$V_{s2}=3 * V_{s1niv}=3*48= 144\text{ V}$, ce résultat confirme les allures des tensions obtenus ci-dessus.

III.6 Tableaux récapitulatif de l'étude d'un hacheur Boost multi-niveaux

Le tableau (III.3) présente un récapitulatif du travail effectué plus haut.

	<i>Boost à un seul niveau</i>	<i>Boost à deux niveaux</i>	<i>Boost à trois niveaux</i>
<i>Vsortie</i>	48 V	96 V	144 V
<i>Isortie</i>	1.26 A	0.63 A	0.42 A
<i>La capacité</i>	$3.0809 \times 10^{-5}\text{ F}$	$9.7327 \times 10^{-6}\text{ F}$	$5.1384 \times 10^{-6}\text{ F}$
<i>L'inductance</i>	0.0109 H	0.02181 H	0.036 H
<i>Le gain</i>	0.64	0.82	0.88

Tableaux III.3 Récapitulatif sur l'étude du Boost multi-niveaux

Ce qu'il faut signaler à la fin, les points forts suivants :

- ❖ La tension du Boost : Celui-ci est d'origine élévateur de tension à un niveau, la notion du multi-niveaux offre la possibilité d'élever plus encore la tension à la sortie à N fois de celui à un niveau, suivant le nombre de condensateur ou des interrupteurs utilisés dans la structure de base choisie.

- ❖ Plus les niveaux du Boost augmente, plus la tension à la sortie de celui-ci prend une valeur importante.

- ❖ Plus les niveaux du Boost augmente, plus le courant à la sortie de celui-ci diminué
- ❖ Le rapport cyclique croît en valeur avec l'augmentation des niveaux de tension.

- ❖ La valeur de l'inductance prend de l'ampleur, à chaque fois que le niveau de tension augmente.

III.7 Conclusion

Dans ce chapitre on a présenté la modélisation et la simulation du convertisseur Boost à deux et trois niveaux. Ce qui a permis d'instaurer des modèles mathématiques sous Simulink associé à chaque niveau. Les résultats obtenus lors des différentes simulations signalent les points essentiels, ci-dessous :

- Le Boost multi-niveaux offre la possibilité d'élever la tension de sortie au détriment des ondulations qui reste importante pour les niveaux $N+1$.
- Le rapport cyclique agit seulement sur la valeur de la tension, quel que soit le niveau du Boost.
- La tension de sortie du Boost multi-niveaux est proportionnelle au nombre de condensateur /interrupteurs implanter dans la structure de base du Boost (proportionnelle au niveau N souhaité).

Chapitre 04

Commande d'un moteur MCC par un hacheur Boost à deux niveaux

IV.1 Introduction

Dans ce chapitre on va détailler et simuler le fonctionnement du système de commande d'un moteur à courant continu à excitation indépendante (séparée), par une source photovoltaïque, contrôlé en vitesse par le réglage de la tension d'alimentation de l'induit via un convertisseur DC-DC (hacheur Boost à deux niveau), commandé a MPPT.

Ce chapitre consiste à mettre en œuvre un hacheur Boost à deux niveaux en vue de commander un moteur à courant continu à excitation indépendante (séparée), contrôlé en vitesse par le réglage de la tension d'alimentation de l'induit via le boost à deux niveaux. Celui-ci est alimenté par une source photovoltaïque(PV) contrôlé par la technique MPPT incrémentale. Les résultats de simulations seront exposés et discutés

IV.2 Commande d'un moteur MCC par un hacheur Boost à deux niveaux

IV.2.1 Relation de la vitesse du moteur en fonction de la tension de l'induit

La relation qui existe entre la vitesse de rotation d'un moteur à courant continu et la force électromotrice E , est donnée par l'équation (IV.1) :

$$\text{On a la relation de la f.é.m. :} \quad E = K \cdot \Phi \cdot \Omega \quad (\text{IV.1})$$

Sachant que :

Ω est la vitesse de rotation du moteur en [rad/secondes]

Φ est le flux magnétique produit par le circuit d'excitation en [Wb]

K Coefficient constant, dépend des paramètres de la machine

Cela donne :

$$\Omega = \frac{E}{K \cdot \Phi} \quad (\text{IV.2})$$

Généralement, on peut supposer que $R_a I_a \ll U_a$, ce qui nous permet d'écrire l'équation (IV.3)

$$\Omega = \frac{U_a}{K \Phi} \quad (\text{IV.3})$$

Le moteur est à excitation séparée, le courant d'excitation (I_{ex}) est fixé à une valeur constante, cela veut dire que le flux est constant pendant le processus de commande du moteur, car le flux est lié au courant d'excitation par la relation (IV.4).

$$\Phi = K' I_{ex} = \text{Constante} \quad (\text{IV.4})$$

Dans ces conditions la vitesse de rotation du moteur ne dépend que de la tension d'alimentation de l'induit U_a , confirmé par la relation (IV.5). Pour $K'' = \frac{1}{K\Phi}$ on peut écrire :

$$\Omega = K'' U_a \quad (\text{IV.5})$$

De ce fait, la variation de la vitesse de rotation du moteur est réalisée par la variation de la tension d'alimentation U_a . La relation entre les deux grandeurs est linéaire, lorsque on réduit la tension U_a , la vitesse Ω diminue, le contraire est juste.

Cependant, ce procédé de commande nécessite l'emploi d'un variateur de vitesse. Ceci est assuré par l'emploi d'un convertisseur statique à semi-conducteurs à savoir : Le hacheur, voir ce qui suit.

IV.2.2 Réglage de la vitesse du moteur par la tension de sortie du Boost à deux niveaux

Le hacheur qui fait l'objet de notre étude est un hacheur Boost à deux niveaux, permet de produire une tension continue réglable disponible aux bornes de la machine, est fonction du rapport cyclique α . On règle la valeur moyenne de la tension de sortie U_s aux bornes de l'induit du moteur en modifiant le rapport cyclique :

- Soit en modifiant la durée de conduction de l'IGBT sans modifier la période T de commande (Modulation de Largeur d'Impulsion, MLI).
- Soit en modifiant la fréquence de commande ($f = 1/T$) sans modifier la durée de conduction de l'interrupteur (IGBT).

La première solution est de loin la plus utilisée en pratique car elle permet un filtrage aisé de la tension U_s par un filtre passe-bas, comme le décrit la figure (IV.1). Ce filtre passe-bas permet d'éliminer les harmoniques élevés et les ondulations de U_s .

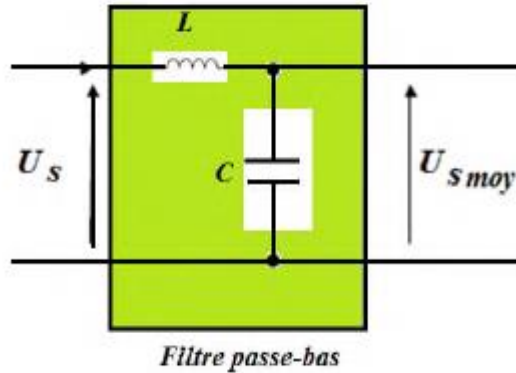


Figure IV.1 Filtre passe-bas en sortie permettant d'obtenir une tension quasi constante.

Cependant la tension de sortie subit des perturbations à savoir l'instabilité de la valeur moyenne et le taux d'ondulation important, lorsque le hacheur fonctionne en boucle ouverte. Ce qui nécessite de mettre celui-ci, dans une boucle fermée dans l'intention de réguler la tension de sortie et la maintenir à une valeur constante. La méthode de garder la tension fixe en régime établi, fera l'objet du paragraphe Suivant.

IV.2.3 Régulation de la tension de sortie

La méthode utilisée pour réguler la tension de sortie U_s afin d'obtenir une tension moyenne fixe, consiste à ajuster en permanence (en temps réel) le rapport cyclique de commande de l'interrupteur (IGBT) $\alpha = \frac{t_{ON}}{T}$ sans modifier la période T .

Cette méthode qui consiste à faire varier la largeur des impulsions de commande de l'interrupteur est appelée méthode de Modulation de Largeur d'Impulsion (MLI) ou encore PWM « Pulse Width Modulation ». Le signal de contrôle de l'interrupteur V_g devra être élaboré par comparaison entre la tension effectivement disponible U_s mes (mesurée ou actuel) et la tension moyenne désirée $U_{s\text{ réf}}$ (Référence ou consigne). Le schéma général de la figure (IV.2) sera employé pour la régulation de la tension en amont du moteur MCC.

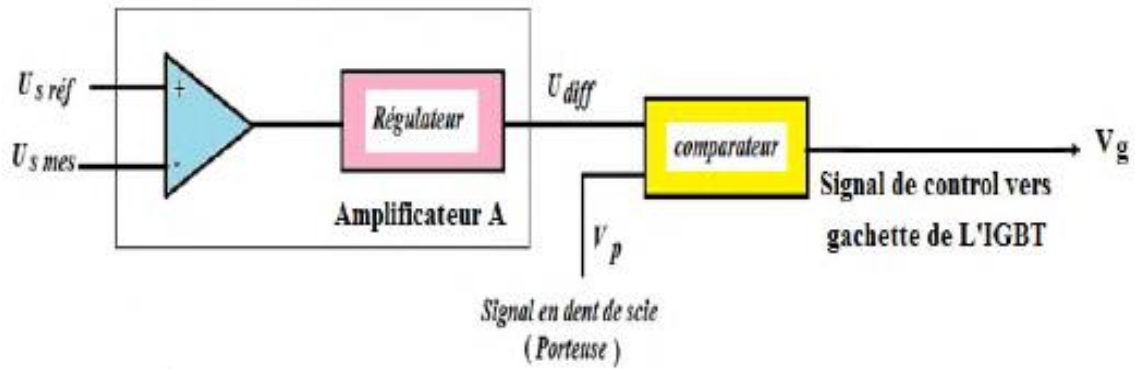


Figure. IV.2 Boucle de régulation du boost à deux niveaux

IV.3 Commande du moteur MCC par un hacheur Boost à deux niveaux

IV.3.1 Structure générale

La figure (IV.3), illustre le schéma global de notre système mis en exergue, où on trouve les différents intervenants du système, à l'égard : générateur photovoltaïque, le moteur à courant continu à excitation séparée, le hacheur Boost à deux niveaux et le bloc de commande.

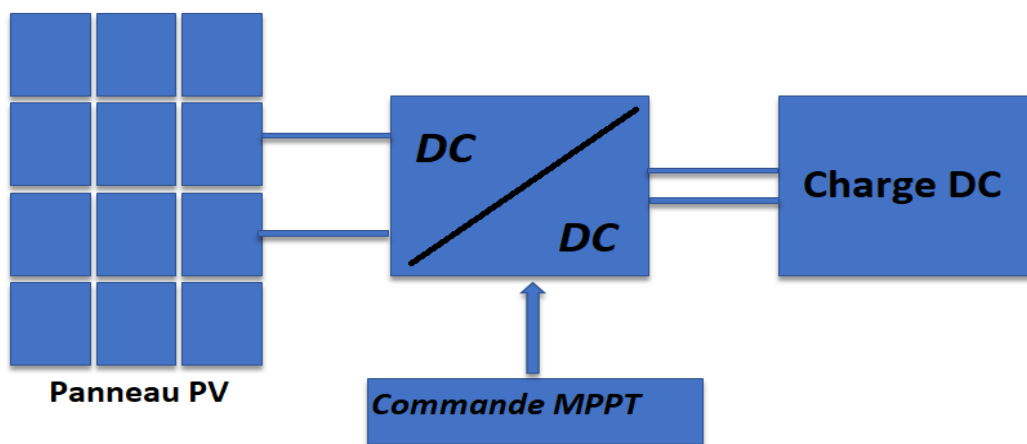


Figure IV.3 structure générale de chaîne PV

IV.3.2 Simulations

Après avoir simulé le schéma block de la structure général du chaîne photovoltaïque (GPV + MPPT + Hacheur + Régulateur PI +MCC), on obtient les résultats, qui sont les caractéristiques $I(V)$ et $P(V)$ dans des conditions climatiques ($T=25^{\circ}\text{C}$ et pour un éclairement $E=500\text{W}/\text{m}^2$ puis $E=10000\text{W}/\text{m}^2$) :

La figure ci-dessous (IV.4) illustre le bloc schématique de simulation du système PV :

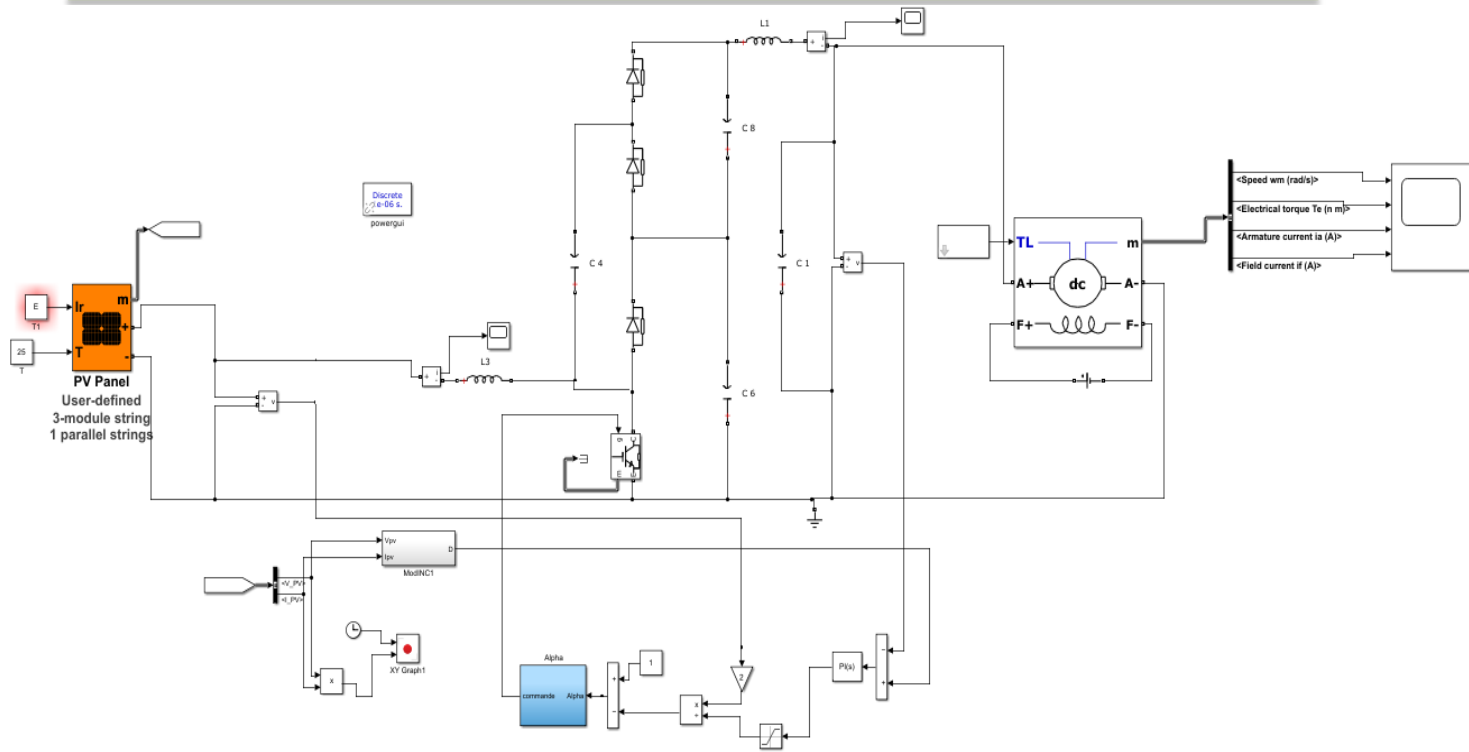


Figure. IV.4 Simulation global de la chaîne PV (GPV + MPPT + Hacheur + Régulateur PI +MCC

- Régulateur PI

La figure IV.5 représente le schéma bloc de régulateur PI

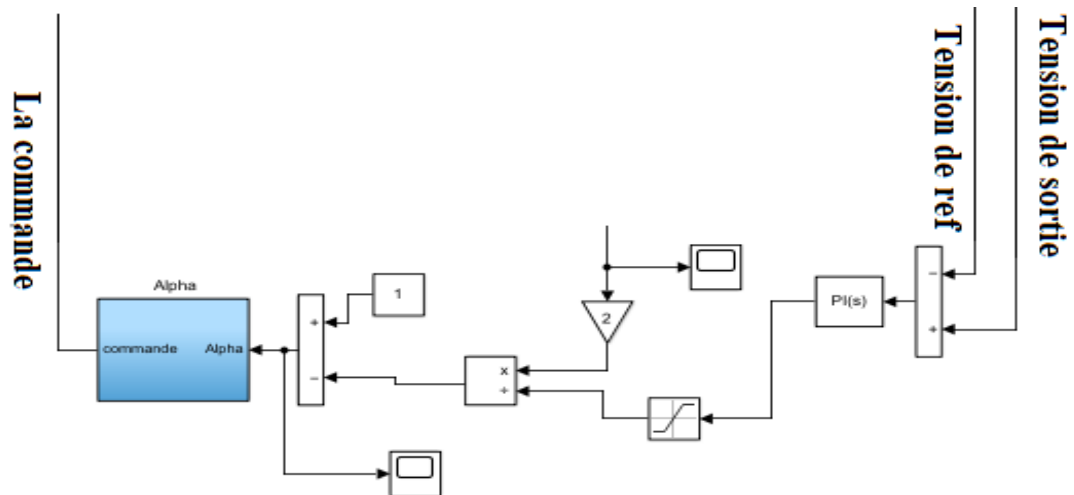


Figure IV.5 Boucle de régulation de la tension de sortie du Boost à deux niveaux

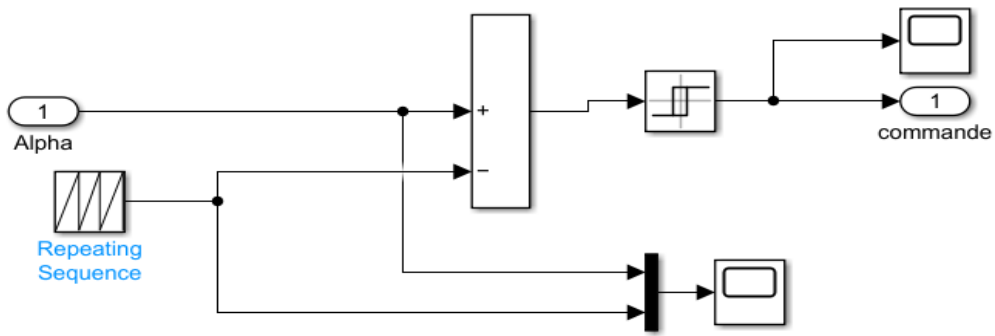


Figure IV.6 Schéma block de la commande (PWM) alpha

Les paramètres des composants qui constituent le système de commande et de puissance figurent dans le tableau, ci-dessous. Le tableau (IV.1) indique les paramètres des éléments utilisés, lorsque la charge est moteur MCC.

Circuit	Composant	Paramètres
Circuit de puissance	Moteur à courant continu à excitation séparé	Model: 5HP 240 V, 1750 tr/min, $U_f=150V$ $R_a=0.78\Omega$, $L_a=0.016\text{Henry}$ $R_f=150\Omega$, $L_f=112.5\text{ Henry}$ Moment d'inertie $J=0.05\text{ kg.m}^2$ Coefficient de frottement viscos $B_m=0.01\text{N.m. s}$
	Filtre passe -bas	$L=3\text{H}$ $C=0.3\mu\text{F}$
	Générateurs photovoltaïque	Puissance =60.53W Cellule par module =26 Nombre des modules= 3 en séries $I_{sc}=3.8$, $V_{oc}=21.1$
Circuit de commande	Générateur du rapport cyclique α réf	$\alpha = 0.82$
	Régulateur PI	Proportionnel : $k_p=10000$ Intégral : $k_i=500$
	Tensions de sortie désirées MCC (Références)	$U_s=140V, 230V$

Tableau. IV.1 Paramètres des éléments utilisés lorsque la charge est MCC

IV.3.3 Simulation et interprétations :

Les figures ci-dessous représentent la simulation d'une chaîne photovoltaïque (GPV, Boost à deux niveaux et une charge DC) dans des conditions standard :

❖ Pour $G=500\text{W/m}^2$ et $T=25^\circ\text{C}$:

L'éclairement et la température resteront constants pendant la durée de simulation

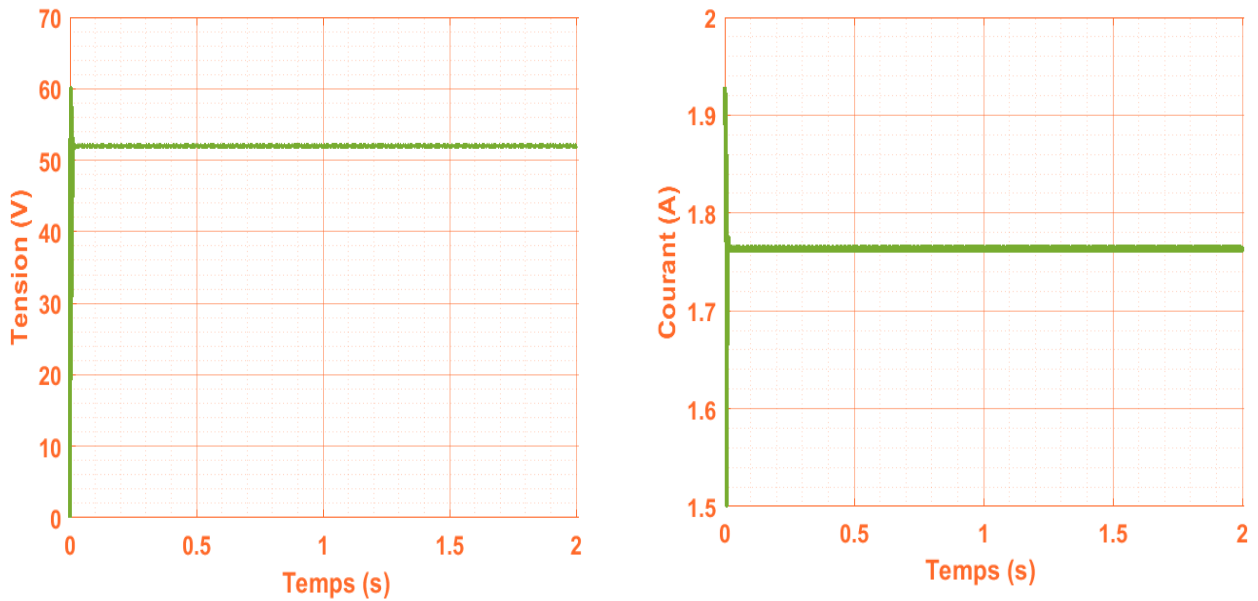


Figure IV.7 Tension et courant d'entrée

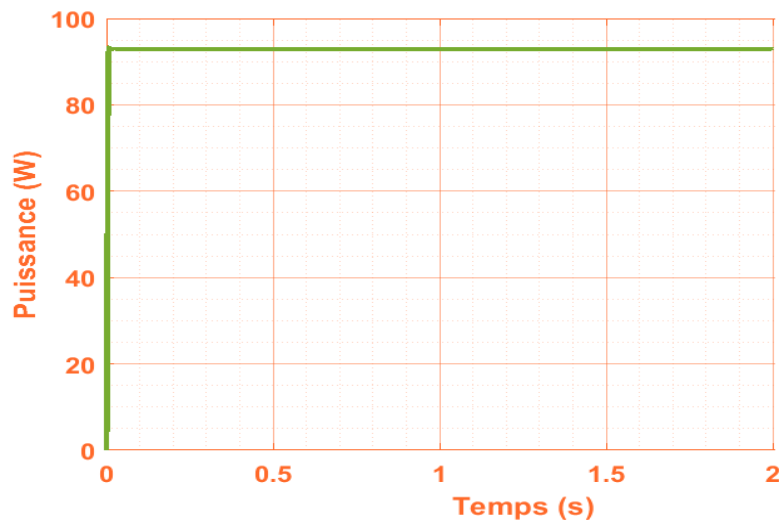


Figure IV.8 Puissance d'entrée d'un Boost à deux niveaux

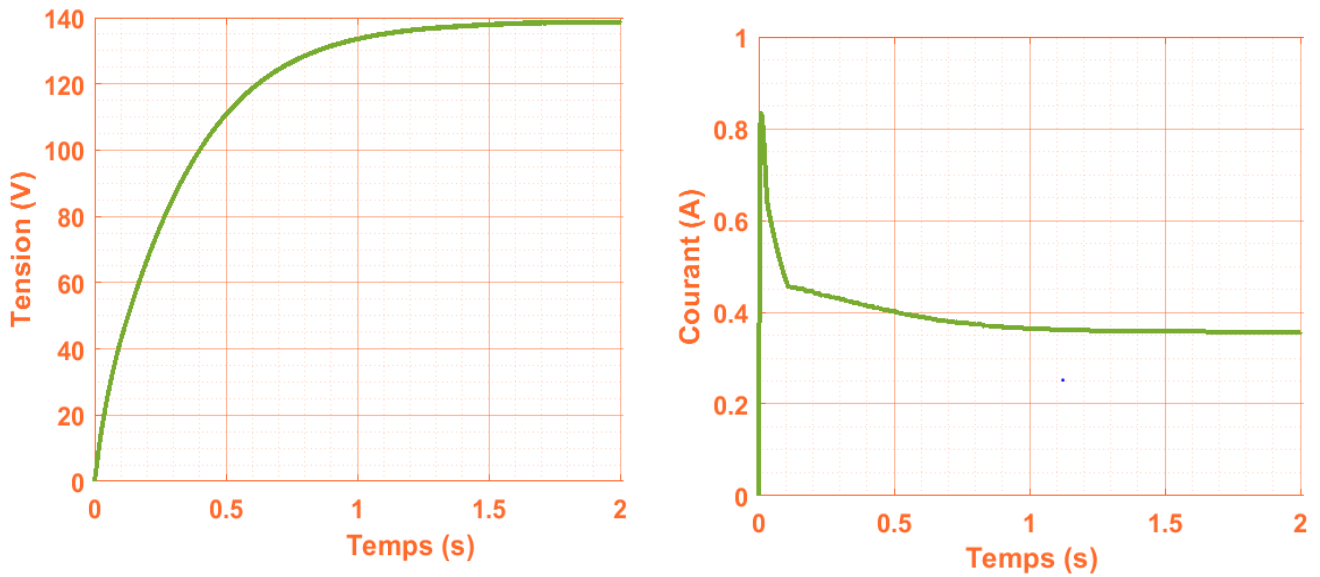


Figure IV.9 Tension et courant de sortie d'un hacheur boost deux niveau .

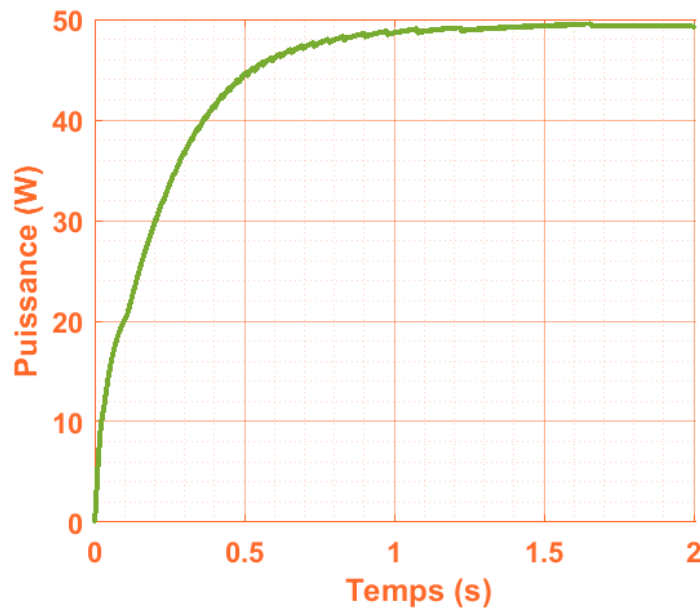


Figure IV.10 Puissance de sortie de générateur photovoltaïque

L'amplificateur différentiel de la figure (IV.2) va servir à amplifier l'écart entre la tension moyenne de référence $U_{s\text{ réf}}$ et la tension moyenne effectivement mesurée $U_{s\text{ mes}}$.

Cette tension d'écart U_{diff} sera ensuite comparée à une tension en dent de scie de période T afin de générer la tension de commande de l'interrupteur V_g , comme le montre la figure (IV.6).

On constate suivant les figures (IV.11 et IV.9), que les allures de la vitesse de rotation et de la tension d'alimentation du moteur délivré par le Boost à deux niveaux, sont identiques, confirmant ainsi le principe de fonctionnement du moteur.

Le couple du moteur est très faible, car le moteur fonctionne à vide sans couple de charge (Fig.IV.13)

Idem pour le courant de l'induit (voir Fig.IV.9).

Allure du couple et celle du courant de l'induit sont semblable, car ils sont liés électriquement par la relation (IV.6).

$$T = K\Phi I_a \quad (IV.6)$$

Avec $\Phi = \text{Constante}$, ce dernier est confirmé par la figure (VI.12) au régime statique.

Lors du régime permanent la tension de sortie se stabilise à la valeur de 140 V et la puissance à la valeur de 50 W et la vitesse se stabilise aussi dans les environs de 70 rad/sec pour un éclairement de 500W/m^2 et une température de $T=25^\circ\text{C}$.

Le rapport cyclique est bien illustré en temps réel sur la figure(IV.14)

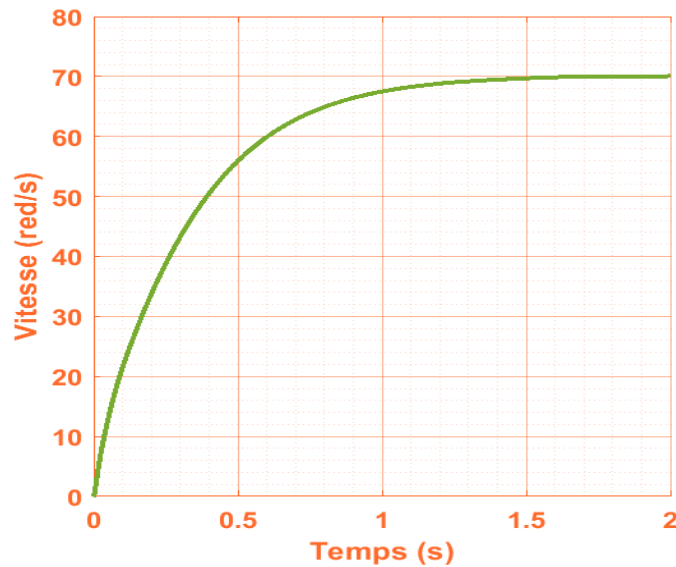


Figure IV.11 Vitesse de rotation du moteur

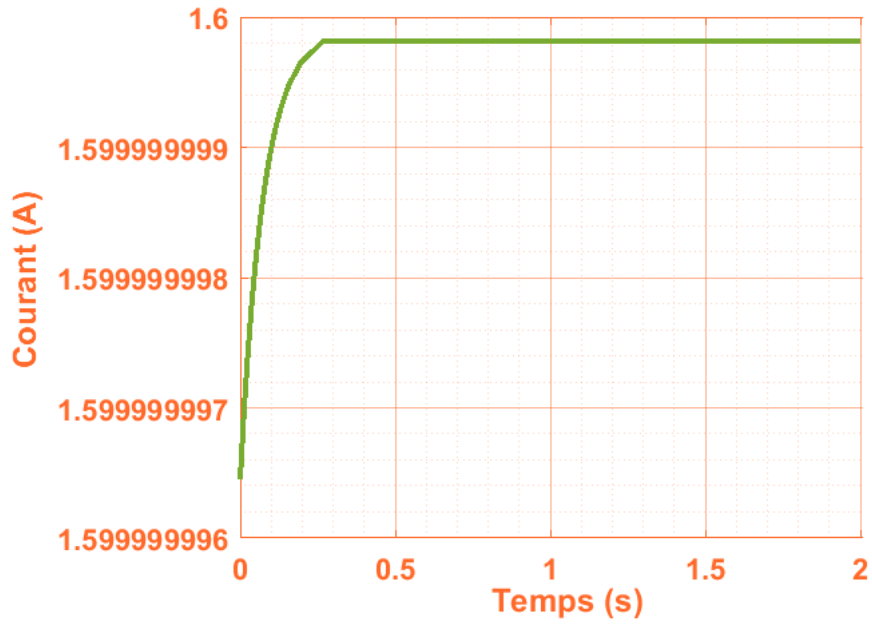


Figure IV.12 du courant absorbé par l'induit du moteur

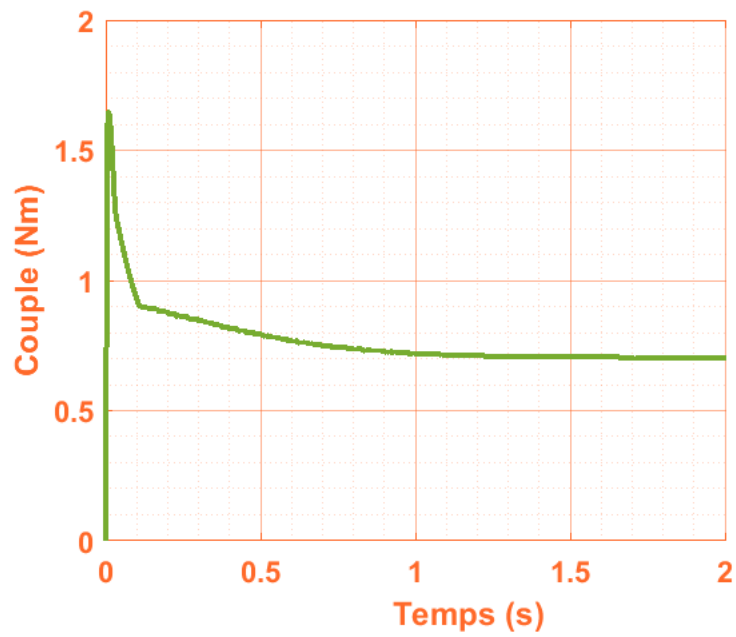


Figure IV.13 Couple de charge et moteur

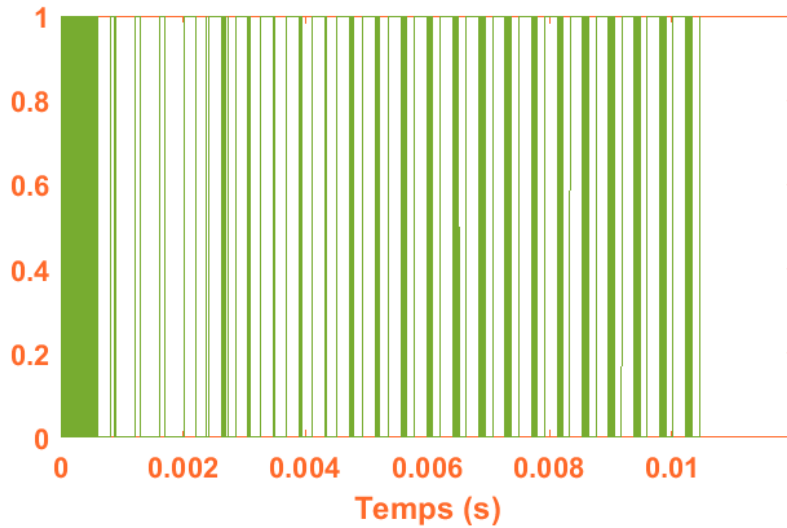


Figure IV.14. Le rapport cyclique Alpha lors de la simulation

❖ Pour $G=1000\text{W/m}^2$ et $T=25^\circ\text{C}$:

L'éclairement et la température resteront constants pendant la durée de simulation

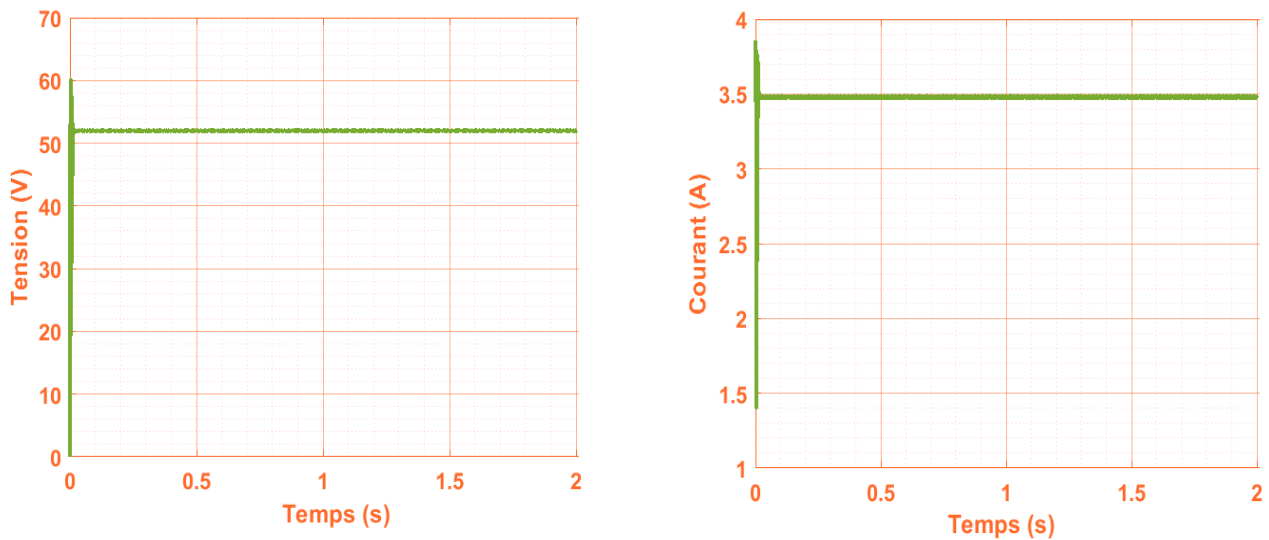


Figure IV.15 Tension et courant d'entrée d'un hacheur Boost deux niveau

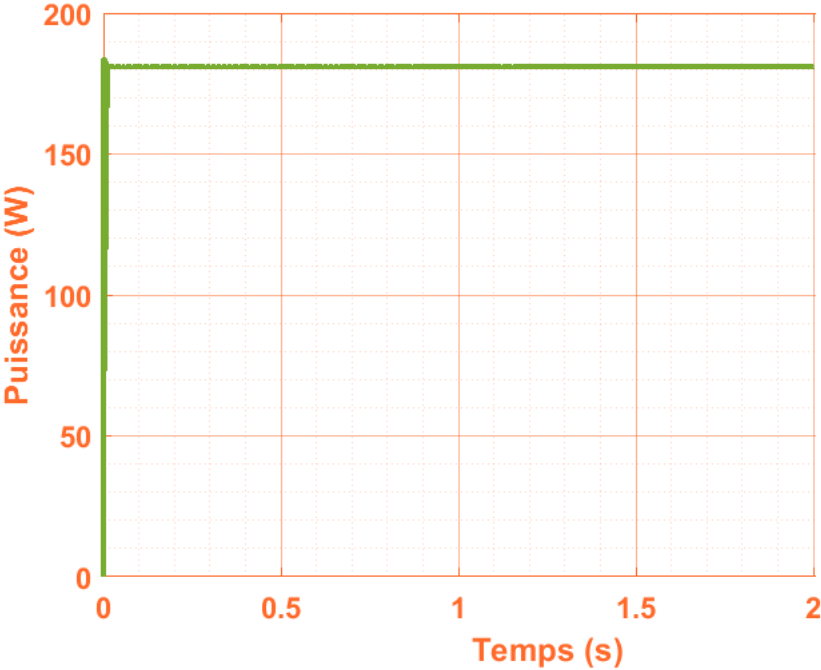


Figure IV.16 Puissance d'entrée du Boost deux niveau

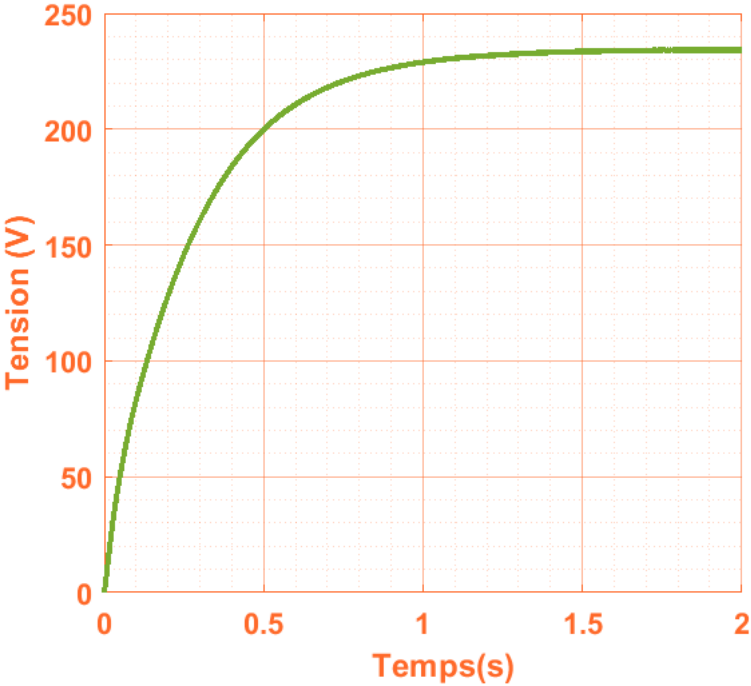


Figure IV.17 Tension de sortie du Boost deux niveau

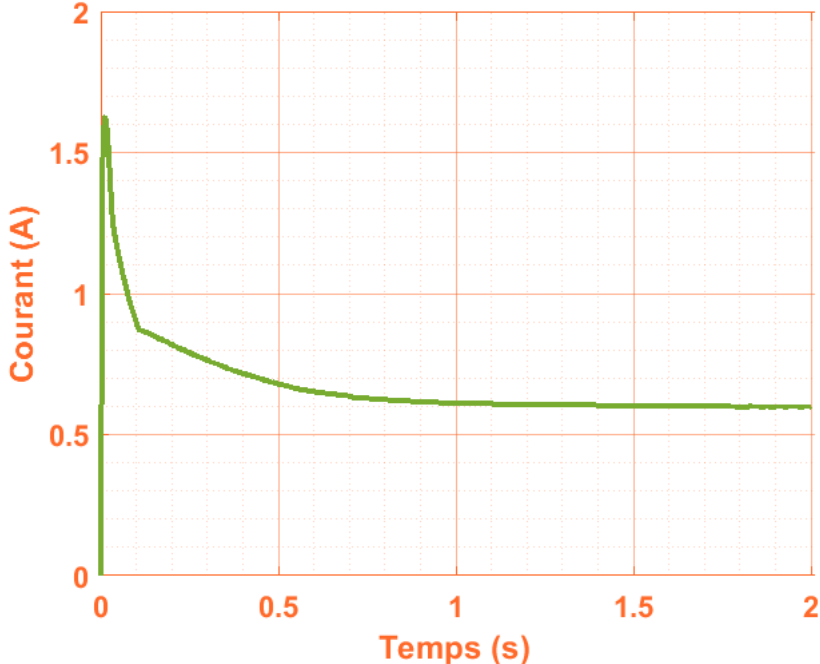


Figure IV.18 Courant de sortie du Boost deux niveau

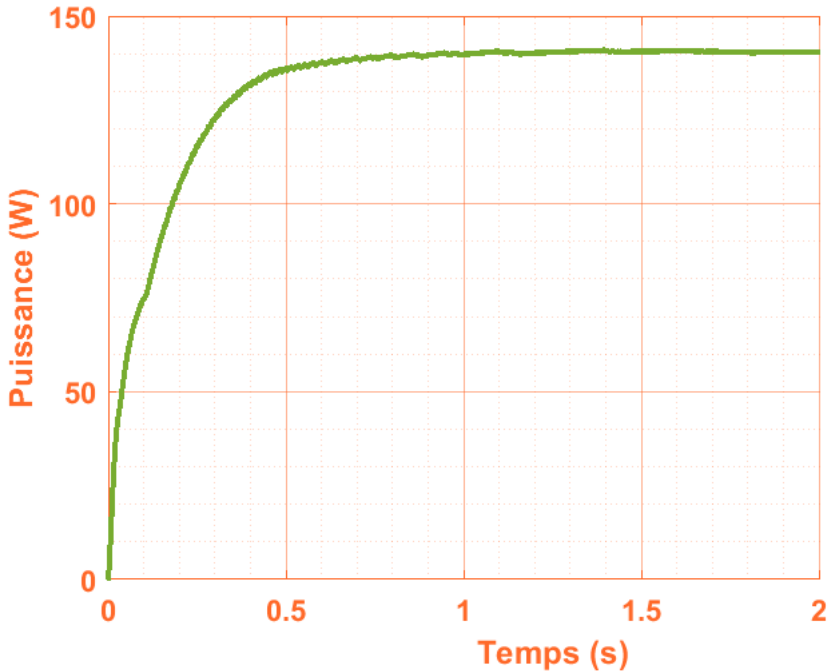


Figure IV.19 Puissance de sortie

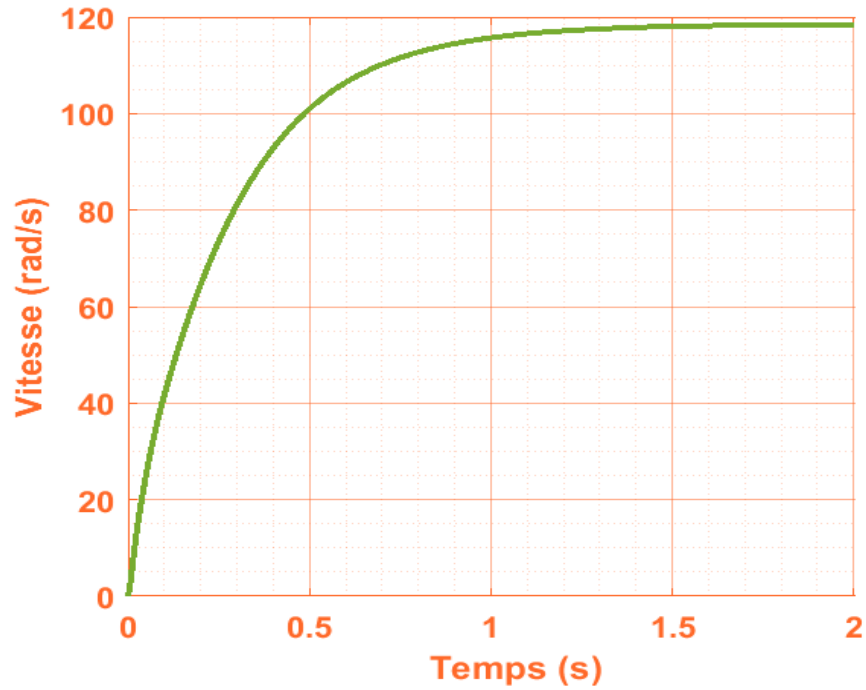


Figure IV.20 Vitesse de rotation du moteur

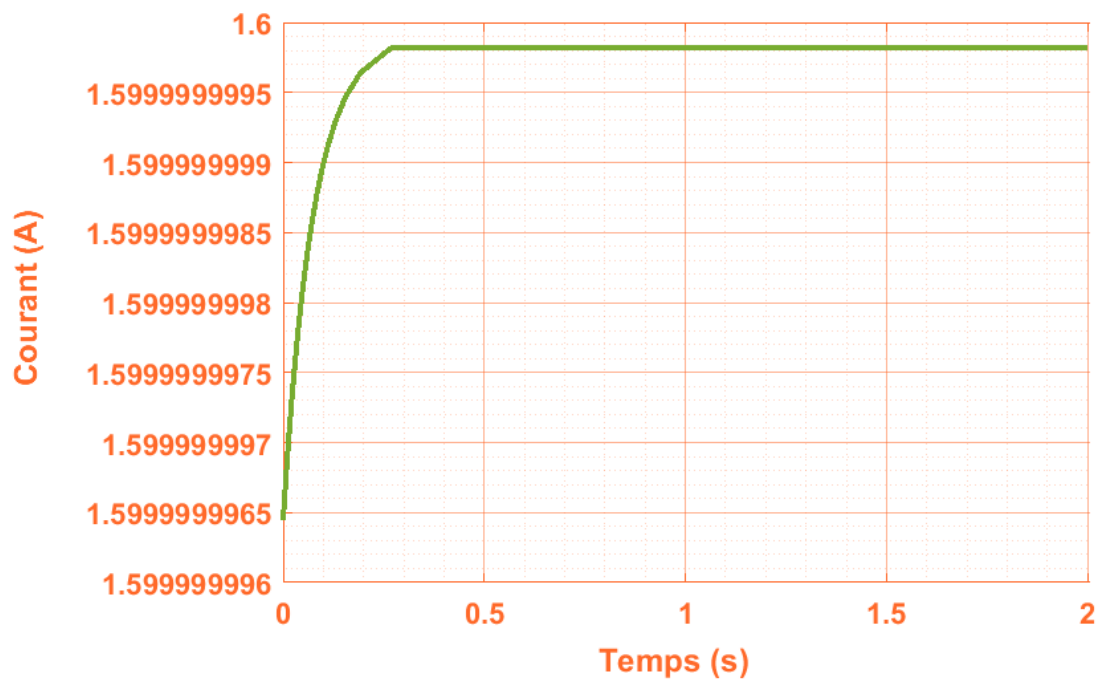


Figure IV.21 Courant absorbé par l'induit du moteur

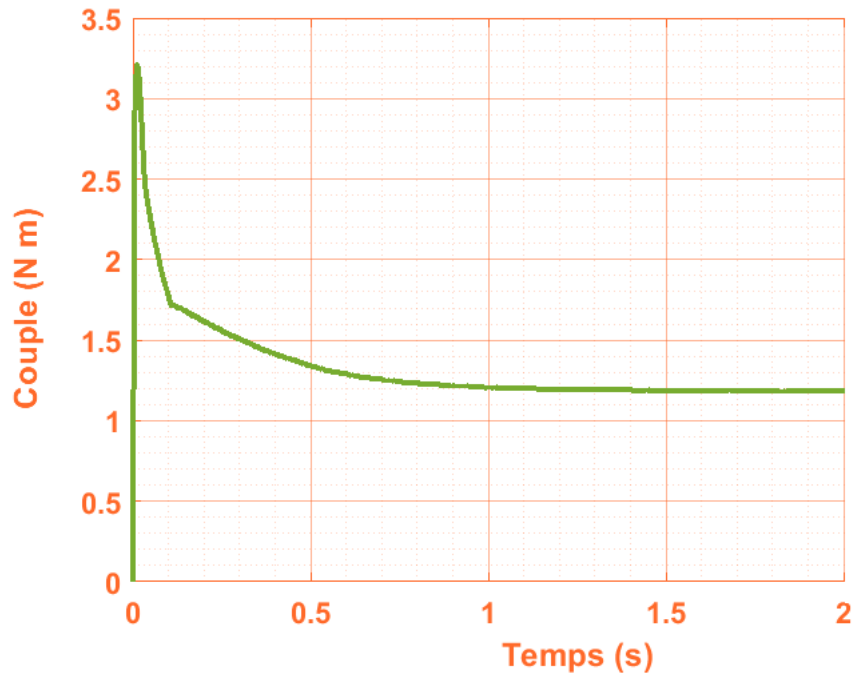


Figure IV.22 Couple de charge et moteur

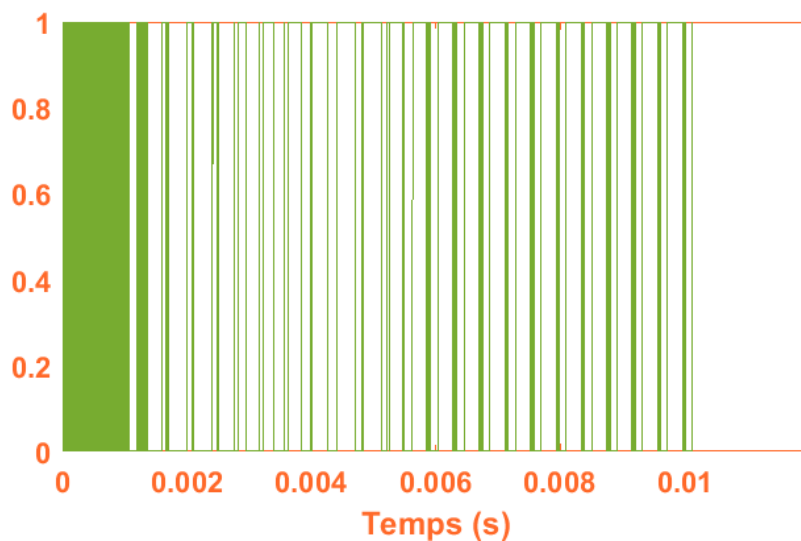


Figure IV.23 Alpha inférieure 0.82

On constate suivant les figures (IV.17 et IV.20), que les allures de la vitesse de rotation et de la tension d'alimentation du moteur délivré par le Boost à deux niveaux, sont identiques, confirmant ainsi le principe de fonctionnement du moteur, malgré le changement de la valeur de l'éclairément.

Le couple du moteur est très faible, car le moteur fonctionne à vide sans couple de charge (Fig.IV.22)

Idem pour le courant de l'induit (voir Fig.IV.18).

Allure du couple et celle du courant de l'induit sont semblable, car ils sont toujours liés électriquement par la relation (IV.6).

$$T = K\Phi I_a \quad (IV.6)$$

Avec Φ =Constante, ce dernier est confirmé par la figure (VI.21) au régime statique.

Lors du régime permanent la tension de sortie se stabilise à la valeur de 245 V et la puissance à la valeur de 145 W et la vitesse se stabilise aussi dans les environs de 120 rad/sec pour un éclairement de 1000W/m² et une température de T=25°C.

Le rapport cyclique est bien illustré en temps réel sur la figure(IV.14) ;

Ce qu'il faut retenir à la fin :

La tension et la puissance délivré par le boost à à deux niveaux dépend étroitement de l'éclairement.

Plus l'éclairement est important, plus la tension et la puissance prennent des valeurs importantes à la sortie du boost à deux niveaux.

IV.4 Conclusion

Ce présent chapitre à présenter la possibilité d'éléver la tension en avale d'un hacheur multi-niveaux lorsque le niveau de tension égale à deux(ou Boost à deux niveaux).

On a mis en évidence la possibilité d'utiliser un Boost multi-niveaux dont le but de réaliser un variateur de vitesse, c'est le cas qui a été concrétisé dans ce chapitre.

Conclusion générale

Le travail qu'on a présenté est consacré à l'étude d'un Boost multi-niveaux alimenté par un panneau photovoltaïque(PV), contrôlé par deux types d'algorithme MPPT type P&O et type conductance incrémentale (INC).

. Cette étude est commencée par des généralités sur les convertisseurs continu-continu et la technologie des semi-conducteurs ainsi que le hacheur multi-niveaux en particulier. Suivi par la modélisation et la simulation du hacheur Boost à un niveau après un dimensionnement adapté des éléments passif L et C constituant les montages on questions. La chaîne photovoltaïque est contrôlée par deux types d'algorithme MPPT type P&O et type conductance incrémentale (INC).

Les résultats obtenus ont fait preuve d'une certaines satisfactions due au dimensionnement adapté de L et C, puisque les grandeurs tensions, courants et ondulations calculés et mesurés sont très rapproches en valeurs, confirmant ainsi la justesse des relations utilisés et répondant au principe de fonctionnement définie par le Boost.

Ensuite, le convertisseur multi-niveaux en particulier le Boost à deux et trois niveaux ont fait objet de modélisations et simulations. Ce qui a permet d'instaurer des modèles mathématiques associé à chaque niveau. Ce qu'il faut retenir dans cette étape, les points phares suivants ;

Le Boost multi-niveaux offre la possibilité d'élevé la tension de sortie au détriment des ondulations qui reste importante pour les niveaux $N+1$.

- Le rapport cyclique agit seulement sur la valeur de la tension, quel que soit le niveau du Boost.
- Les ondulations (courants/tensions) restent liées au rapport cyclique et au niveau du Boost.
- La tension de sortie du Boost multi-niveaux est proportionnelle au niveau N souhaité.

Par la suite, le Boost à deux niveaux est soumis en éprouve en alimentant un moteur à courant continu réalisant ainsi un variateur de vitesse DC-DC-MCC, accompagné par une bonne boucle de régulation de la tension continue et contrôlé par l'algorithme MPPT type la conductance incrémentale (INC).

Les résultats obtenus sont prometteuses, ce qui offre la possibilité d'utiliser ce type de Boost multi-niveaux dans la gamme de la moyenne jusqu'à la haute tension et dans le domaine de la traction électrique. Exemple dans lignes aériennes de contact (L.A.C.) permettent de transporter le courant au pantographe du tramway pour lui fournir l'électricité nécessaire à son déplacement.

Bibliographie

- [1] :SLAMA fateh. Modélisation d'un Système multi générateurs PV interconnectes au réseau électrique. Mémoire de Magister en En Electrotechnique UNIVERSITE FERHAT ABBAS - SETIFUFAS (ALGERIE) 2012
- [2] :W.Achim, Design issues of photovoltaic systems and their grid integration, PhD, U.K.leuven,2003.
- [3] :Farida Bandou épouse Aksoum .Thèse de doctorat en science spécialité électronique « contribution a l'analyse des performances électriques et thermique des modules photovoltaïque de différentes technologies » 2015/2016 Université mouloud mammeri de Tizi Ouzou
- [4]El-Mghouchi Y., El Bouardi A., Choulli Z. et al., (2014), "Estimate of the Direct, Diffuse and Global Solar Radiations", *International Journal of Science and Research*, vol.3: 1449-1457.
- [5] : Gueymard C., (2014), "The sun"s total and spectral irradiance for solar energy applications and solar radiation models", *Solar Energy*, 76 (4), 423-453.
- [6]Thèse de doctorat en science option physique de matériaux présenté par Djelloul Benatiallah ; université Africane ahmed draia ADRAR thème « détermination du gisement solaire par imagerie satellitaire avec intégration dans un système d'information géographique pour le sud d'Algérie » 2019 .
- [7] Otunla T., (2019), "Estimates of clear-sky solar irradiances over Nigeria", *Renewable Energy*, vol. 131:778-787.
- [8] : K .rahrh, « Dimensionnement et optimisation d'un système de pompage photovoltaïque destiné pour l'alimentation en eau potable », thèse doctorat, université de Bejaia 2016.
- [9] I. sari – Ali, B, «Benyoucef, B. Chiekh – Bled « ETUDE DE LA JENCTION BN D'UN SEMI CONDUCTEUR A L'EQUILIBRE THERMODINAMIQUE » *Journal of electron devices*, Vol. 5, 2007, pp. 122-126
- [10] Hamidouche Macylia ,Mokhtari boubkeur , « Etude d'un système photovoltaïque » ,mémoire de master ,université A. MIRA-Bejaïa ,2016.
- [11] :boudrad kahina , « dimensionnement système photovoltaïque avec stockage » ,mémoire de master , Département de Génie électrique , Faculté de technologie ,Université A. MIRA-Bejaïa ,2016.

- [12] YAGOUB Nadjat ,MESSALTI Ghaniya , «Etude et Régulation d'un Convertisseur Boost Elévateur DC-DC Appliqué au Système Photovoltaïque», Mémoire de master , Université Abdelhamid Ibn Badis Mostaganem ,2021.
- [13] A. BORNi, « Etude et régulation d'un circuit d'extraction de la puissance maximale d'un panneau solaire », Mémoire ingénieurs. université de Constantine, 2009.
- [14] : SARRI Sofiane, BOUTEFAHA Hocine, « Commande en MPPT d'une chaîne photovoltaïque à base d'un hacheur multi-niveaux »,mémoire master , Université Mohamed Seddik Ben Yahia - Jijel ,2020
- [15] thème 'Contribution à l'optimisation des systèmes photovoltaïques utilisés pour l'irrigation dans les zones sahariennes – Application zone de Ouargla' Thèse de Doctorat en Sciences Option : Maîtrise d'Energie Présenté Par Mohamed Lakhdar LOUAZENE 2014 /2015 UNIVERSITE EL HADJ LAKHDAR – BATNA
- [16] Energie solaire photovoltaïque.doc / B. Flèche - D. Delagnes / juin 07.
- [17] Bendjellouli Zakaria THESE de Magister Thème "contribution à la modélisation d'une cellule solaire ». Université de Bechar. 2008-2009. MICRO ELECTRONIQUE-Photovoltaïque.
- [18] Kahina OUALI, «Influence des facteurs météorologiques sur le rayonnement solaire A Bejaia »Mémoire de Magister,Université Abderrahmane Mira-Bejaia -2011.
- [19] CHADER Adem et BENRRAMDAN Mohammed Ilyas , «MAXIMISATION DE PUISSANCE D'UN SYSTEME PHOTOVOLTAIQUE PAR LA LOGIQUE FLOUE», mémoire de master , Université 8 Mai 1945 – Guelma ,2020.
- [20]: Maouedj Rachid, "Application de l' énergie photovoltaïque au pompage hydraulique sur les sites de Tlemcen et de Bouzareah", Mémoire De Magister ,2005.
- [21] HANANOU Fatiha ; ROUABAH Aicha, Modelisation et simulation d ' un système photovoltaïque, Mémoire master académique: Université KASDI Merbah Ouargla, 2014.
- [22] Mr. KHALEM Sofiane Mr. GHERBI Azzedine, Technique MLI aléatoire en vue de la réduction des perturbations conduites dans les convertisseurs continus-continus et continus-alternatifs, Diplôme de master: Université M'HAMED BOUGARA Boumerd, 2016.
- [23] A. Bouafia, "Techniques De Commande Prédictive Et Floue Pour Les Systèmes D'électronique De Puissance: Application Aux Redresseurs A Mli", Thèse De Doctorat, 2014.
- [24] slama, f. « Modélisation d'un système multi générateurs photovoltaïques interconnectés au réseau électrique» ,Doctoral dissertation, 2018.
- [25]:. Muhammad h. Rashid, Livre «Power Electronics Handbook », University of Florida University of West Florida Joint Program and Computer Engineering, Academic press, 2001

Bibliographie

- [26] : Bernard Mulon. « Electronique de puissance » : pour les Systèmes d'entraînement électriques ». Doctorat. Systèmes d'entraînements, Bruz, France. 2016, 88 diapos..
- [27] : Hamdi Chaima ,Bouazdia Kawther, « Modélisation et Simulation d'un Hacheur Multi-niveaux »,mémoire master ,université Echahid cheikh Larbi Tébessi –Tébessa ,2023 .
- [28]: Professeur A. Rufer P. Barrade, Cours « d'électronique de puissance Conversion DC/DC », Ecole polytechnique fédérale de Lausanne.
- [29] : Guy SEGUIER, FRANCIS LABRIQUE & PHILIPPE DELARUE, « Electronique de puissance : structures, commandes et applications ».livre Ouvrage, 10e édition DUNOD, paris, France, 2004,2011,2015.
- [30] : El fatmi Ahmed et wene Mohamed, « Les convertisseurs DC-DC pour l'exploitation de L'énergie des panneaux photovoltaïques » Universitaire Belhadj Bouchaib d'Ain-Temouchent Institut des Sciences et de la Technologie, 2015.
- [31] Bensaoudi Mohamed Samir ; Arar Salah Eddine, "Etude D'un Convertisseur Boost Pour Système Photovoltaïque ", Mémoire De Master, Higher School In Applied Sciences Tlemcen. 2020.
- [32] :Thierry LEQUEU, livre « *Cours d'Electronique De Puissance - 2001/2002* », IUT GEII 2ème année, option EEP, notes de cours, juin 2001
- [33]:saif Eddine NAFFOUTI, «Dimensionnement et commande d'un hacheur parallèle alimenté par une source photovoltaïque »,Diplôme national d'ingénieur ,université de Monastir ,2012
- [34] : CHEKKAF Ikram , BOUZIANE Mohammed Amine , «Etude et modélisation des hacheurs boost multi-niveaux dédiés aux systèmes photovoltaïques », Pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur , école supérieure en sciences appliquées-Tlemcen, 2019.
- [35] : R. Merah, 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 Revue des Energies Renouvelables ICESD'11 Adrar (2011) 113 – 121
- [36] :Z.SoheirIbtissem et M. nour el houda «Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque commandé par la commande MPPT (P&O) », thèse de MASTER, Universitaire Belhadj Bouchaib d'Ain-Temouchent, (2019/2020)
- [37] : Kh.Fatima Zohra, « Commande MPPT pour les panneaux photovoltaïques en ombrage »,thèse de MASTER, Université Ahmed Draïa-Adrar, (2020-2021)
- [38] **Yassine Lasmi**, "Optimisation De La Poursuite Du Point De Puissance Maximale(MPPT) D'un Système Photovoltaïque Par Les Techniques Intelligentes", Mémoire De Magister, Université Sétif, 2013.

Bibliographie

- [39] J. H. Lee, H. B. Bo, H. Cho, "Advanced incremental conductance MPPT algorithm with a variable step size", Power Electronics and Motion Control Conference, 2006, EPE-PEMC 2006. 12th International, pp. 603-607, Aug. 2006.
- [40] T. Y. Kim, H. G. Ahn, S. K. Park, Y. K. Le, "A novel maximum power point tracking control for photovoltaic power system under rapidly changing solar radiation", IEEE International Symposium on, Vol. 2, pp. 1011-1014, Jun. 2001
- [41] P. Bartholoméus, « Contribution à l'étude des redresseurs à facteur de puissance quasi unitaire fonctionnant en mode multi-niveaux. Application au chargeur de batteries ». Thèse de doctorat, Université des Sciences et Technologies de Lille, 1996.
- [42] **Lin, B.-R., Hsin-Hung, L.**: "Single-phase three-level PWM rectifier", Proc. IEEE Int. Conf. on Power Electronics and Drive Systems, 1999, pp. 63–68.
- [43] **Huber, L. Jovanovic, M.M.**: "A Design Approach For Server Power Supplies For Networking Applications". Proc. IEEE Applied Power Electronics Conf.
- [44] F.L Tofoli, D.C Pereira, D.S Oliveira, W.J De Paula, "Survey on non-isolated high-voltage step-up dc–dc topologies based on the boost converter", Article in IET Power Electronics · July 2015.
- [45] Mr : Belkaid Abdelhakim, «Conception et implémentation d'une commande MPPT de haute performance pour une chaîne de conversion photovoltaïque autonome», Doctorat en sciences: Université Ferhat Abbas - Sétif, 2015.
- [46] : J. C. Mayo-maldonado, State Space Modeling and Control of the DC-DC Multilevel Boost Converter, article, 2010.
- [47] :M.Tech in Industrial Electronics, SJCE, Mysore, Modeling and Analysis of Three Level DC- DC Boost Converter for High Gain Applications: International Journal of Engineering Science and Innovative Technology (IJESIT), 2014.