

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

MINISTRY OF HIGHER EDUCATION
AND SCIENTIFIC RESEARCH



المدرسة العليا في العلوم التطبيقية
École Supérieure en
Sciences Appliquées

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

المدرسة العليا في العلوم التطبيقية

-تلمسان-

HIGHER SCHOOL IN APPLIED SCIENCES

--T L E M C E N--

Mémoire de fin d'étude

Pour l'obtention du diplôme du Master

Filière : **Electrotechnique**

Spécialité : **Energie et environnement**

Présenté par :

BENSAOUDI Mohamed Samir

ARAR Salah Eddine

Thème

Etude d'un convertisseur boost pour système photovoltaïque

Soutenu publiquement, le /11/2020 devant le jury composé de :

Pr MERAD Lotfi	Professeur	ESSA Tlemcen	Président
Dr Bousmaha Imen Souhila	MCB	ESSA Tlemcen	Directeur de mémoire
Pr BRAHAMI Mostefa	professeur	Univ de SBA	Co- Directeur de mémoire
Dr BOURI Sihem	MCA	ESSA Tlemcen	Examineur 1
Dr CHEMIDI Abdelkarim	MCB	ESSA Tlemcen	Examineur 2

Année universitaire : 2019 /2020

Remerciements

*Tout d'abord, louange et remerciements au bon dieu **ALLAH** le tout puissant qui est à l'origine de toutes les merveilleuses choses dont les plus précieuses « l'amour du savoir »,*

Nous saisissons cette opportunité à travers ce modeste travail en vue de remercier vivement nos promoteurs Dr IMEN SOUHILA BOUSMAHA Maître de conférence et Prof Mostefa BRAHAMI Directeur du laboratoire ICEPS (Intelligent Control and Electrical Power Systems) et leur exprimer notre reconnaissance pour tout les efforts qu'ils n'ont cessé de déployé et tout leur soutien ; leur directives et leur aide en mettant toutes leurs expériences a notre disposition tout au long de ces mois. leurs conseils et pertinentes remarques ainsi que leurs prodigieuses orientations, nous ont été d'une très grande utilité

Nous remercions aussi vivement tous les membres du jury pour leur très précieux temps qu'ils ont consacré à la lecture de ce mémoire et à l'intérêt qu'ils lui ont apporté. Nous leurs sommes très reconnaissants et tres redevables pour leur attention et leur bienveillance.

Un grand merci à nos familles qui nous ont toujours soutenus dans les meilleurs moments comme dans les pires; chers mères et pères.

Nous exprimons nos remerciements les plus sincères et notre profonde gratitude à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce modeste travail.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail et ma profonde gratitude :

- *A mes chers parents pour tout ce qu'ils ont fait pour mon bien ; leur soutien moral et matériel et en particulier pour leur amour et surtout l'éducation qu'ils m'ont prodigué ; avec tous les moyens et au prix de toutes les sacrifices qu'ils ont consentis à mon égard, pour le sens du devoir qu'ils m'ont appris depuis mon enfance. Qu'ALLAH leurs procure bonne santé et longue vie comblé de toutes les merveilleuses choses . Mon cher papa, BENSAOUDI Ameur, et ma chère maman, LAHRACHE Saadia, je tiens à vous remercier.*

- *A mon grand et chère frère lauréat du bac 2007 et architecte Ahmed Khalil, et son épouse Lilia et la petite princesse Meriem qui ont tout le temps été à mes côtés par leur soutien .*

- *A mon adorable frère Aymen Salah Eddine ainsi qu'à ma très chère sœur Dr Aicha et son époux Dr Zemmiri Noerdin et leur petite princesse « Ayla Rym » qui ont toujours crus en moi et en mes compétences et n'ont jamais cessé à m'encouragé, aucune dédicace ne saurait exprimer l'amour que je porte pour vous.*

- *A la mémoire de mes grands-parents. Qu'ALLAH vous accordez sa clémence, sa miséricorde et vous accueilliez dans son saint paradis.*

- *A mes chères tantes, chers oncles, cousins et cousines...*

- *A tous mes amis : BIJAD OUSSAMA EL hawas LBENZ (PDG) avec lesquels j'ai partagé mes moments de joie et de bonheur.*

- *A tous ceux qui me sont chères.*

- *A tous ceux qui m'aiment.*

Mohamed Samir

Résumé

Notre étude a fait le point sur les techniques de conversion DC- DC de l'énergie produite par le procédé photovoltaïque en utilisant la commande MLI et la modélisation mathématique de l'hacheur survolteur.

En vue de mieux concevoir l'objectif de cette étude et rendre concret les résultats auxquels on a abouti, une étude a été faite sur un exemple de ces convertisseurs, l'hacheur survolteur qui est de la famille des hacheurs.

Une simulation d'un hacheur boost a été élaboré avec variation de l'angle de conduction alpha. Un hacheur développé au laboratoire de recherche ICEPS est présenté à titre d'exemple.

Abstract

Our study investigated DC-DC conversion techniques of the energy produced by the photovoltaic process using MLI control and mathematical modeling of the booster chopper.

In order to better design the objective of this study and to make the results concrete, a study was made on an example of these converters, the booster chopper which is of the family of choppers.

A simulation of a boost chopper was developed with variation of the alpha conduction angle. A chopper developed at the ICEPS research laboratory is presented as an example.

ملخص

تتمحور دراستنا في تقنيات تحويل التيارات المستمرة التي تنتجها العملية الكهروضوئية باستخدام تحكم MLI والنمذجة الرياضية لمحولات التيارات المستمرة.

من أجل تصميم أفضل لهدف هذه الدراسة ولجعل النتائج ملموسة، تم إجراء دراسة على مثال لهذه المحولات، والتي هي المحولات الرافعة للتيار الكهربائي.

تم تطوير محاكاة لقطاع التعزيز مع اختلاف زاوية توصيل ألفا. تم تقديم المحول التي تم تطويره في مختبر أبحاث ICEPS كمثال.

SOMMAIRE

Remerciements

Dédicaces

Résumé

liste des figures

liste des tableaux

liste des abréviations

INTRODUCTION GENERALE.....01

Chapitre 1 : Généralités sur les systèmes photovoltaïques

1. Introduction.....05

1.2. Disposition du soleil05

1.3. Spectre du rayonnement07

1.4 Type de rayonnement solaire07

1.5. Energie solaire08

 1.5.a-Utilités08

 1.5.b-Historique de l'énergie photovoltaïque09

1.6. Constitution d'un système photovoltaïque09

 1.6.1- Cellules10

 1.6.1.a-Principe de fonctionnement11

 1.6.1.b-Différentes technologies13

 1.6.1.c- Caractéristiques électriques d'une cellule photovoltaïque.13

 1.6.2-Module photovoltaïque14

 1.6.3-Caractéristiques électriques d'un module15

1.6.3.a-Association en série	15
1.6.3.b-Association en parallèle	16
1.6.3.c-Association en série-parallèle	16
1.6.4- Puissance crête	16
1.6.4.a-Influence de l'éclairement	17
1.6.4.b- Influence de la température	17
1.6.5-Champ photovoltaïque	18
1.7-Avantages du système photovoltaïque	18
1.8. Inconvénients	19
1.9. Conclusion	19

Chapitre 2 : Etude des convertisseurs DC-DC

2.1- Introduction	21
2.2- Convertisseurs DC-DC	21
2.3- Méthodes d'étude des convertisseurs de puissance.....	21
2.4- Structure de base des convertisseurs DC-DC	22
2.5- Domaine d'utilisation des hacheurs	22
2.6- Différents types d'hacheurs	22
2.6.1- Hacheur série (Buck)	23
2.6.2- Hacheur parallèle (Boost)	23
2.6.3- Hacheur abaisseur-élevateur (Buck-Boost)	24
2.7- Gain en tension des convertisseurs	24

2.8- Utilisation des hacheurs dans les systèmes PV	24
2.9- Eléments constitutifs de l'hacheur	25
2.9-1. Générateur.....	25
2.9-2. Interrupteur commandable	25
2.10- Principe de fonctionnement du hacheur Boost	28
2.11- Structure de l'hacheur élévateur	29
2.11.1- Cellule de commutation.....	29
2.11.2- Caractéristique statique des interrupteurs et commutation.	30
2.11.3- Synthèse	32
2.11.4- Relations fondamentales	32
2.12- commande du convertisseur DC-DC.....	35
2.12.1- Commande MLI	35
2.12.1.a- Génération d'une MLI	35
2.12.1.b- Principe de la commande MLI	35
2.12.1.c- Principaux avantages d'une MLI	37
2.12.2- La commande MPPT	37
2.13- Conclusion.....	38

Chapitre 3 : Simulation et interprétation des résultats

3.1- Introduction.....	40
3.2- Simulink Matlab.....	40

3.3- Principe de fonctionnement du hacheur boost (parallèle, élévateur)	41
3.4- Modes de Fonctionnement	43
3.4.a- Discontinu	43
3.4.b- Continu	44
3.4.c- Critique	45
3.5- Caractéristiques de sortie	45
3.5.a- Caractéristique de sortie statique	45
3.5.b- Ondulation résiduelle	46
3.6- Calcul et choix des composants	47
3.6.a- inductance	47
3.6.b- condensateur de sortie	48
3.7- Dimensionnement et calcul des composants du hacheur utilisé.....	48
3.8- Simulation du convertisseur boost	49
3.9- Interprétation des résultats	55
3.10- Convertisseur survolteur réalisé au laboratoire ICEPS.....	55
3.11- Conclusion.....	58
Conclusion générale.....	59

Liste de figures

CHAPITRE 01 :

Figure 1.1 : Transformation de l'hydrogène en hélium	06
Figure 1.2 : Spectre électromagnétique par et hors atmosphère.....	07
Figure 1.3 : composantes du rayonnement solaire global	08
Figure 1.4 : Exploitation de l'énergie solaire.....	08
Figure 1.5 : Purification du Silicium Métallurgique	10
Figure 1.6 : Chaîne de production de panneaux photovoltaïque	11
Figure 1.7 : Représentation en coupe d'une cellule photovoltaïque.....	12
Figure 1.8 : Principe de fonctionnement	12
Figure 1.9 : Caractéristique courant-tension d'une cellule solaire PV.....	14
Figure 1.10 : Module photovoltaïque	14
Figure 1.11 : Caractéristique électrique par association en série.....	15
Figure 1.12 : Caractéristique électrique par association en parallèle.....	16
Figure 1.13 : Caractéristique électrique par association en parallèle	16
Figure 1.14 : Influence de l'éclairement sur la caractéristique courant-tension ...	17
Figure 1.15 : Influence de la température sur la caractéristique courant-tension .	17
Figure 1.16 : Champ photovoltaïque	18

CHAPITRE 02 :

Figure 2.1 : Schéma de principe d'un hacheur.	21
Figure 2.2 : Hacheur série (abaisseur).....	23
Figure 2.3 : Hacheur parallèle (élevateur).....	23
Figure 2.4 : Hacheur abaisseur-élevateur.	24
Figure 2.5 : Zones approximatives d'utilisation des principaux semi-conducteurs de puissance.....	26
Figure 2.6 : Symbole d'un transistor MOSFET.....	26
Figure 2.7 : Symbole d'un Thyristor SCR.....	27
Figure 2.8 : Symbole d'un Transistor BJT.....	27
Figure 2.9 : Symbole d'un transistor IGBT.....	28
Figure 2.10 : Schéma de base d'un convertisseur Boost.....	28
Figure 2.11 : Configurations d'un convertisseur Boost suivant l'état de S.....	29
Figure 2.12 : Structure du hacheur élevateur.....	29
Figure 2.13 : Grandeurs électriques caractéristiques du boost.....	30
Figure 2.14 : Caractéristiques statiques.....	31
Figure 2.15 : Hacheur élevateur et sa charge.....	32
Figure 2.16.a : Grandeurs caractéristiques (Tensions)	33
Figure 2.16.b : Grandeurs caractéristiques (Courants)	33
Figure 2.17 : Tension UI aux bornes de l'inductance.....	34

Figure 2.18 : Structure de la commande d'un hacheur.....	35
Figure 2.19 : Réalisation d'un signal MLI.....	36
Figure 2.20 : Allure d'un signal MLI.....	36
Figure 2.21 : Schéma synoptique d'un système PV commandé par une MPPT.....	37

CHAPITRE 03 :

Figure 3.1 : Représentation des tâches au niveau de Matlab.....	41
Figure 3.2 : schéma de principe du hacheur boost.....	41
Figure 3.3 : Allure du signal de commande appliqué à l'interrupteur Q.....	42
Figure 3.4 : Différents allures d'onde.....	43
Figure 3.5 : Différents allures d'onde en fonctionnement discontinu.....	44
Figure 3.6 : Différents allures d'onde en fonctionnement continu.....	45
Figure 3.7 : Caractéristique de sortie $I_s = f(V_s)$	46
Figure 3.8 : Allure de courant dans l'inductance L	46
Figure 3.9 : Allure des courants I_c et I_d	47
Figure 3.10 : Schéma d'un hacheur Boost alimenté par un générateur PV	48
Figure 3.11 : Génération du signal de commande pour $\alpha=0.95$	50
Figure 3.12 : Données entré dans le signal dents de Cie	50
Figure 3.13 : Signal de commande	51
Figure 3.14 : Schéma block du hacheur boost pour $\alpha=0.95$	51
Figure 3.15 : Allure des tensions V_e (bleu), V_s (orange).....	52
Figure 3.16 : Allure de courant de charge	52
Figure 3.17 : Génération du signal de commande pour $\alpha=0.5$	53
Figure 3.18 : Signal de commande.....	53
Figure 3.19 : Schéma block du hacheur boost pour $\alpha=0.5$	54
Figure 3.20 : Allure des tensions V_e (bleu), V_s (orange).....	54
Figure 3.21 : Allure de courant de charge.....	55
Figure 3.22 : Schéma du circuit de puissance.....	56
Figure 3.23 : Schéma de la commande MPPT Numérique.....	56
Figure 3.24 : Photo du circuit de puissance.....	57
Figure 3.25 : Photo de la carte de commande.....	57
Figure 3.26 : Photo du prototype du convertisseur MPPT.....	58

Liste des tableaux

Tableau 1.1: Composition chimique du soleil.....	5
Tableau 1.2: Comparatif des différentes technologies.....	13
Tableau 2.1: Gain en tension des convertisseurs.....	24
Tableau 2.2 : Rapports de transformation des principaux convertisseurs DC-DC.....	25
Tableau 2.3 : Tableau récapitulatif des niveaux de puissances et des fréquences des semi-conducteurs.....	28

Liste des abréviations

PV : Photovoltaïque.

UAI : Union Astronomique Internationale.

SiO₂ : Dioxyde de silicium.

MG Si : Silicium Métallurgique.

Cl⁻ : ions chlorures.

V_{co} : Tension à vide.

I_{cc} : Courant de court-circuit.

MPP : Maximal Power Point.

V_{opt} : Tension Optimale.

I_{opt} : Courant optimal.

EVA : Ethylène- Vynil- Acétate.

Si : Silicium.

MCC : Machine à Courant Continue.

TGV : Train à Grande Vitesse.

MOSFET : Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor.

IGBT : Insulated Gate Bipolar Transistor.

SCR: Silicon Controlled Rectifier.

BJT : Bipolar Junction Transistor.

MLI : Modulation de Largeur d'Impulsion.

PWM : Pulse Width Modulation.

MPPT : Maximum Power Point Tracking.

T: Temps de conduction.

INTRODUCTION GENERALE

Introduction Générale

Le Contexte énergétique mondial est caractérisé, aujourd'hui, par une demande sur les produits énergétiques, en constante hausse. La consommation des sources fossiles, constituant plus de 80 % de la matière première de la production électrique, donne lieu à des émissions de gaz à effet de serre et par conséquent à une augmentation de la pollution. Ce constat pousse à rechercher de plus en plus de solutions innovantes palliant ce déficit énergétique et limitant l'impact négatif sur l'environnement.

Ainsi, le développement des sources non-polluantes à base d'énergie renouvelable est de plus en plus sollicité à la fois par les producteurs d'énergie et les pouvoirs publics. De plus, les énergies renouvelables utilisent des sources inépuisables d'énergies d'origine naturelle telles que la biomasse, l'énergie éolienne, solaire, hydroélectrique et géothermique qui peuvent fournir des services énergétiques durables.

L'énergie solaire photovoltaïque est parmi les énergies renouvelables qui connaissent un développement et une amélioration rapide dans les deux dernières décennies. Comme le rayonnement solaire est réparti sur toute la planète, l'utilisation de telles installations semble un très bon moyen de conversion d'énergie électrique.

L'élément de base d'un système photovoltaïque reste le panneau solaire, qui est constitué de cellules solaires. Ces cellules solaires convertissent le rayonnement solaire en électricité grâce à l'effet photovoltaïque. La caractéristique électrique d'un panneau photovoltaïque est donnée par le fabricant sous formes de courbes représentatives de la variation du courant et de la puissance par rapport à la tension du panneau.

La tension délivrée par les panneaux d'un système PV est continue et de faible amplitude. Pour l'élever à une valeur supérieure on utilise un convertisseur appelé hacheur de type élévateur ou boost. En général, le convertisseur boost est le moyen le plus simple d'augmenter la tension d'une alimentation DC.

Les hacheurs sont des convertisseurs statiques continu-continu, permettant de générer une source de tension continue variable à partir d'une source de tension continue fixe. Ils se composent de condensateurs, d'inductance et d'interrupteurs statiques. Ils consomment moins de puissance, raison pour laquelle les hacheurs ont de très bons rendements.

Ce travail de mémoire est dédié à l'étude et à la simulation (prévu pour la réalisation) d'un convertisseur DC-DC de type Boost en utilisant une commande MLI. La démarche adoptée pour la conduite de ce travail ainsi que les travaux de simulations seront présentés dans les trois chapitres, qui constituent ce mémoire :

- Dans le premier chapitre, nous présentons une vision générale sur les systèmes photovoltaïques
- Le deuxième chapitre, est consacré à l'étude des convertisseurs DC-DC particulièrement le hacheur BOOST
- Au dernier chapitre, on présente les résultats de simulation de l'hacheur sous Matlab-Simulink.

Ce travail s'achèvera par une conclusion générale, et une bibliographie qui regroupe l'ensemble des documents consultés au cours du travail réalisé.

CHAPITRE 1 :

Généralités sur les systèmes

photovoltaïques

1.1-Introduction

Le mot « Photovoltaïque » est la combinaison de deux mots : « photo », mot d'origine grecque qui signifie lumière ; et « voltaïque », qui vient de « volt » et représente l'unité utilisée pour mesurer le potentiel électrique [1].

L'énergie solaire photovoltaïque (PV) provient de la conversion directe de l'énergie provenant des photons, comprise dans le rayonnement solaire, en énergie électrique, par le biais de capteurs fabriqués avec des matériaux sensibles aux longueurs d'ondes du visible (nommés cellules PV) [2].

Les cellules solaires sont généralement associées en série et en parallèle, puis encapsulées sous verre pour obtenir un module photovoltaïque [3].

Un générateur PV est constitué de modules interconnectés pour former une unité produisant une puissance continue élevée compatible avec le matériel électrique usuel.

Les modules PV sont habituellement branchés en série-parallèle pour augmenter la tension et l'intensité à la sortie du générateur [4].

Les modules interconnectés sont montés sur des supports métalliques et inclinés suivant l'angle désiré en fonction du lieu, cet ensemble est souvent désigné par champ de modules

1.2- Disposition du soleil

L'unité astronomique, qui correspond à la distance entre la terre et le soleil a été officiellement gravée dans le marbre par l'union astronomique internationale (UAI) et est de 149 597 870.700 km [5] [6].

Le soleil est composé de matière gazeuse principalement d'éléments légers : hydrogène à 74 % et hélium à 24 % (voir le tableau 1.1). Ces derniers sont moins abondants sur la Terre qui est plutôt constituée de matériaux lourds, qui entrent pour 0,1 % seulement dans la composition du soleil [6]

Tableau 1.1: Composition chimique du soleil [6].

Composition photosphérique (en masse)	
Hydrogène	73,46 %
Hélium	24,85 %
Oxygène	0,77 %
Carbone	0,29 %
Fer	0,16 %
Néon	0,12 %
Azote	0,09 %
Silicium	0,07 %

Magnésium	0,05 %
Soufre	0,04 %

Le soleil est le siège de réactions de fusion nucléaire permanentes et sa température de cœur atteint 10^7 K.

Actuellement, dans le cœur du soleil, chaque seconde, environ 627 millions de tonnes d'hydrogène fusionnent pour produire environ 622,7 millions de tonnes d'hélium (voir figure 1.1). La différence de masse de 4,3 millions de tonnes d'hydrogène (une masse de l'ordre de celle de la pyramide de Gizeh) équivaut à l'énergie lumineuse produite ($4 \cdot 10^{26}$ joules). Cette énergie lumineuse migre lentement par rayonnement et par convection vers la surface solaire et est émise dans l'espace sous forme de rayonnements électromagnétiques (lumière, rayonnement solaire) et de flux de particules (vent solaire) [7].

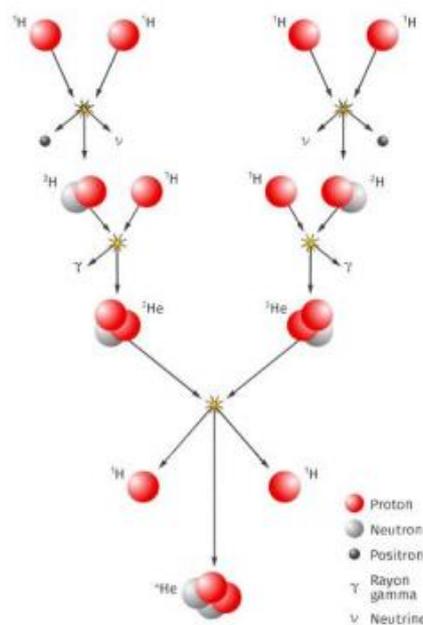


Figure 1.1 : Transformation de l'hydrogène en hélium [8]

1.3- Spectre du rayonnement

Les rayons solaires arrivent en permanence sur Terre et chauffent la surface de notre planète, sans cet apport d'énergie, la terre serait glaciale.

Le soleil émet un rayonnement de type électromagnétique. La lumière blanche nous parvient en très peu de temps (elle met en moyenne environ 8 minutes et 19 secondes à nous parvenir) car il se déplace à la vitesse de la lumière, soit 299 792 458 m/s [9]. Le rayonnement solaire est composé de plusieurs types de rayons, certains sont filtrés ou arrêtés par l'atmosphère et les nuages, alors que d'autres ne le sont pas. Les rayons solaires sont aussi appelés les radiations [10] (voir figure 1.2).

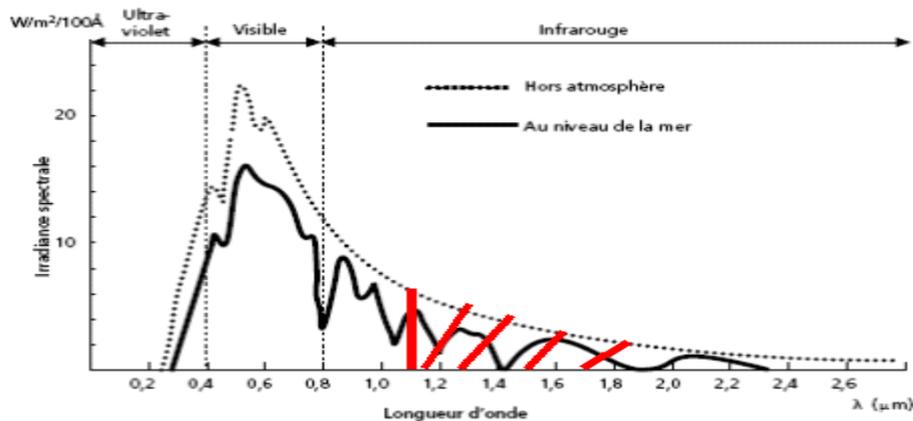


Figure 1.2: Spectre électromagnétique par et hors atmosphère [10]

1.4- Type de rayonnement solaire

L'énergie que transmet le soleil à la surface de l'atmosphère par rayonnement est égale à 1350 Watts/m² (c'est la constante solaire). Cependant, en traversant l'atmosphère, des parties de ce rayonnement sont réfléchies, absorbées ou diffusées comme montré sur la figure 1.6, ce qui diminue significativement cette valeur. Cette diminution est d'autant plus forte que la couche d'atmosphère est importante. Ainsi, l'énergie que nous transmet le soleil dépend de plusieurs facteurs comme l'épaisseur de l'atmosphère où l'on se trouve ou encore la position du soleil et sa valeur atteint dans les meilleures conditions 900 à 1000 Watts/m². [11]

- **Le rayonnement direct**, le plus puissant, qui provient directement du soleil sans subir d'obstacles sur sa trajectoire (nuage, immeubles...). C'est lui qui nous aveugle lorsque l'on cherche à regarder le soleil "droit dans les yeux" par temps découvert.
- **Le rayonnement diffus** provient des multiples diffractions et réflexions du rayonnement solaire direct par les nuages. C'est à lui que nous devons la "lumière du jour" qui nous permet d'y voir clair même quand le temps est couvert.
- **Le rayonnement dû à l'albédo ou réfléchi**, résulte de la réflexion du rayonnement solaire direct par le sol, qui est d'autant plus important que la surface est claire et réfléchissante (neige,

étendue d'eau, ...). C'est lui qui peut nous faire attraper des coups de soleil à la montagne ou à la mer sans qu'on les sente venir.

- **Le rayonnement global sur une surface horizontale** est la somme des rayonnements : Direct et Diffus
- **Le rayonnement global sur une surface inclinée** est la somme des rayonnements : Direct, Diffus et Réfléchi [12]

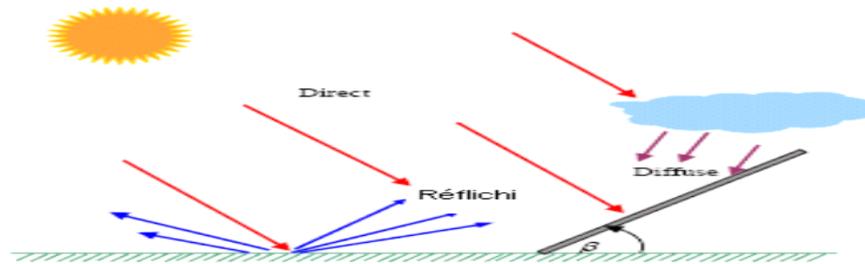


Figure I.3: composantes du rayonnement solaire global [12]

1.5-Energie solaire

1.5.1-Utilités

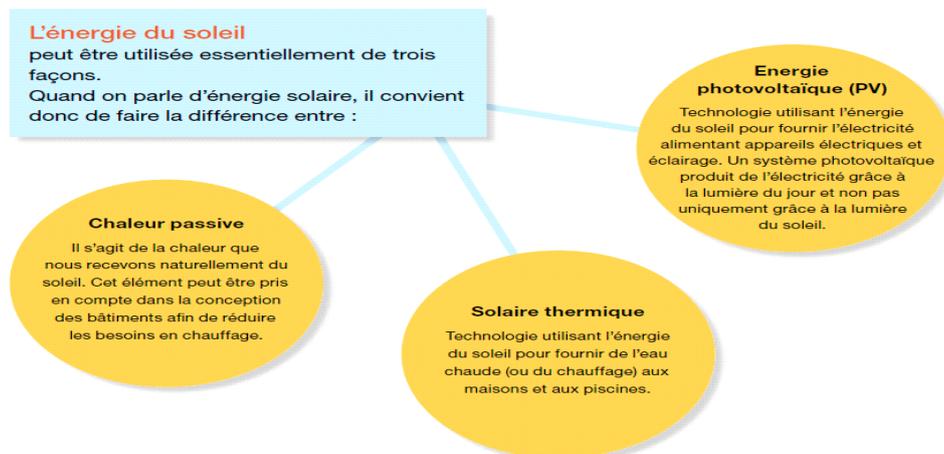


Figure 1.4: Exploitation de l'énergie solaire [13].

Dans ce travail, nous nous intéressons à l'étude de l'énergie solaire photovoltaïque.

1.5.2-Historique de l'énergie photovoltaïque

Quelques dates importantes dans l'histoire du photovoltaïque [14].

1839: Le physicien français Edmond Becquerel découvre le processus de l'utilisation de l'ensoleillement pour produire du courant électrique dans un matériau solide. C'est l'effet photovoltaïque.

1875: Werner Von Siemens expose devant l'Académie des Sciences de Berlin un article sur l'effet photovoltaïque dans les semi-conducteurs.

Mais jusqu'à la Seconde Guerre Mondiale, le phénomène reste encore une curiosité de laboratoire.

1905 : Albert Einstein a écrit que la lumière pouvait entrer à l'intérieur des atomes, et que la collision entre les photons et les atomes pouvait faire sortir des électrons de leurs orbites et permettre la création d'un courant électrique.

1912 : Albert Einstein sera le premier à expliquer le phénomène d'effet photovoltaïque, et reçoit le prix Nobel de physique en 1921 pour cette explication.

1954: Trois chercheurs américains, Chapin, Pearson et Prince, mettent au point une cellule photovoltaïque à haut rendement au moment où l'industrie spatiale naissante cherche des solutions nouvelles pour alimenter ses satellites.

1958: Une cellule avec un rendement de 9 % est mise au point. Les premiers satellites alimentés par des cellules solaires sont envoyés dans l'espace.

1973: La première maison alimentée par des cellules photovoltaïques est construite à l'Université de Delaware.

1983: La première voiture alimentée par l'énergie photovoltaïque parcourt une distance de 4 000 km en Australie.

1995: Des programmes de toits photovoltaïques raccordés au réseau ont été lancés, au Japon et en Allemagne, et se généralisent depuis 2001.

Actuellement la production mondiale de l'électricité à base d'énergie solaire est d'environ : 185.9 TWh [16].

1.6-Constitution d'un système photovoltaïque

L'effet photovoltaïque est un phénomène physique propre à certains matériaux appelés "semi-conducteurs", dont le plus communément utilisé est le silicium, un élément présent en grande quantité dans le sable [15].

Un système photovoltaïque se compose principalement de :

1.6.1- Cellules : éléments de base de l'unité qui collectent la lumière du soleil; la fabrication des cellules s'agit dans un premier temps d'élaborer du silicium de grade solaire utilisable pour former des plaques de Silicium. Le Silicium est tiré de la Silice (SiO_2), que l'on trouve abondamment dans la nature, dans le quartz ou dans le sable et est raffiné par réduction carbo

thermique effectuée dans un four à Arc afin d'obtenir du Silicium Métallurgique (MG Si) qui n'est pas encore exploitable pour la création de panneau solaire [16].

Pour purifier le Silicium métallurgique, on peut le faire de différentes manières mais la voie chimique est la plus répandue. Ceci en utilisant le principe du Chlore du fait de la forte attraction des atomes de Silicium et des ions chlorures (Cl⁻). Ces composés sont purifiés ensuite par distillation et décomposition thermique [17](voir figure 1.5).

Le Silicium solaire ou poly cristallin obtenu lors de la précédente étape va être ensuite fondu et ré solidifié en lingots. C'est dans ces lingots que l'on découpe finalement les plaques de silicium qui serviront à fabriquer les cellules [18] (voir figure 1.6).

En effet, c'est lorsque le silicium est en fusion que les produits dopants sont ajoutés afin qu'un courant électrique se forme au sein des cellules. C'est aussi lors de cette étape que se crée la distinction entre panneaux monocristallins et poly cristallins [19].

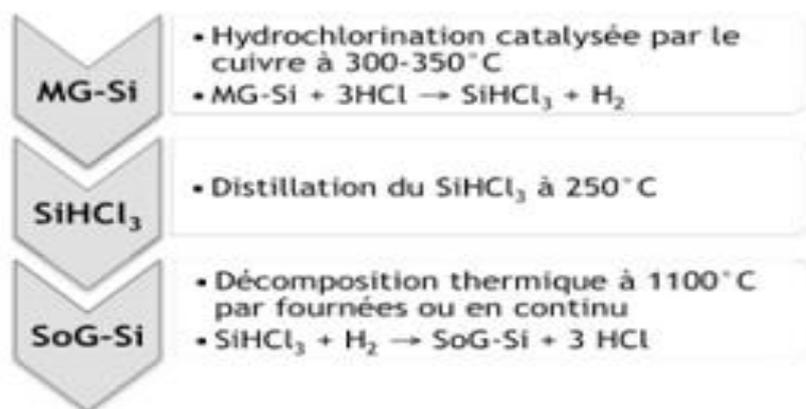


Figure 1.5: Purification du Silicium Métallurgique [20]



Figure 1.6: Chaîne de production de panneaux photovoltaïque (technologie cristalline) [21]

1.6.1.1-Principe de fonctionnement

Pour passer de l'effet photovoltaïque à l'application pratique, il est nécessaire de trouver des matériaux qui permettent d'optimiser les deux phases essentielles de ce principe :

- Absorption de la lumière incidente
- Collection des électrons en surface

Les cellules PV sont fabriquées à partir de matériaux semi-conducteurs qui sous l'effet de la lumière sont capables de conduire l'électricité ou de la transporter.

Une des faces de la cellule est dopée **n** (par exemple du phosphore possédant 5 électrons sur sa dernière couche ainsi l'atome susceptible à libérer un électron). L'autre face est dopée **p** (par exemple du bore qui possède lui 3 électrons seulement sur sa périphérie, ainsi l'atome manque un électron pour la réalisation des liaisons, le bore va donc capter un électron dans le reste du matériau).

Des électrodes métalliques sont placées sur les 2 faces pour permettre de récolter les électrons et de réaliser un circuit électrique voir figure 1.7.

La face supérieure de la cellule est traitée de manière à optimiser la quantité de lumière entrant dans la cellule au moyen de traitement de surface, par l'application d'une couche anti réflexion.

L'effet photovoltaïque se manifeste quand un photon est absorbé dans un matériau composé de semi conducteurs dopés p (positif) et n (négatif), dénommé comme jonction p-n (ou n-p). Sous l'effet de ce dopage, un champ électrique est présent dans le matériau de

manière permanente (comme un aimant possède un champ magnétique permanent). Quand un photon incident (grain de lumière) interagit avec les électrons du matériau, il cède son énergie $h\nu$ à l'électron qui se retrouve libéré de sa bande de valence et subit donc le champ électrique intrinsèque. Sous l'effet de ce champ, l'électron migre vers la face supérieure laissant place à un trou qui migre en direction inverse. Des électrodes placées sur les faces supérieure et inférieure permettent de récolter les électrons pour rejoindre les trous de la face antérieure à travers un circuit extérieur créant ainsi un courant électrique continu qu'on appelle le photo courant, les électrons sont délivrés sous la tension créée dans la jonction PN qu'on appelle la photo tension (comme montrée sur la figure 1.8) [22].

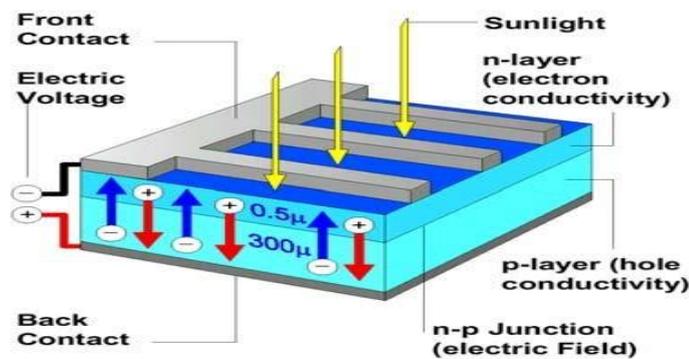


Figure 1.7: Représentation en coupe d'une cellule photovoltaïque [23]

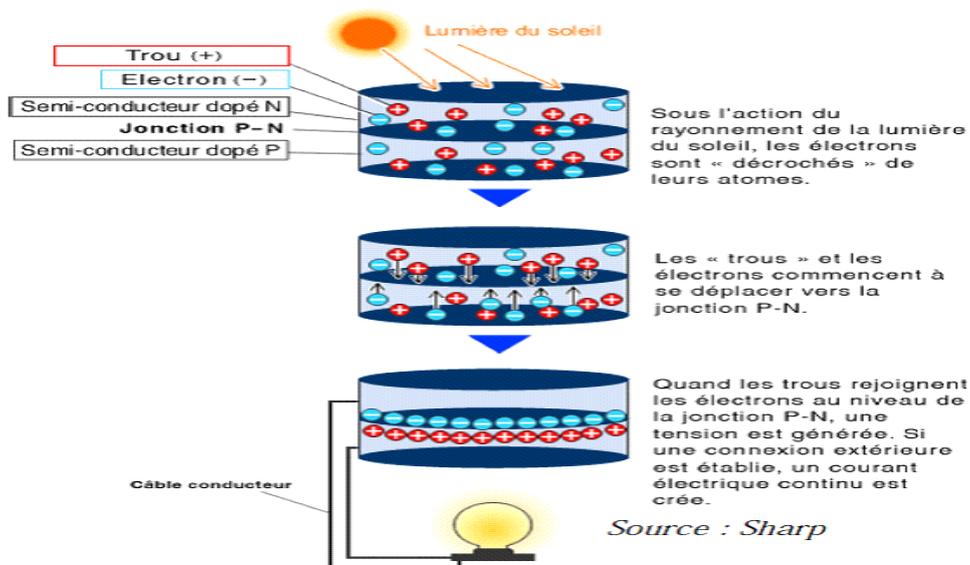


Figure 1.8 : Principe de fonctionnement [24]

1.6.1.2-Différentes technologies

Il existe différentes technologies de cellules photovoltaïques. Les différences entre elles se

situent au niveau des matériaux utilisés et des procédés de fabrication (tableau 1.2)

Tableau 1.2: Comparatif des différentes technologies [25].

Matériau	Rendement	Longévité	caractéristiques	Principales utilisations
Silicium mono cristallin	12 à 18% <i>(24,7% en laboratoire)</i>	20 à 30 ans	* Très performant * Stabilité de production d'W * Méthode de production coûteuse et laborieuse.	Aérospatiale, modules pour toits, façades,...
Silicium poly cristallin	11 à 15% <i>(19,8% en laboratoire)</i>	20 à 30 ans	* Adapté à la production à grande échelle. * Stabilité de production d'W. Plus de 50% du marché mondial.	Modules pour toits, façades, générateurs...
Amorphe	5 à 8% <i>(13% en laboratoire)</i>		* Peut fonctionner sous la lumière fluorescente. * Fonctionnement si faible luminosité. * Fonctionnement par temps couvert. * Fonctionnement si ombrage partiel * La puissance de sortie varie dans le temps. En début de vie, la puissance délivrée est de 15 à 20% supérieure à la valeur nominale et se stabilise après quelques mois.	Appareils électroniques (montres, calculatrices...), intégration dans le bâtiment
Composite mono cristallin (GaAs)	18 à 20% <i>(27.5% en laboratoire)</i>		* Lourd, fissure facilement	Systèmes de concentrateurs Aérospatiale (satellites)
Composite poly cristallin (CdS, CdTe, CuInGaSe2, etc.)	8% <i>(16% en laboratoire)</i>		Nécessite peu de matériaux mais certains contiennent des substances polluantes	Appareils électroniques (montres, calculatrices...), intégration dans le bâtiment

1.6.1.3- Caractéristiques électriques d'une cellule photovoltaïque

Sous un éclairage donné, toute cellule photovoltaïque est caractérisée par une courbe courant-tension (Figure 1.9) représentant l'ensemble des configurations électriques que peut prendre la cellule. Trois grandeurs physiques définissent cette courbe [26]:

- Sa tension à vide : V_{co} : cette valeur représenterait la tension générée par une cellule éclairée non raccordée.
- Son courant de court-circuit : I_{cc} : cette valeur représenterait le courant généré par une cellule éclairée raccordée à elle-même.
- Son point de puissance maximal: MPP (en anglais : maximal power point) obtenu pour une tension et un courant optimaux : V_{opt} , I_{opt} (parfois appelés aussi V_{mpp} , I_{mpp}).

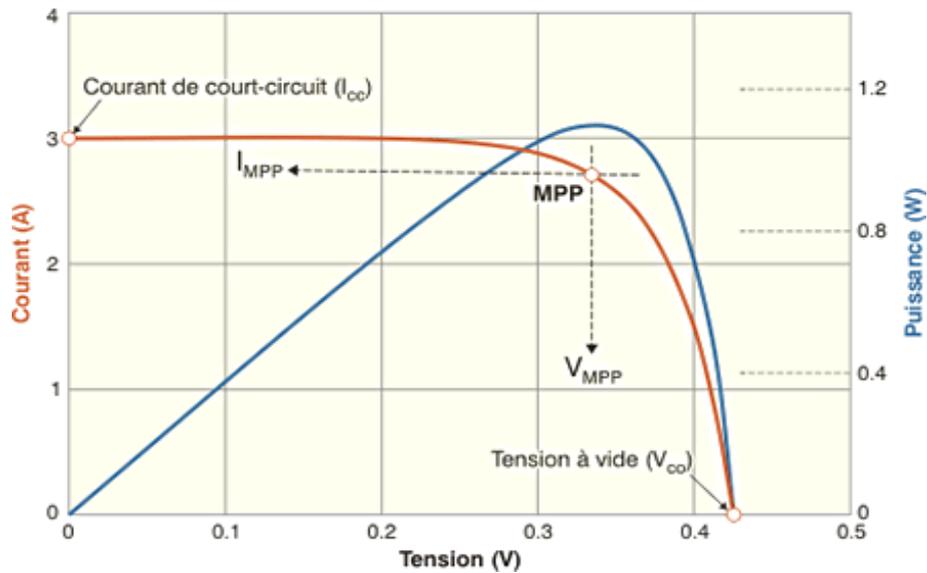


Figure 1.9: Caractéristique courant-tension d'une cellule solaire photovoltaïque [26]

1.6.2-Module photovoltaïque

Pour produire plus de puissance, les cellules solaires sont assemblées pour former un module. Les connections en série de plusieurs cellules augmentent la tension pour un même courant, tandis que la mise en parallèle accroît le courant en conservant la tension. Ces cellules sont protégées de l'humidité par encapsulation dans un polymère EVA (éthylène-vinyl- acétate) (voir figure 1.10) et protégées sur la surface avant d'un verre trempé à haute transmission et de bonne résistance mécanique et sur la surface arrière de polyéthylène [27]

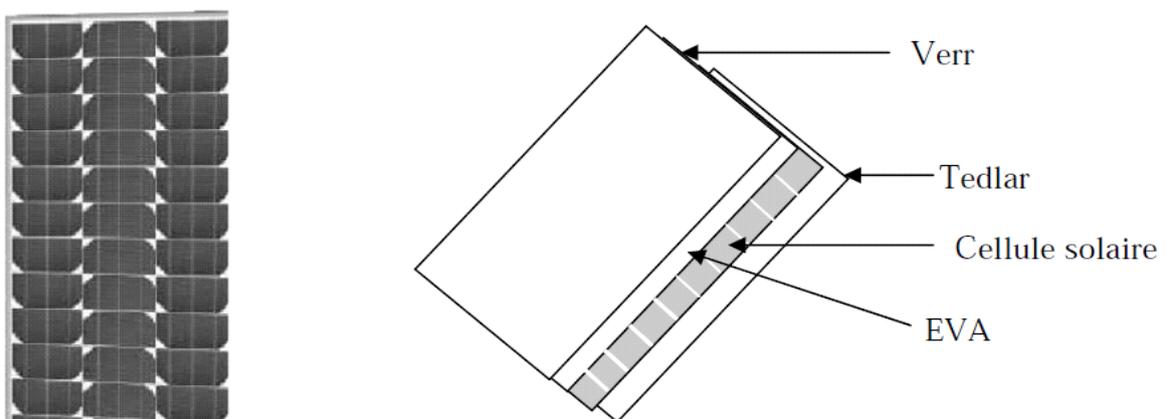


Figure 1.10: Module photovoltaïque [27]

Les modules photovoltaïques assurent les fonctions suivantes :

- Protection des cellules contre les agents atmosphériques
- Protection mécanique et support.
- Connexion électrique entre cellules et avec l'extérieur.

1.6.3-Caractéristiques électriques d'un module

Dans les conditions standardisées de test, la puissance maximale pour une cellule Si (silicium) de 100 cm^2 (10 sur 10) tourne aux alentours de 1,25 Watt. Cette cellule constitue donc un générateur de très faible puissance, insuffisant pour les applications électriques courantes. Les modules sont donc réalisés par association, en série et/ou en parallèle, de cellules élémentaires. La connexion en série augmente la tension pour un même courant alors que la connexion en parallèle augmente le courant pour une tension identique.

Pour que l'électricité générée soit utilisable pour les applications électriques, il est donc nécessaire d'associer entre elles un grand nombre de cellules.

Les modules (généralement présentés sous forme de panneaux) sont constitués d'un certain nombre de cellules élémentaires placées en série afin de rendre la tension à la sortie utilisable. Ces modules sont ensuite associés en réseau (série-parallèle) de façon à obtenir les tensions/courants désirés [28].

1.6.3.1-Association en série

Par association en série (appelée "String"), les cellules sont traversées par le même courant et la tension résultante correspond à la somme des tensions générées par chacune des cellules (Figure 1.11) [29].

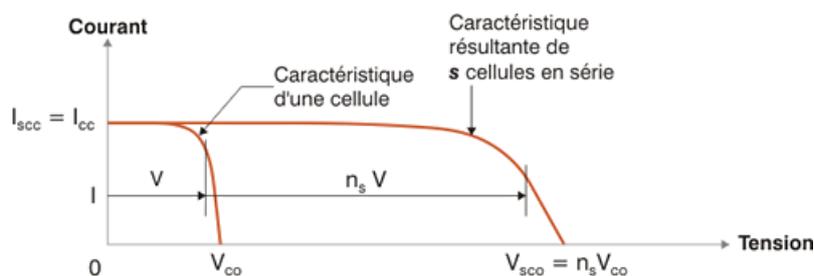


Figure 1.11: Caractéristique électrique par association en série [29]

1.6.3.2-Association en parallèle

Par association en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et le courant résultant correspond à la somme des courants générés par chacune des cellules (Fig 1.12).

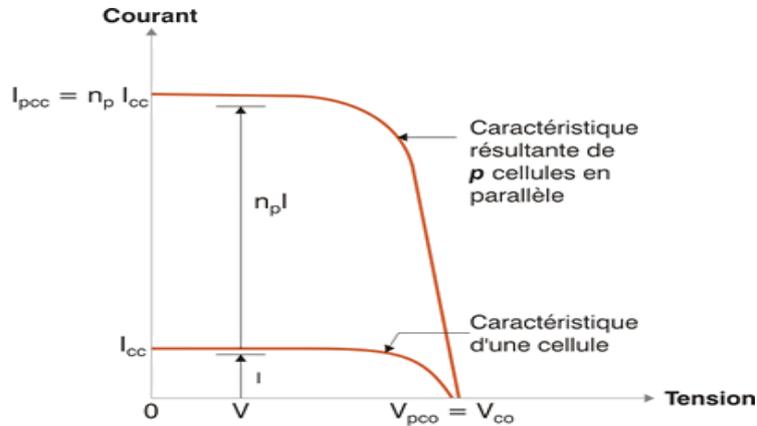


Figure 1.12: Caractéristique électrique par association en parallèle [29]

1.6.3.3-Association en série-parallèle

Les caractéristiques globales d'une installation se déduisent donc d'une combinaison des caractéristiques des constituants des $n_s * n_p$ (Figure 1.13). [29]

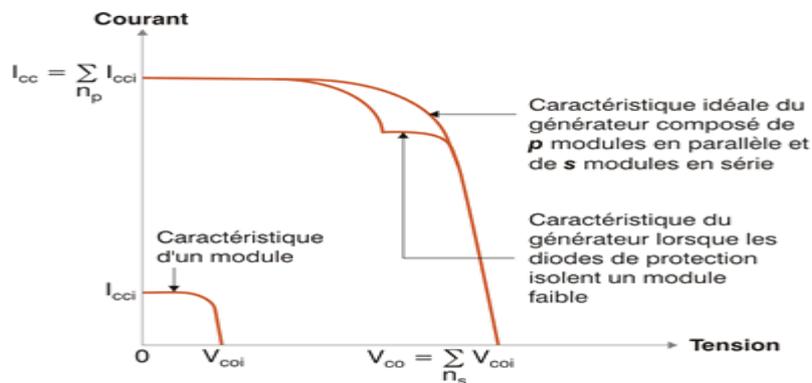


Figure 1.13: Caractéristique électrique par association en parallèle [29]

1.6.4- Puissance crête

Les constructeurs spécifient toujours la puissance crête d'un panneau photovoltaïque. Elle représente la puissance maximum fournie par le panneau lorsque l'éclairement est $1\ 000\ \text{W/m}^2$, la température est $25\ ^\circ\text{C}$ et le spectre solaire Air Mass (AM) 1,5.

Cependant, cette puissance est rarement atteinte car l'éclairement est souvent inférieur à $1000\ \text{W/m}^2$ et la température des panneaux en plein soleil dépasse largement les $25\ ^\circ\text{C}$ [30].

1.6.4.1-Influence de l'éclairement

A température constante, la caractéristique *courant-tension* dépend fortement de l'éclairement (Figure 1.14).

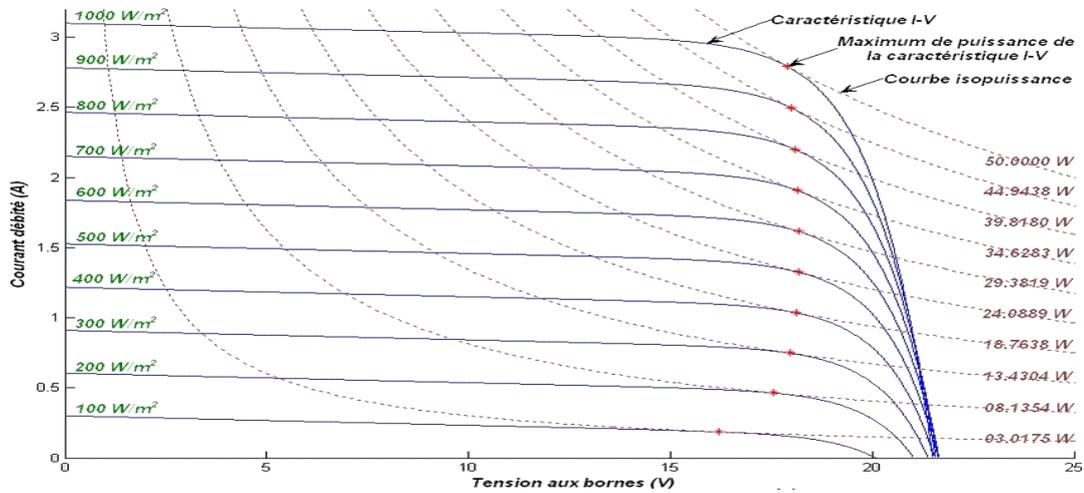


Figure 1.14: Influence de l'éclairement sur la caractéristique courant-tension [31]

Nous remarquons que le courant débité augmente avec l'accroissement de l'ensoleillement, et que le point de fonctionnement optimal varie d'une manière non linéaire. La tension aux bornes est légèrement influencée par l'ensoleillement.

1.6.4.2- Influence de la température

Pour un éclairement fixe, les caractéristiques *courant-tension*, varient avec la température de la cellule photovoltaïque (Figure 1.15).

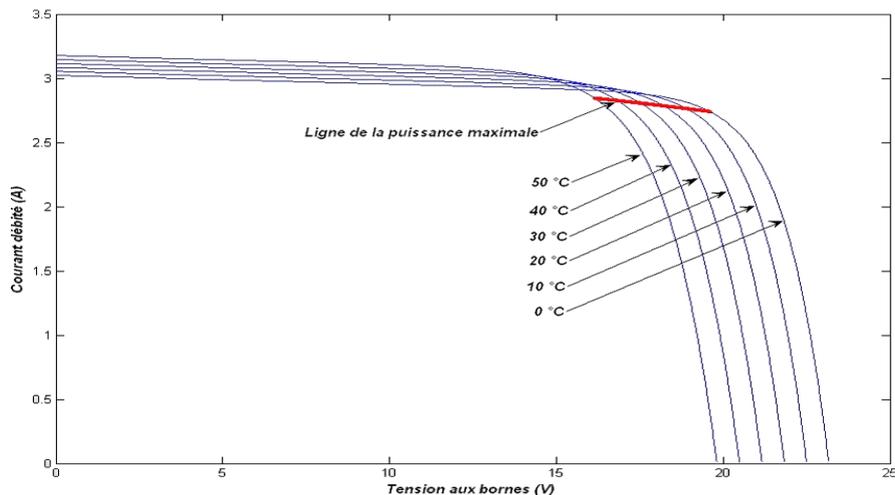


Figure 1.15: Influence de la température sur la caractéristique courant-tension [31]

La température a une influence considérable sur le comportement de la cellule et donc sur son rendement, cette influence se traduit principalement par la diminution de la tension générée, et une très légère augmentation de courant.

Suivant les modèles, ce comportement induit par degré une perte de 0.5 % du rendement par rapport au rendement maximum de la cellule, on comprendra donc l'intérêt d'avoir une ventilation correcte à l'arrière des panneaux [32]

1.6.5-Champ photovoltaïque

Lorsqu'on a besoin de plus de puissance, on utilise plusieurs modules, formant ce que l'on appelle un champ photovoltaïque orienté de manière à optimiser la quantité d'énergie solaire reçue, c'est-à-dire par exemple un toit incliné face au sud, dans l'hémisphère Nord (Figure 1.16).



Figure 1.16 : Champ photovoltaïque [32]

1.7-Avantages du système photovoltaïque

Grâce à ses nombreux avantages environnementaux et économiques, ainsi qu'à sa fiabilité avérée, le photovoltaïque s'affirme comme une source majeure d'électricité. [33]

- Son carburant est gratuit.
- L'énergie solaire photovoltaïque ne génère ni bruit, ni émissions nocives, ni gaz polluants.
- Les systèmes photovoltaïques sont très sûrs et d'une grande fiabilité.
- Les modules photovoltaïques sont recyclables
- L'énergie solaire photovoltaïque exige peu de maintenance.
- L'énergie solaire photovoltaïque fournit de l'électricité aux zones rurales les plus isolées.
- L'énergie solaire photovoltaïque peut être intégrée de manière esthétique dans les bâtiments.

- Le temps de retour énergétique d'un module diminue constamment.
- L'énergie solaire photovoltaïque permet la création de milliers d'emplois.
- L'énergie solaire photovoltaïque contribue à améliorer la sécurité de l'approvisionnement énergétique.

1.8-Inconvénients

- La fabrication du module photovoltaïque relève de la haute technologie et requiert des investissements d'un coût élevé.
- Le rendement réel de conversion d'un module est faible, de l'ordre de 10-15 % avec une limite théorique pour une cellule de 28%.
- Beaucoup d'appareils vendus dans le marché fonctionnent au 220 à 230V alternatif. Or, l'énergie issue du générateur PV est unidirectionnelle et de faible voltage (< 30V), elle doit donc être transformée en tension utile.
- Le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batteries) est nécessaire, le coût du générateur photovoltaïque est accru.
- Limites de charge et de décharge pour des batteries : de 30% à 80 [33]

1.9- Conclusion

Nous avons vu dans le chapitre 1, une autre source de production de l'énergie électrique plus avantageuse que les sources fossiles, c'est l'énergie photovoltaïque.

Pour cela, on a présenté le principe de fonctionnement du système photovoltaïque, les éléments de base de ce système à savoir la cellule solaire, ses caractéristiques et les technologies utilisés dans la conception de ces cellules.

On a également décrit les avantages et les inconvénients lors de la production de l'énergie électrique à base de l'énergie solaire photovoltaïque.

Au chapitre suivant, nous allons voir les convertisseurs DC-DC qui peuvent convertir la tension continue et de faible amplitude délivrée par les panneaux PV en une tension utile.

CHAPITRE 2 :

Etude des convertisseurs

DC-DC

2.1- Introduction

La tension délivrée par les panneaux d'un système PV est continue et de faible amplitude. Pour l'élever à une valeur supérieure on utilise un convertisseur appelé hacheur de type élévateur ou boost. En général, le convertisseur boost est le moyen le plus simple d'augmenter la tension d'une alimentation DC, et promet un rendement élevé.

2.2- Convertisseurs DC-DC

Un Convertisseur DC-DC est un dispositif électrique qui permet de transformer une tension continue de valeur fixe en une tension continue réglable (Figure 2.1). Il est constitué d'un interrupteur qui peut être un transistor (pour des faibles puissances) ou un thyristor (pour grande puissance). [34]

Un hacheur est un abaisseur de tension lorsque l'interrupteur est placé en série avec la charge. Il est élévateur de tension lorsque l'interrupteur est placé en parallèle avec la charge. [34]

Le branchement série est le plus simple et le plus utilisé. Selon le procédé de hachage (découpage), on peut faire varier la valeur moyenne de la tension de sortie de 3 manières :

- 1- Hacheur à fréquence fixe et largeur d'impulsion variable.
- 2- Hacheur à fréquence variable et à largeur d'impulsion fixe.
- 3- Hacheur à fréquence et à temps de conduction variable.

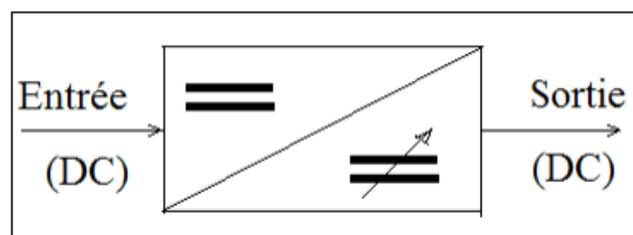


Figure 2.1 : Schéma de principe d'un hacheur. [35]

2.3- Méthodes d'étude des convertisseurs de puissance

Pour chaque convertisseur de puissance, la méthode d'étude consiste essentiellement :

- A présenter les formes d'ondes caractérisant le fonctionnement, éventuellement pour divers transfert de puissance.
- A déduire les relations entre les valeurs moyennes ou efficaces des courants et des tensions en entrée et en sortie du convertisseur.

- A envisager une commande de transfert de puissance.
- A prévoir les composants à utiliser selon le type de conversion et la puissance nominale souhaitée, il faut alors envisager les pertes dans ces composants.
- A prévoir et à mettre en place les protections des composants et de l'ensemble du convertisseur. [36]

2.4- 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. [37]

Les semi-conducteurs sont :

- Les diodes.
- Les interrupteurs commandables.

2.5- 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.

Nous trouvons aussi des hacheurs dans tous les équipements destinés à l'utilisation de l'énergie éolienne ou solaire. [38]

2.6- Différents types d'hacheurs

Il existe plusieurs types des convertisseurs DC- DC qui regroupent des convertisseurs à isolement galvanique entre l'entrée et la sortie et des convertisseurs qui présentent une borne commune entre l'entrée et la sortie.

Dans les convertisseurs à stockage d'énergie, trois types des convertisseurs statiques sont distinguées :

- Hacheur abaisseur « Buck converter »
- Hacheur élévateur « Boost converter »
- Hacheur abaisseur élévateur « Buck-Boost converter » [38]

2.6.1- Hacheur série (Buck)

Le hacheur série, hacheur abaisseur ou bien dévolteur est un appareil qui convertit une tension continue en une autre tension continue de plus faible valeur (Figure 2.2). La source d'entrée est de type tension continue et la charge de sortie continue de type source de courant. [39]

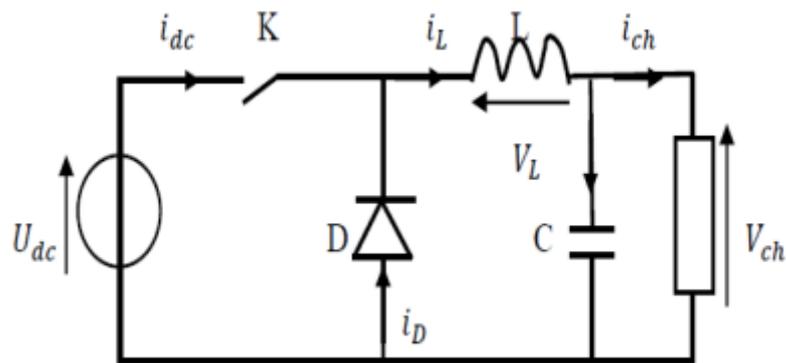


Figure 2.2: Hacheur série (abaisseur). [35]

2.6.2- Hacheur parallèle (Boost)

Le hacheur parallèle est appelé aussi hacheur élévateur, hacheur survolteur ou hacheur de type Boost (Figure 2.3). La source d'entrée est de type courant continu (inductance en série avec une source de tension) et la charge de sortie est de type tension continue (condensateur en parallèle avec la charge résistive). L'interrupteur « K » peut être remplacé par un transistor puisque le courant est toujours positif et que les commutations doivent être commandées (au blocage et à l'amorçage). Le commutateur peut être un transistor MOSFET ou un IGBT qui peut commuter sur deux positions, marche ou arrêt rapidement. [40]

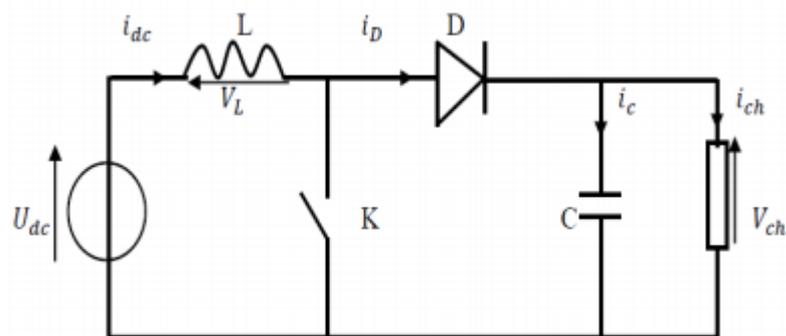


Figure 2.3 : Hacheur parallèle (élévateur). [35]

2.6.3- Hacheur abaisseur-élevateur (Buck-Boost)

Le hacheur abaisseur-élevateur est aussi appelé dévolteur-survolteur ou de type Buck-Boost (Figure 2.4). Le hacheur abaisseur-élevateur est un convertisseur indirect DC-DC à stockage inductif. La source d'entrée est de type tension continue (filtrage capacitif en parallèle avec une source de tension) et la charge de sortie continue de type source de tension (condensateur en parallèle avec la charge résistive). Le convertisseur dévolteur-survolteur combine les propriétés des deux convertisseurs précédents. [38]

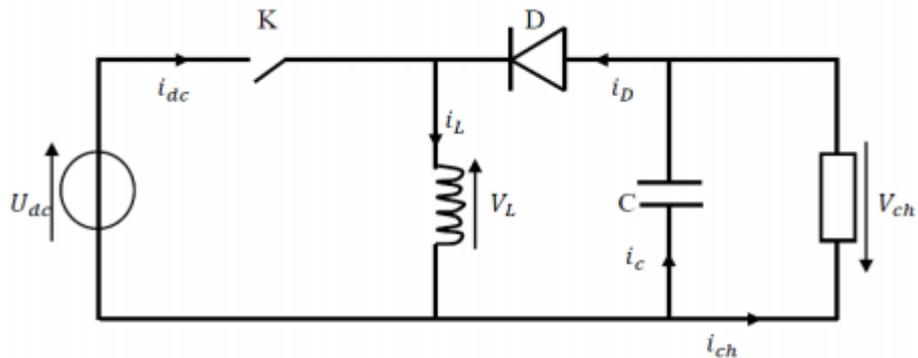


Figure 2.4 : Hacheur abaisseur-élevateur. [35]

2.7- Gain en tension des convertisseurs

Le tableau 2.1 représente les gains en tension des différents convertisseurs continu-continu.

Tableau 2.1 Gain en tension des convertisseurs. [41]

	BOOST	BUCK	BUCK-BOOST
Gain en tension	$\frac{1}{1 - \alpha}$	α	$\frac{\alpha}{1 - \alpha}$
Courant de source	Continu	discontinu	discontinu

2.8- Utilisation des hacheurs dans les systèmes PV

La topologie Buck est employée pour les faibles tensions. Dans les applications PV, le convertisseur Buck est habituellement employé comme chargeur de batteries et dans des systèmes de pompage de l'eau.

La topologie boost est employée pour augmenter la tension. Les systèmes de production de l'énergie emploient un convertisseur boost pour augmenter la tension de sortie au niveau de service avant l'étage de l'onduleur. Puis, il y a des topologies capables d'augmenter et de diminuer la tension telle que le buck-boost, le cuk, et le sepic. [42]

Le tableau 2.2 résume les principaux rapports de transformation en fonction du rapport cyclique pour les différentes structures de convertisseurs statiques avec et sans isolement galvanique. Où α désigne le rapport cyclique du convertisseur et K le rapport de transformation du transformateur d'isolement.

Tableau 2.2 : Rapports de transformation des principaux convertisseurs DC-DC. [41]

Convertisseurs	Rapport de transformation en fonction de α	Isolement galvanique
Buck	α	Non
Boost	$\frac{1}{1 - \alpha}$	Non
Buck-Boost	$\frac{-\alpha}{1 - \alpha}$	Non
Cuk	$\frac{\alpha}{1 - \alpha}$	Non
Sepic	$\frac{\alpha}{1 - \alpha}$	Non
Flyback	$k \cdot \frac{\alpha}{1 - \alpha}$	Oui
Push-pull	$K \cdot \alpha$	Oui
Forward	$k \cdot \alpha$	Oui

α : Rapport cyclique du convertisseur.

K : Rapport de transformation du transformateur d'isolement.

2.9- Éléments constitutifs de l'hacheur

2.9-1. Générateur

Le hacheur est lié à son entrée par une source de tension, cette dernière doit être constante quel que soit le courant débité. Pour cela il est important d'utiliser des sources comme :

- Piles ou batterie.
- Alimentation stabilisée.
- Source de courant (machine ou transformateur). [43]

2.9-2. Interrupteur commandable

Plusieurs critères sont pris en considérations afin de choisir l'interrupteur adéquat et d'éviter plusieurs inconvénients comme :

- La chute de tension directe lors de la fermeture.

- La tension maximale pouvant être bloquée en permanence et accidentellement.
- Le courant direct maximal pouvant conduire en permanence et accidentellement.
- La fréquence de commutation entre les états de fermeture et d'ouverture.
- Le procédé d'application de la commande (commande par courant ou par tension).
- Commandabilité à la fermeture et à l'ouverture. [44]

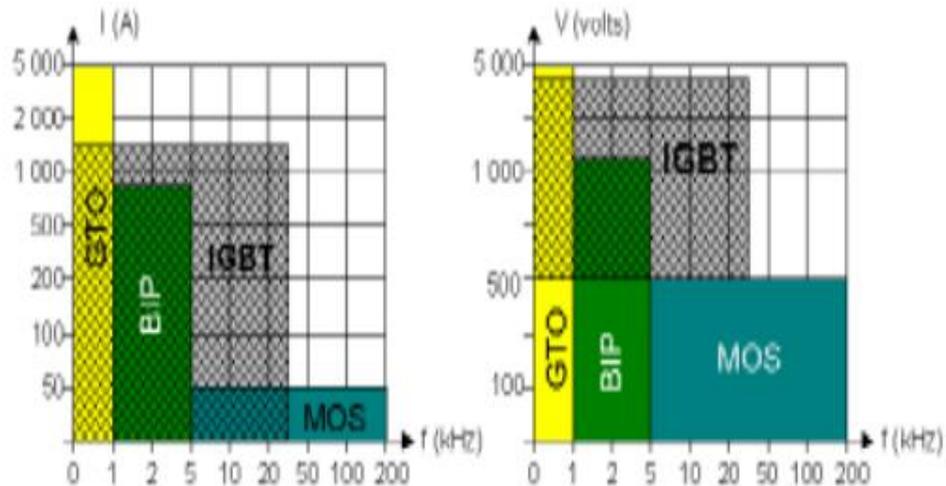


Figure 2.5: Zones approximatives (courant/ fréquence, tension/fréquence) d'utilisation des principaux semi-conducteurs de puissance. [35]

a-Transistor à effet de champ MOSFET « Metal Oxyd Silicon Field Effect Transistor » :

Cet interrupteur est commandable à la fermeture et à l'ouverture par une tension entre sa grille et sa source (Figure 2.6), il se caractérise par :

- Sa capacité de commutation des puissances faibles et moyennement faibles.
- Une grande rapidité du point de vue fréquence de commutation.
- Son isolation des deux parties commande grille et puissance Drain- source.
- Impédance d'entrée élevée.
- Comportement électrothermique positif. [44]

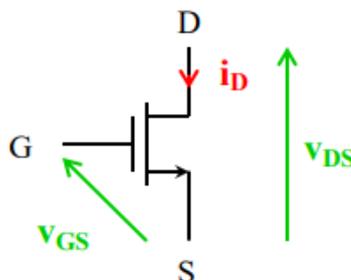


Figure 2.6 : Symbole d'un transistor MOSFET. [45]

b- Thyristor SCR « Silicon Controlled Rectifier » :

Le Thyristor SCR (Figure 2.7) est commandable seulement à la fermeture par un courant de la gâchette. Cet interrupteur peut supporter de très grandes puissances et des fréquences relativement faibles de commutation. Son majeur inconvénient réside en son processus de blocage OFF qui demande un dispositif très couteux et complexe à la fois. [44]

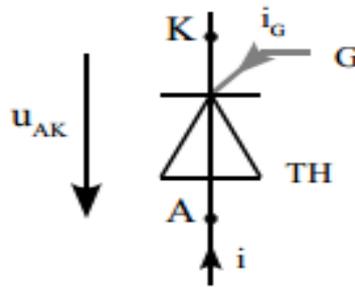


Figure 2.7 : Symbole d'un Thyristor SCR. [45]

c- Transistor bipolaire BJT « Bipolar Junction Transistor » :

C'est un interrupteur (Figure 2.8) commandable à l'ouverture et à la fermeture par un courant à la base. Il peut supporter de moyennes puissances et de moyennes fréquences de commutation. [44]



Figure 2.8 : Symbole d'un Transistor BJT. [45]

d- Transistor bipolaire à grille isolée IGBT « Insulated Gate Bipolar Transistor » :

Le transistor bipolaire (Figure 2.9) est commandable à l'ouverture et la fermeture par une tension entre sa grille et son émetteur, il combine les avantages des BJT et des MOSFET. [46]

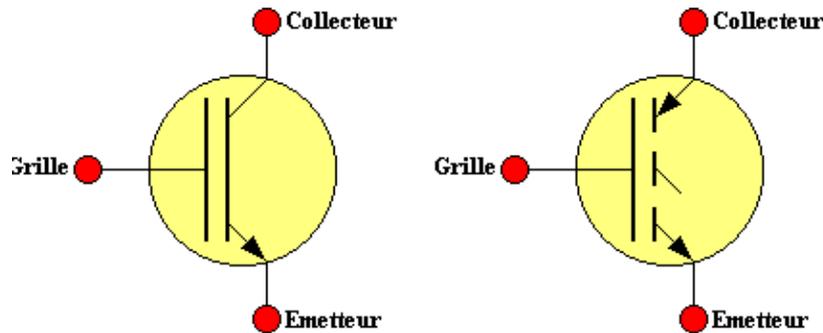


Figure 2.9 : Symbole d'un transistor IGBT. [46]

Tableau 2.3 : Tableau récapitulatif des niveaux de puissances et des fréquences des semi-conducteurs. [46]

Semi- conducteur	Niveau de puissance pouvant manipuler	Vitesse de commutation « fréquence »
BJT	Moyen	Moyen
MOSFET	Faible	Rapide
IGBT	Moyen	Moyen

2.10- Principe de fonctionnement du hacheur Boost

Le fonctionnement d'un convertisseur Boost peut être divisé en deux phases différentes selon l'état de l'interrupteur S (voir figure 2.10) :

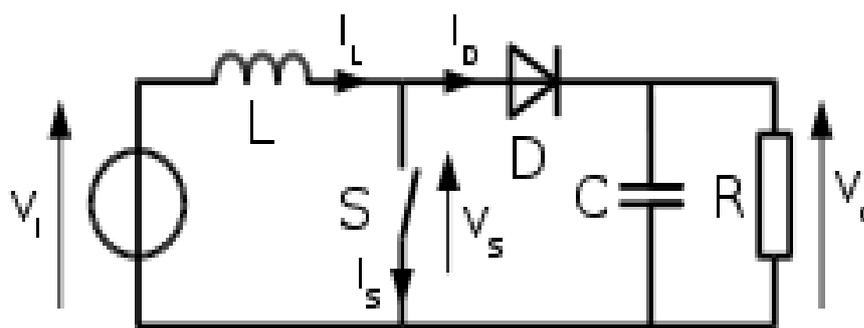
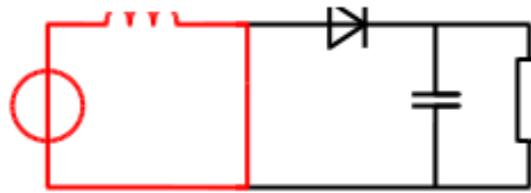


Figure 2.10: Schéma de base d'un convertisseur Boost [35]

- Phase d'accumulation d'énergie : quand l'interrupteur S (voir figure 2.11) est fermé (état passant), cela entraîne l'augmentation du courant dans l'inductance et par conséquent le stockage d'une quantité d'énergie sous forme magnétique. La diode D est alors bloquée et la charge est alors déconnectée de l'alimentation. [47]

interrupteur passant



interrupteur bloqué

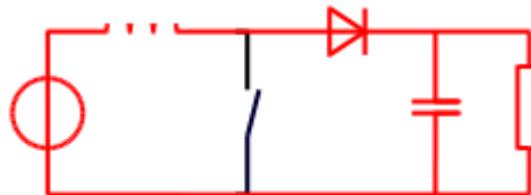


Figure 2.11 : Configurations d'un convertisseur Boost suivant l'état de l'interrupteur S [47]

- Quand l'interrupteur est ouvert, l'inductance se trouve alors en série avec le générateur et sa f.e.m s'additionne à celle du générateur (effet survolteur). Le courant traversant l'inductance traverse ensuite la diode D, le condensateur C et la charge R. Il en résulte un transfert de l'énergie accumulée dans l'inductance vers la capacité. [47]

2.11- Structure de l'hacheur élévateur

2.11.1- Cellule de commutation

La structure du hacheur élévateur (boost) est constituée d'une seule cellule de commutation, comme représenté en figure 2.12.

Par les mécanismes de mise en conduction et de blocage des deux interrupteurs, deux états sont possibles, ainsi que cela est illustré en figure 2.13.

K_1 passant et K_2 bloqué, les conditions de fonctionnement sont les suivantes : [39]

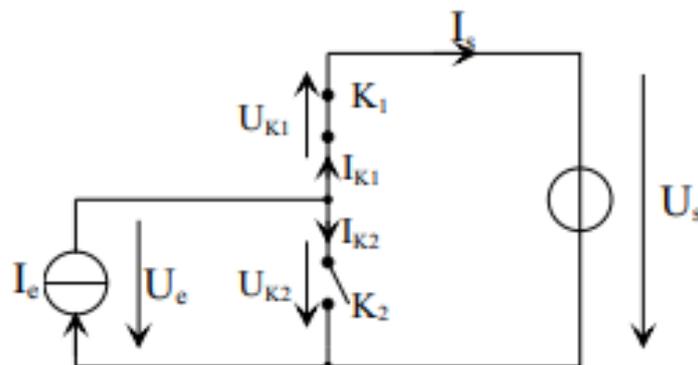


Figure 2.12 : Structure du hacheur élévateur [39]

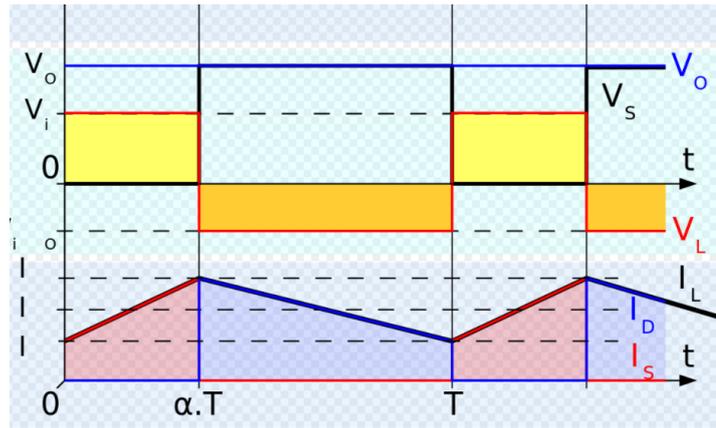


Figure 2.13 : Grandeurs électriques caractéristiques du boost [39]

$$\begin{cases} U_e = U_s \\ I_s = I_e \end{cases} \quad (2.1)$$

K_1 bloqué et K_2 passant, les conditions de fonctionnement sont les suivantes :

$$\begin{cases} U_e = 0 \\ I_s = 0 \end{cases} \quad (2.2)$$

2.11.2- Caractéristique statique des interrupteurs et commutation

Nous considérons des sources de courant et de tension qui sont respectivement unidirectionnelles en tension et en courant. En regard de la représentation Figure 2.12, nous pouvons écrire :

$$\begin{cases} -U_{K1} + U_{K2} = U_s \\ I_{K1} + I_{K2} = I_e \end{cases} \quad (2.3)$$

Suivant les états respectifs des deux interrupteurs, on peut donc écrire :

K_1 passant et K_2 bloqué

K_1 bloqué et K_2 passant

$$\begin{cases} U_{K2} = U_s \\ I_{K1} = I_e \end{cases} \quad \begin{cases} U_{K1} = -U_s \\ I_{K2} = I_e \end{cases} \quad (2.4)$$

Nous démontrons ainsi que deux segments suffisent pour les caractéristiques statiques des interrupteurs K_1 et K_2 , ainsi que nous le représentons en figure 2.14.

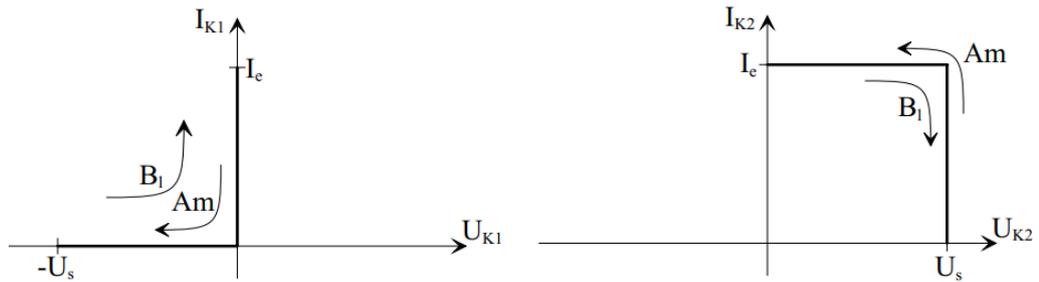


Figure 2.14 : Caractéristiques statiques [39]

Nous donnons également en figure 1.16 les mécanismes de commutation des interrupteurs :

- L'amorçage de K_2 : le sens de parcours des trajectoires suivies dans les plans (U_{Ki}, I_{Ki}) est défini par les flèches notées A_m . Lorsque K_2 est bloqué, celui-ci supporte la tension U_s , alors que K_1 , à l'état passant, conduit le courant I_e . [48]

- L'amorçage de K_2 ne sera effectif que lorsque l'interrupteur K_1 supportera une tension $-U_s$. Il est impossible, dans le plan (U_{K1}, I_{K1}) , d'obtenir une trajectoire qui traverse le quadrant $U_{K1}, I_{K1} < 0$. Le blocage de K_1 ne peut donc se faire qu'en longeant les axes de la caractéristique statique de K_1 . Ceci définit une commutation spontanée : annulation du courant dans K_1 , puis application d'une tension inverse (négative) [48].

Le processus de commutation est donc le suivant :

- commutation du courant de K_1 vers K_2 . Pendant cette phase, la tension reste nulle aux bornes de K_1 , et vaut toujours U_s aux bornes de K_2 .
- la tension aux bornes de K_2 s'effondre, alors qu'une tension inverse s'établit aux bornes de K_1 .

- Au contraire de K_1 , la commutation de K_2 traverse le quadrant $U_{K2}, I_{K2} > 0$, ce qui est caractéristique d'une commutation commandée. Il s'agit donc d'un amorçage commandé de K_2 qui entraîne le blocage spontané de K_1 .

- blocage de K_2 : le sens de parcours des trajectoires suivies dans les plans (U_{Ki}, I_{Ki}) est défini par les flèches notées B_1 . Lorsque K_2 est amorcé, celui-ci conduit le courant I_e , alors que K_1 , à l'état bloqué, supporte une tension $-U_s$.

- Le blocage de K_2 ne sera effectif que lorsque l'interrupteur K_1 assumera l'intégralité du courant I_e . Il est impossible, dans le plan (U_{K1}, I_{K1}) , d'obtenir une trajectoire qui traverse le quadrant $U_{K1}, I_{K1} < 0$. L'amorçage de K_1 ne peut donc se faire qu'en longeant les axes de la caractéristique statique de K_1 . Ceci définit une commutation spontanée : annulation de la tension inverse aux bornes de K_1 , puis établissement du courant.

- Le processus de commutation est donc le suivant :

- la tension aux bornes de K_1 s'annule, alors qu'une tension aux bornes de K_2 s'établit.

- commutation du courant de K2 vers K1, pendant cette phase, la tension reste nulle aux bornes de K1, et vaut toujours U_s aux bornes de K2. [48]

- Lors de cette phase, la commutation de K2 traverse le quadrant $U_{K2}, I_{K2} > 0$, ce qui est caractéristique d'une commutation commandée. Il s'agit donc d'un blocage commandé de K2 qui entraîne l'amorçage spontané de K1.

2.11.3- Synthèse

Outre la définition de la structure de base d'un hacheur élévateur « un quadrant », nous venons de mettre en évidence deux points importants. Le premier est relatif à la nature des commutations au sein de la cellule constituée par K1 et K2 : l'amorçage et le blocage commandés de K2 entraînent respectivement le blocage et l'amorçage spontanés de K1. Nous venons ainsi de définir une structure apte à fonctionner en commutation naturelle.

Le second est relatif aux natures des interrupteurs K1 et K2 :

- Interrupteurs K1 : cet interrupteur doit supporter une tension inverse, et doit pouvoir conduire un courant positif. En outre, son amorçage et son blocage peuvent être spontanés. Cet interrupteur sera donc de type diode.

- Interrupteur K2 : cet interrupteur doit supporter une tension positive, et doit pouvoir conduire un courant positif. En outre, toutes les commutations de cet interrupteur doivent être commandées. Cet interrupteur pourra donc être de type transistor (bipolaire, MOS, IGBT ou GTO). [48]

2.11.4- Relations fondamentales

Afin de définir les relations fondamentales qui régissent le fonctionnement d'un hacheur élévateur, nous nous référons au schéma de la Figure 2.15.

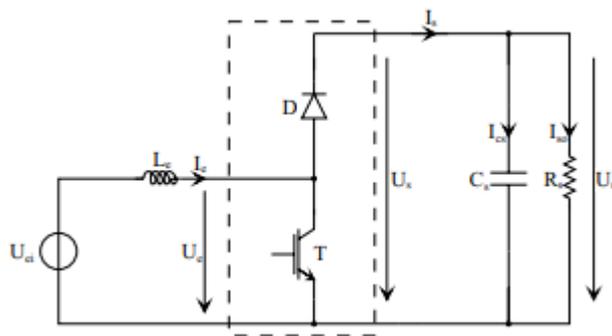


Figure 2.15 : Hacheur élévateur et sa charge [39]

Nous allons simplement préciser les natures des sources de courant et de tension, sachant que dans le présent contexte, nous nous attachons au transfert d'énergie de la source de courant vers la source de tension : [48]

– source de courant : cette source fournit de la puissance. Nous avons donc choisi de la représenter par un générateur de tension U_{ei} (type batterie par exemple), en série duquel nous avons placé une inductance pour conférer à l'ensemble le caractère source de courant requis. La tension imposée au convertisseur par cette source est U_e .

– source de tension : cette source est la charge. Elle comprend une résistance (charge continue type), en parallèle de laquelle on place un condensateur pour conférer à l'ensemble le caractère source de tension requis.

Ce type de source de courant est en effet la charge « type » d'un hacheur élévateur. Les formes d'ondes des courants et tensions dans le convertisseur, ainsi que dans sa charge sont données à titre d'illustration en Figure. 1.18. [39]

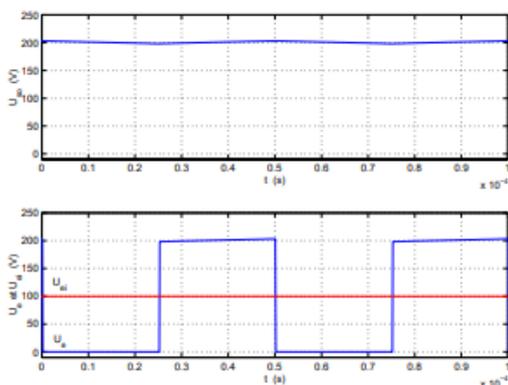


Fig. 2.16.a : Grandeurs caractéristiques (Tensions) [39]

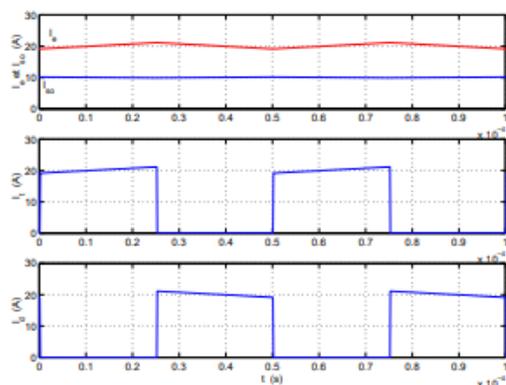


Fig. 2.16.b : Grandeurs caractéristiques (Courants) [39]

Suivant les états respectifs des interrupteurs T et D, la tension U_e vaut U_{so} (200 V) ou bien 0V, et est par conséquent constituée de créneaux. On notera le rapport 2 entre la tension U_{ei} et la tension U_{so} , ce qui justifie le qualificatif « élévateur » de ce convertisseur (Figure 2.16.a).

– le courant i_e dans l'inductance L_e : Ce courant est constitué d'une valeur moyenne, ainsi que d'une ondulation autour de cette valeur moyenne (Figure 2.16.b).

– le courant i_{so} dans la résistance de charge R_s , dont on peut considérer l'ondulation résiduelle comme parfaitement négligeable devant la valeur moyenne. Le condensateur C_s a en effet été dimensionné pour cela, suivant un critère que nous définirons ultérieurement.

Nous noterons également le rapport 2 existant entre la valeur moyenne de i_e et i_{so} .

– le courant dans le transistor T :

Lorsque celui-ci est passant, alors $i_t = i_e$.

Cette phase correspond à la phase de croissance du courant dans l'inductance L_e .

– le courant dans la diode D : lorsque celle-ci est passante, alors $i_e = i_d = i_{so}$. Cette phase correspond à la phase de décroissance de courant dans l'inductance L_e .

Dans le cadre du fonctionnement d'un hacheur élévateur tel que nous l'avons illustré, nous pratiquerons les hypothèses de travail suivantes afin de déterminer les relations fondamentales qui en régissent le fonctionnement :

– Nous considérons la période de commutation T des interrupteurs largement inférieure à la période T_o de résonance du circuit constitué par L_e et C_s lorsque le transistor T est passant.

$$T \ll T_o \quad (2.5)$$

- Nous considérons que l'ondulation iso du courant dans la résistance R_s est négligeable devant I_{so} .

- en régime permanent, la composante moyenne I_{cs} du courant dans le condensateur C_s est nulle. Par conséquent, et compte tenu des hypothèses précédentes : $I_s = I_{so}$ et $I_{cs} = i_s$.

- Nous considérons que les ondulations de la tension U_{so} sont négligeables devant sa valeur moyenne. Ainsi, pour la tension de sortie, nous considèrerons que $U_s = U_{so} = \ll U_s \gg$.

Nous devons souligner que ces hypothèses de travail ne sont quasiment pas restrictives, car le dimensionnement des éléments de ce convertisseur permet d'agir dans le sens du respect de ces hypothèses, qui sont souvent des critères de dimensionnement.

Valeur moyenne de U_s : Afin de déterminer l'expression de la valeur moyenne de la tension en sortie du hacheur élévateur, nous nous référons au schéma Figure 2.17.

Nous avons représenté la tension U_l aux bornes de l'inductance, ainsi que les variations du courant i_l qui la traverse.

Nous définissons D le rapport cyclique, comme le rapport entre la durée d'amorçage du transistor et la période de commutation du convertisseur T . La tension U_l dépend de la phase de fonctionnement du convertisseur considérée :

- pendant DT : $U_l = U_{ei}$,
- pendant $(1 - D)T$: $U_l = U_{ei} - U_{so}$

Nous pouvons ainsi calculer l'expression de la valeur moyenne de U_l : [39]

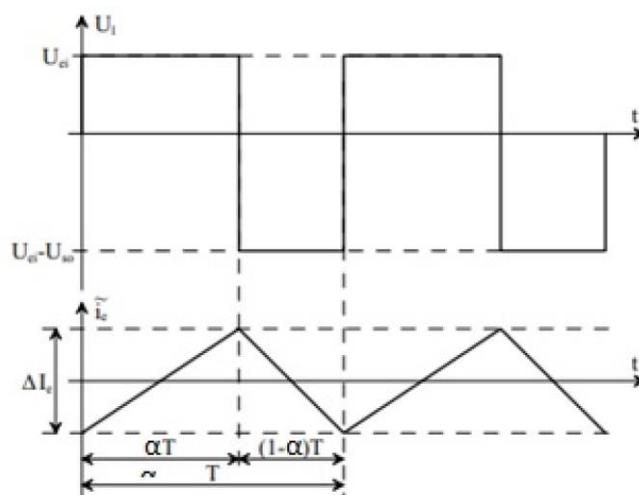


Figure 2.17 : Tension U_l aux bornes de l'inductance [39]

2.12- commande du convertisseur DC-DC

2.12.1- Commande MLI :

Dans le but d'avoir une meilleure qualité de tension de sortie d'un hacheur, il est important de commander ces interrupteurs. Cela se fait en utilisant une des techniques de commande qui existe. Le choix de cette dernière dépend essentiellement du type d'application auquel l'appareil est désigné.

Dans le monde des variateurs de la tension d'alimentation, la technique la plus utilisée est la commande par modulation de largeur d'impulsion « MLI », où Pulse Width Modulation « PWM » (Figure 2.18). [49]

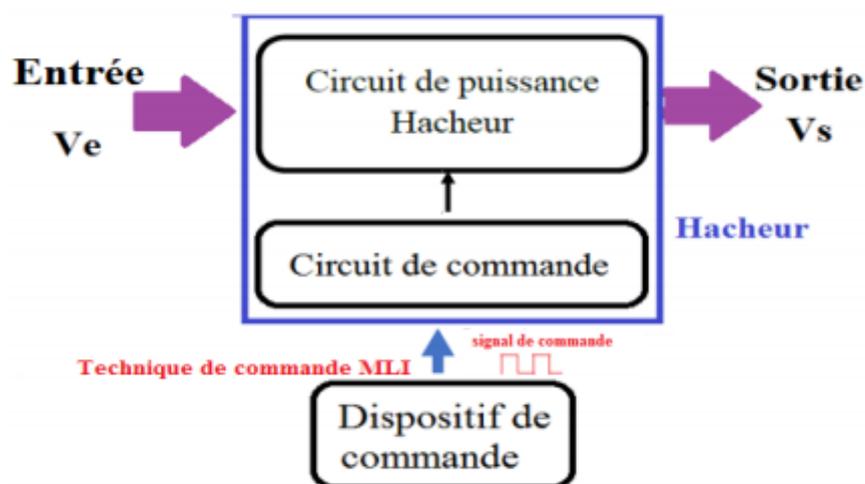


Figure 2.18 : Structure de la commande d'un hacheur. [49]

2.12.1.a- Génération d'une MLI :

Cette technologie se manifeste avec un signal à périodicité constante et un rapport cyclique réglable. Elle est largement utilisée dans la famille des variateurs de fréquence comme :

- Les cyclo-convertisseurs.
- Les onduleurs.
- Les redresseurs.
- Les hacheurs.

Cette modulation a connu un développement considérable depuis plusieurs années tout en permettant d'ouvrir une large étendue d'application dans les systèmes de commande ainsi que d'autres fonctions. Grâce à cette technique la réalisation des circuits de commande des hacheurs est devenue souple et rentable. [49]

2.12.1.b- Principe de la commande MLI :

Cette technique peut être vue comme une suite du principe de la commande par découpage où la durée des impulsions n'est pas régulière mais cherche à éliminer le maximum

d'harmoniques de rangs faibles qui ne sont pas faciles à filtrer. Elle se base essentiellement sur le découpage d'une pleine onde rectangulaire, sa tension de sortie représente une succession de créneau d'amplitude qui est égale à la tension continue d'alimentation avec une largeur variable. [50]

La production d'un signal MLI se fait généralement par la technique de comparaison entre deux signaux qui sont :

- Le signal de référence qui est un signal continu.
- Le signal de la porteuse qui représente la cadence de la commutation des interrupteurs statiques du convertisseur.
- Le signal de la porteuse est un signal de haute fréquence en le comparant avec le signal de référence.
- L'intersection de ces deux signaux représente les instants de commutation des interrupteurs comme l'indique la Figure 2.20.

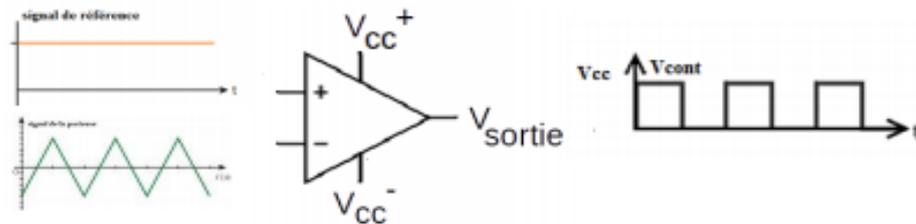


Figure 2.19 : Réalisation d'un signal MLI. [50]

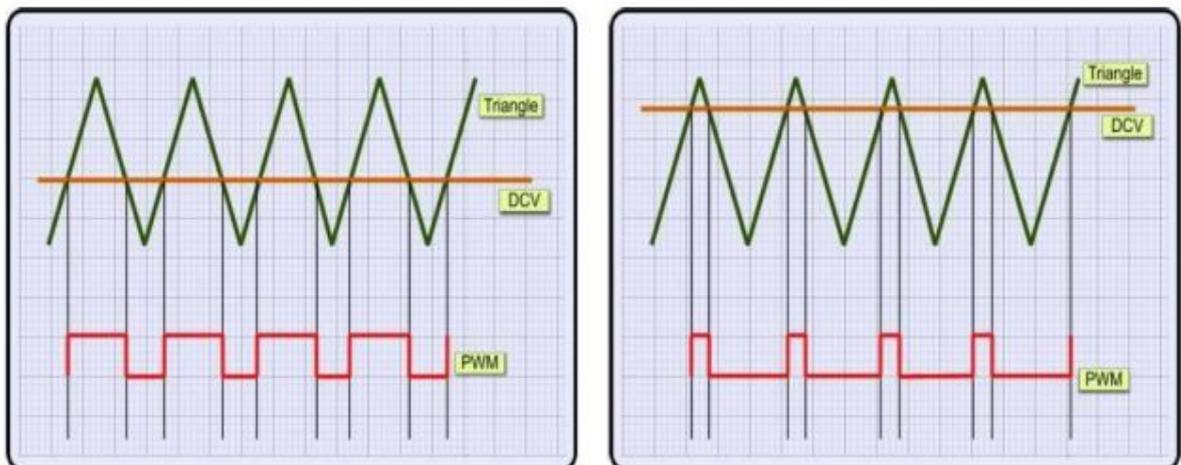


Figure 2.20 : Allure d'un signal MLI. [50]

Lors de l'intersection des deux signaux de la référence et de la porteuse :

- En sens croissant, la commande ouvre le Transistor.
- En sens décroissant, la commande ferme le Transistor.

La comparaison des deux signaux se fait à partir d'un amplificateur opérationnel. [50]

2.12.1.c- Principaux avantages d'une MLI :

- Une bonne neutralisation d'harmonique par rapport aux ondes carrée ou en un seul créneau.
- Elle facilite le filtrage en repoussant les harmoniques de la tension de sortie vers des fréquences élevées.
- Permet la variation des valeurs du fondamental de la tension de sortie.
- Permet l'alimentation de plusieurs ensembles onduleurs, moteurs asynchrones à partir d'une même source continue. [51]

2.12.2- La commande MPPT :

Afin d'éviter une fluctuation du point de puissance maximale d'un générateur photovoltaïque qui peut être entraînée par les variations climatiques, il est préférable d'intercaler un hacheur boost commandé entre le générateur PV et le récepteur. Ce convertisseur va permettre de poursuivre le point de puissance maximale. Cette commande est connue sous le nom de la MPPT (Maximum Power Point Tracking) (Figure 2.21), elle est associée à un étage d'adaptation permettant de faire fonctionner un générateur électrique non-linéaire de façon à produire en permanence le maximum de sa puissance et c'est le cas d'un générateur photovoltaïque qui a une production aléatoire, l'opération s'effectuera quelque soient les conditions météorologiques (température et irradiation) et quelque soit la tension de la batterie . [52]

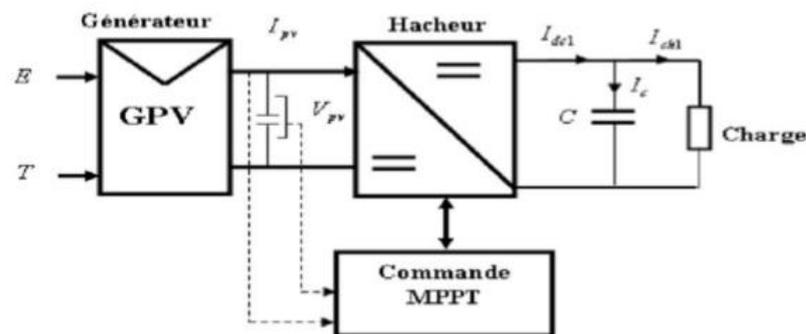


Figure 2.21: Schéma synoptique d'un système PV commandé par une MPPT. [52]

Dans la partie contrôle du système, les convertisseurs DC/DC sont largement utilisés grâce à leur particularité de pouvoir les contrôler par leurs rapport cyclique en utilisant un signal MLI.

La non-linéarité de la caractéristique I-V, exige le fonctionnement en permanence sur le point à puissance maximale du générateur à chaque changement de température où d'éclairement. A ce niveau le hacheur capte la puissance électrique absorbée selon une période d'échantillonnage en incrémentant où décrémentant le rapport cyclique α dans le but d'éliminer le gradient de la puissance P , ainsi : [52]

$$\frac{\delta P}{\delta \alpha} = 0 \tag{2.6}$$

2.13- Conclusion

Dans ce chapitre nous avons donné un aperçu général sur les convertisseurs DC-DC nommés « hacheurs », leurs domaines d'utilisation, leurs différents types ainsi que leurs éléments constitutifs. Nous nous sommes intéressés à l'hacheur Boost en particulier où nous avons présenté un fonctionnement détaillé de ce dernier ainsi que les différentes commandes appropriées.

Le chapitre suivant s'intéressera à la partie simulation de l'hacheur boost sous matlab-simulink.

CHAPITRE 3 :

Simulation et interprétation

des résultats

3.1- Introduction

L'utilisation de convertisseurs statiques au sein des réseaux est de plus en plus répandue notamment pour connecter les sources de production décentralisées renouvelables.

La performance des circuits est un facteur essentiel dans la conception d'un système. Chaque composant contribue à la performance globale du système. Dans le domaine de l'électronique de puissance, nous devons être très concentrés sur l'évaluation du système. Non seulement les composants, mais aussi les capacités de jonction et le bruit affectent également les formes d'onde de sortie. La simulation de circuits devient rapidement une alternative au prototypage et est désormais considérée comme une aide optionnelle à l'apprentissage de l'électronique de puissance. La simulation est un art qui consiste à convertir une conception de circuit en un modèle logiciel, puis à le tester à l'aide de stimuli d'entrée et d'une surveillance de sortie. Il peut être utilisé pour évaluer la performance de nouveaux circuits pour l'amélioration des connaissances. [53]

3.2- Simulink Matlab

Le logiciel MATLAB est un logiciel de calcul matriciel à syntaxe simple ; peut être considéré comme un langage de programmation adapté pour les problèmes scientifiques, grâce à ses fonctions spécialisées. C'est un interpréteur, car ses instructions sont interprétées et exécutées ligne par ligne; possède des bonnes capacités graphiques pour présenter des résultats ou pour créer des applications. [54]

- **Représentation de la tâche Simulink**

C'est l'extension graphique de MATLAB permettant de travailler avec des schémas en blocs, pour modéliser et simuler des systèmes ; la relation Matlab-Simulink est représentée dans la figure 3.1 suivante :

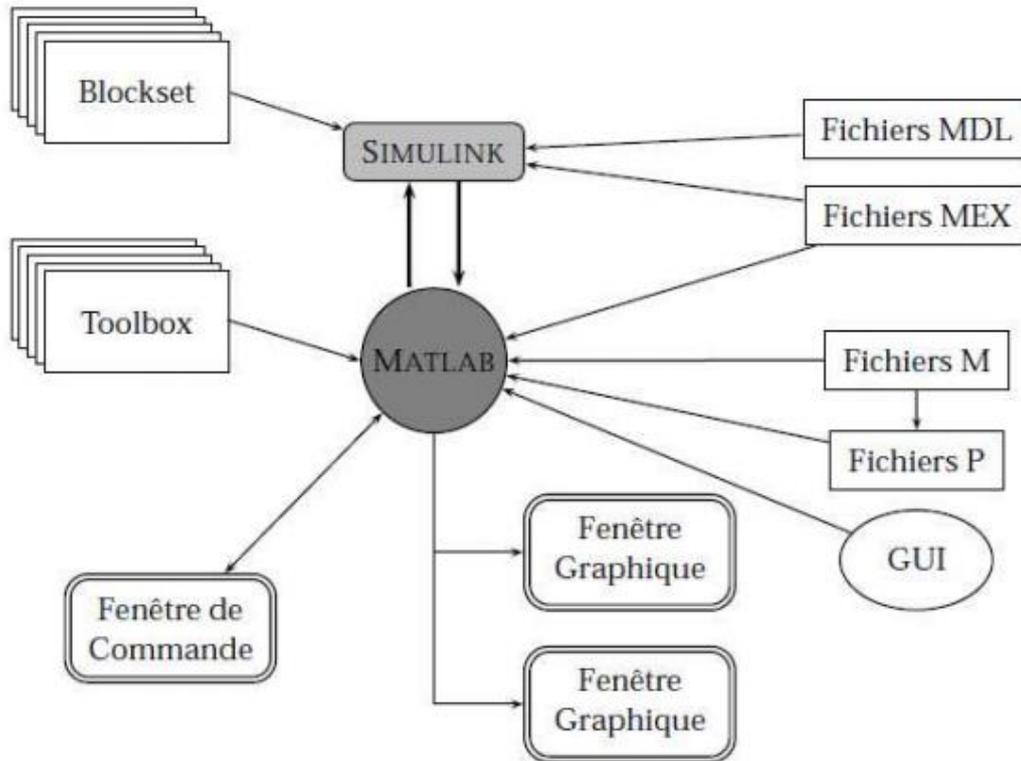


Figure 3.1 : Représentation des tâches au niveau de Matlab [54]

3.3- Principe de fonctionnement du hacheur boost (parallèle, élévateur)

Une inductance L est placée en série entre la tension continue d'entrée V_e (fournie par une batterie ou une pile) et un transistor Q fonctionnant en commutation (figure 3.2). Lorsque Q est passant, le courant I_L augmente linéairement et une énergie E est stockée dans L . La diode D est bloquée. Puis, au blocage du transistor, l'inductance se décharge linéairement dans le condensateur et la charge R (supposée résistive) à travers la diode. Cette décharge n'est possible que si $V_s > V_e$. Le réseau D, C, R fonctionnant comme une "détection crête", la tension de sortie V_s est quasiment continue.

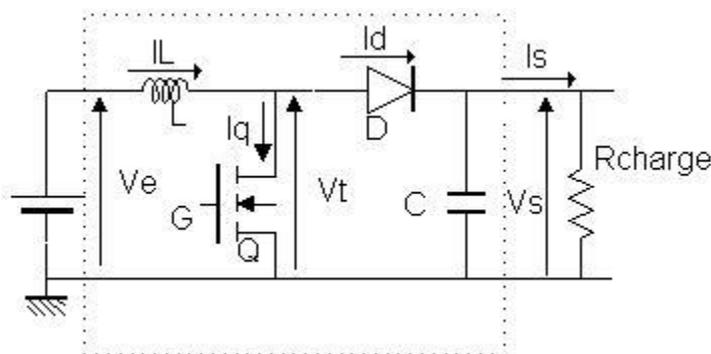


Figure 3.2 : schéma de principe du hacheur boost [35]

Selon l'état de l'interrupteur, on peut distinguer deux phases de fonctionnement :

- La phase active lorsque l'interrupteur Q est fermé et la diode D est ouverte. Durant cette séquence, le courant traversant l'inductance L va augmenter linéairement et une énergie est stockée dans L. Le condensateur C fournit une énergie à la charge R.

- La phase de roue libre lorsque l'interrupteur Q est ouvert, la diode D est fermée.

Durant cette séquence, l'énergie emmagasinée dans l'inductance L est restituée au condensateur et à la charge R. Lors de cette phase, le fait que l'inductance L soit en série avec la source de tension d'entrée permet d'obtenir un montage boost (survolteur). La figure 3.3 présente l'allure du signal de commande appliqué à l'interrupteur Q. C'est un signal rectangulaire de fréquence f dont la durée est à l'état haut (durée de conduction de l'interrupteur Q, notée T_{ON}) est ajustée par le paramètre α . Ce paramètre, appelé rapport cyclique, est défini comme étant le rapport entre la durée de conduction de l'interrupteur Q et la période de découpage T de celui-ci :

$$\alpha = T_{ON} / T \tag{3.1}$$

$$\text{Et on a : } T = T_{ON} + T_{OFF}, \tag{3.2}$$

où T_{OFF} correspond à la durée de blocage de l'interrupteur Q.

La durée de conduction T est comprise entre 0 et 1 donc, le rapport cyclique est compris entre 0 et 1. On peut exprimer la durée de conduction et de blocage de l'interrupteur Q en fonction de α et T :

- Durée de conduction : $T_{ON} = \alpha T$ **(3.3)**

- Durée de blocage : $T_{OFF} = (1 - \alpha) T$ **(3.4)**

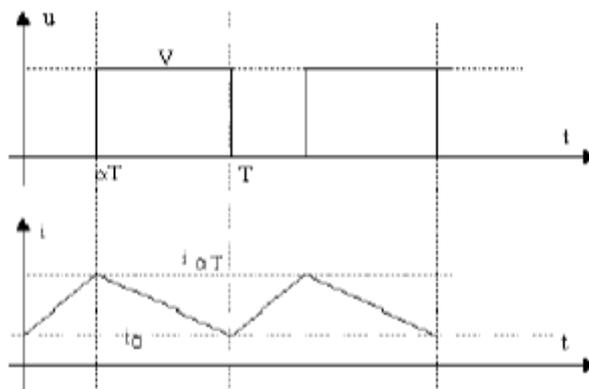


Figure 3.3 : Allure du signal de commande appliqué à l'interrupteur Q. [35]

Donc nous pouvons calculer le rapport cyclique comme suit :

$$\alpha = T_{ON} / T = (T_{ON} / T_{ON} + T_{OFF}) \quad (3.5)$$

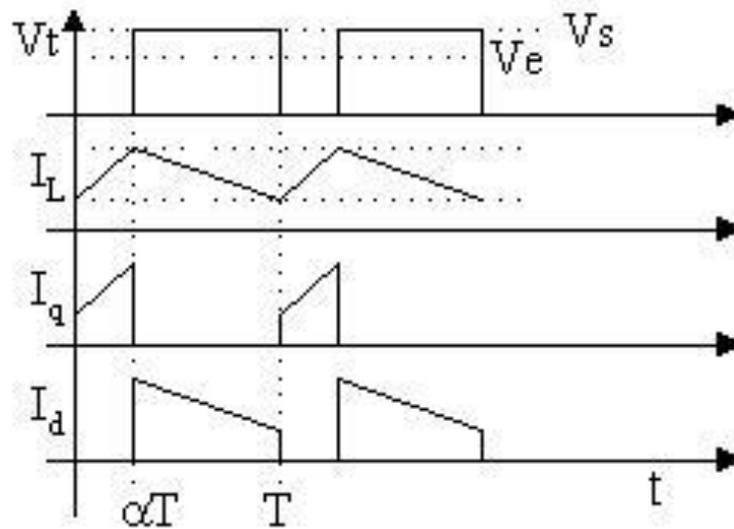


Figure 3.4 : Différents allures d'onde. [35]

La condition $V_{L\text{moyen}} = 0$ en régime permanent, impose :

$$V_s = V_e / (1 - \alpha) \quad (3.6)$$

Avec $0 < \alpha < 1$, le montage est bien élévateur de tension.

Comme pour tout système, le rendement est inférieur à 1. Donc, la puissance fournie à la charge sera inférieure ou au mieux égale, à la puissance absorbée à l'entrée du convertisseur, soit : $V_s \cdot I_s < V_e \cdot I_{L\text{Moyen}}$ (3.7)

3.4- Modes de Fonctionnement

Nous distinguons trois différents modes de fonctionnement :

3.4.a- Discontinu

Le mode de fonctionnement est appelé discontinu lorsque le courant dans l'inductance a le temps de s'annuler au cours d'un cycle (Figure 3.5).

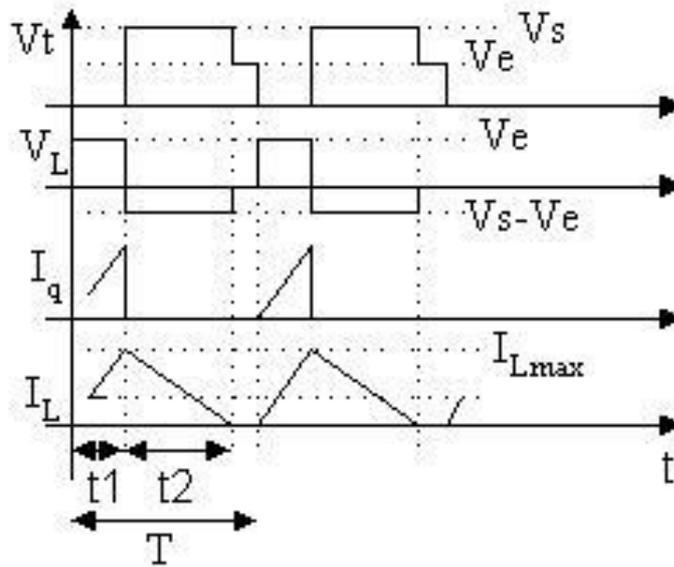


Figure 3.5 : Différents allures d'onde en fonctionnement discontinu [35]

Nous avons : $I_{L\text{Moyen}} =$

$$\frac{1}{2} I_{L\text{max}} \frac{t1 + t2}{T} \quad (3.8)$$

Et

$$I_{L\text{max}} = \frac{V_e}{L} t1 \quad (3.9)$$

La tension $V_{L\text{moyen}}$ aux bornes de l'inductance étant nulle on a également :

$$V_e \cdot t1 = (V_s - V_e) \cdot t2 \quad (3.10)$$

En supposant la conservation de la puissance parfaite, il vient de (7),(9),(10) la relation entre I_s et V_s :

$$I_s = \frac{V_e^2}{2LF} \cdot \frac{\alpha^2}{(V_s - V_e)} \quad (3.11)$$

Avec : $t1 = \alpha T$

3.4.b- Continu

Dans ce mode de fonctionnement, le courant dans l'inductance ne s'annule jamais (Figure 3.6).

La tension $V_{L\text{moyen}}$ aux bornes de l'inductance étant nulle, il vient :

$$(V_s - V_e) (1 - \alpha) = \alpha \cdot V_e \quad (3.12)$$

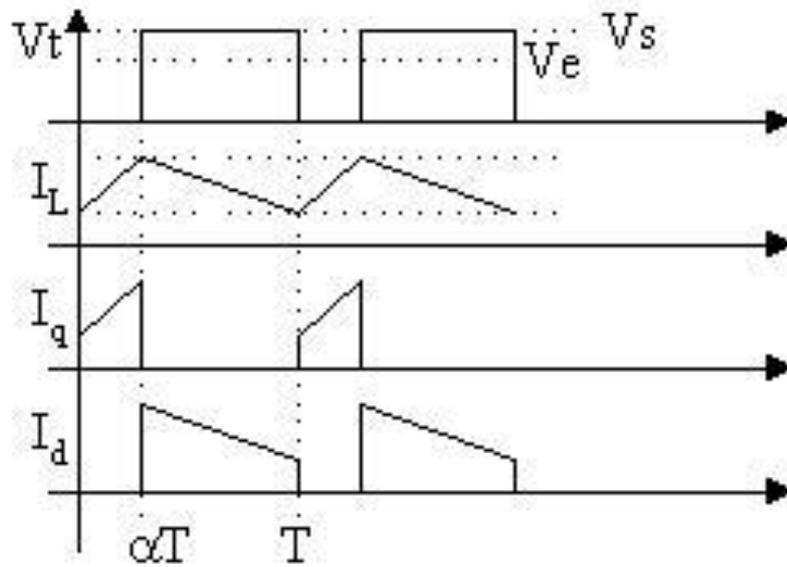


Figure 3.6 : Différents allures d'onde en fonctionnement continu [35]

On a alors $V_s = V_e / (1 - \alpha)$, quelque soit I_s .

3.4.c- Critique

Ce mode marque la frontière entre les régimes discontinu et continu. Les relations (3.6) et (3.11) sont alors valables simultanément et il vient :

$$I_s = \frac{V_e^2}{2LF} \cdot \frac{(V_s - V_e)}{V_s^2} \quad (3.13)$$

Notons encore que l'équation (3.13) peut encore se mettre sous la forme :

$$I_s = \frac{1 \cdot T}{2L} \cdot \alpha \cdot (1 - \alpha)^2 \cdot V_s \quad (3.14)$$

3.5- Caractéristiques de sortie

3.5.a- Caractéristique de sortie statique

On peut tracer la caractéristique de sortie $I_s = f(V_s)$ (Figure 3.7) à partir de l'analyse des modes de fonctionnement qui a précédé :

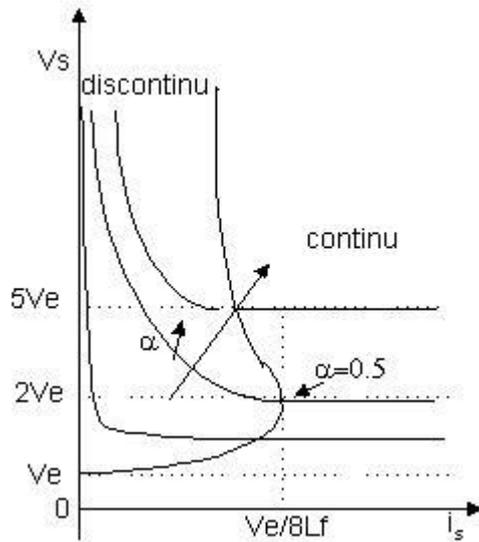


Figure 3.7 : Caractéristique de sortie $I_s = f(V_s)$. [35]

On voit donc qu'il est nécessaire :

- 1) de réguler le montage surtout à faible charge,
- 2) de privilégier le mode continu car le circuit se comporte alors comme une vraie source de tension.

3.5.b-Ondulation résiduelle

On suppose que le système travaille en mode continu, et en négligeant DVs devant V_s , on obtient l'ondulation de courant dans l'inductance(Figure3.8):

$$\Delta I_L = \frac{V_e \cdot \alpha \cdot T}{L} \quad (3.15)$$

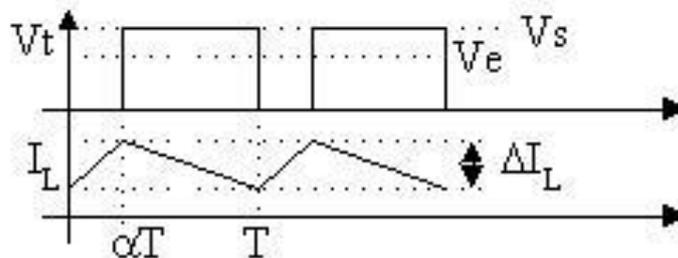


Figure 3.8 : Allure de courant dans l'inductance I_L . [35]

De la même façon, on obtient l'ondulation de tension de sortie en supposant le courant de sortie I_s continu. Lorsque D est bloquée C se décharge à courant constant (Figure 3.9). Sa valeur moyenne est nulle (car $V_{\text{moyen}} = \text{constante}$).

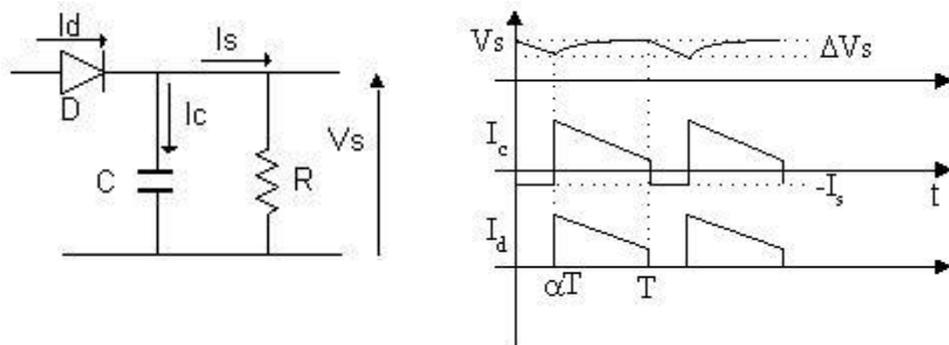


Figure 3.9 : Allure des courants I_c et I_d . [35]

$$\Delta V_s = \frac{\alpha \cdot V_e}{(1-\alpha) \cdot R \cdot C \cdot F} \quad (3.16)$$

$$EtI_{C_{moyen}} = 0 ; Id_{moyen} = Is$$

3.6- Calcul et choix des composants

Le bon fonctionnement des convertisseurs statique passe par le bon choix des composants passifs, le calcul des valeurs de l'inductance et de capacité une tâche indispensable :

3.6.a- inductance

On fixe tout d'abord la fréquence de travail $F (=1/T)$. On se place ensuite au régime critique.

A partir des deux équations (3.9) et (3.14) écrites pour le régime critique,

$$I_{L_{max}} = \frac{V_e}{L} \alpha \cdot T \quad (3.17)$$

Et

$$Is = \frac{1 \cdot T}{2L} \cdot \alpha \cdot (1-\alpha)^2 \cdot Vs \quad (3.18)$$

On tire :

$$I_{L_{max}} = \frac{Vs}{Ve} \cdot 2 \cdot Is \quad (3.19)$$

Connaissant V_e et les valeurs demandées de V_s et de I_s , on calcule le courant maximum dans l'inductance I_{Lmax} . On estime la valeur de l'inductance L par :

$$L = \frac{V_e}{I_{Lmax}} \alpha \cdot T \quad (3.20)$$

et

$$\alpha = \frac{V_s - V_e}{V_s} \quad (3.21)$$

3.6.b- condensateur de sortie

En fixant l'ondulation résiduelle voulue, on tire ensuite de l'équation (3.15) la valeur du condensateur de sortie C :

$$C = \frac{\alpha \cdot T \cdot I_s}{\Delta V_s} \quad (3.22)$$

3.7- Etude du hacheur Boost d'un système Photovoltaïque :

3.7.1- Représentation d'un hacheur Boost PV :

Cette étude se fait en prenant une tension d'un générateur PV comme tension d'entrée de l'hacheur. La figure 3.10 ci-dessous représente le schéma de ce convertisseur :

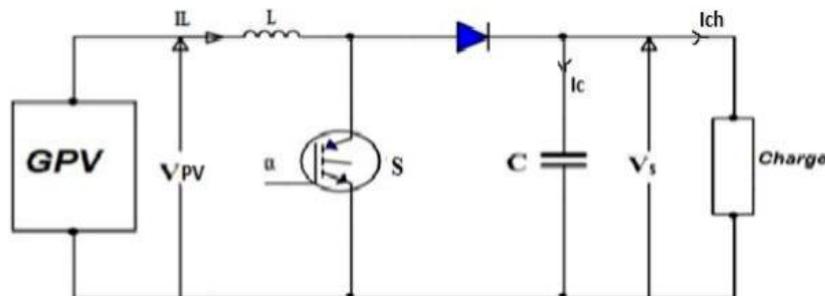


Figure 3.10 : Schéma d'un hacheur Boost alimenté par un générateur photovoltaïque. [35]

3.7.2-Dimensionnement et calcul des composants constitutifs du hacheur boost utilisé

Pour une puissance $P=100W$, et une tension d'entrée $V_e=12V$, nous allons dimensionner les valeurs des composants constitutifs du hacheurs boost pour deux différents rapports cyclique :

3.7.2.a-calcul des composants pour $\alpha=0.95$:

Pour obtenir une tension $V_s=240V$ à la de sortie du boost qui alimente une charge résistive R_{ch} :
Nous avons:

$$\alpha=1-(V_e/V_s)=1-(12/240)=0.95 ;$$

La valeur de la Rch et le Courant de la sortie Is sont calculés par :

$$R_{ch}=V_s^2/P=240^2/100=576 \Omega ;$$

$$I_s=V_s/R_{ch}=240/576=0.4166667A ;$$

Afin de calculer les valeurs de L et C nous allons utiliser les formules citées précédemment, pour une fréquence de découpage $f_d=280\text{Hz}$, et une ondulation de tension de sortie $\Delta V_s=0.5 \text{ V}$:

Calcul de L :

$$I_{L_{max}} = \frac{V_s}{V_e} \cdot 2 \cdot I_s$$

$$I_{L_{max}}=(240/12) \cdot 2 \cdot 0.416667,$$

$$I_{L_{max}}=16.66668A.$$

$$L = \frac{V_e}{I_{L_{max}}} \cdot \alpha \cdot T$$

$$L=(12/16.6668) \cdot 0.95 \cdot (1/280)$$

$$L=0.0024H$$

Calcul de C :

$$C = \frac{\alpha \cdot T \cdot I_s}{\Delta V_s}$$

$$C=(0.95 \cdot 0.4166667)/280 \cdot 0.5,$$

$$C=0.0028 \text{ F.}$$

3.7.2.b-calcul des composants pour $\alpha=0.5$:

Pour obtenir une tension $V_s=24\text{V}$ à la de sortie du boost qui alimente une charge résistive R_{ch} : on a:

$$\alpha=1-(V_e/V_s)=1-(12/24)=0.5 ;$$

La valeur de la Rch et le Courant de la sortie Is sont calculés par :

$$R_{ch}=V_s^2/P=24^2/100=5.76 \Omega ;$$

$$I_s=V_s/R_{ch}=24/5.76=4.166667A ;$$

Afin de calculer les valeurs de L et C nous allons utiliser les formules cité précédemment, pour une fréquence de découpage $f_d=280\text{Hz}$, et une ondulation de tension de sortie $\Delta V_s=0.5 \text{ V}$:

Calcul de L :

$$I_{L_{max}} = \frac{V_s}{V_e} \cdot 2 \cdot I_s$$

$$I_{L_{max}}=(24/12) \cdot 2 \cdot 4.16667,$$

$$I_{L_{max}}=16.66668A.$$

$$L = \frac{V_e}{I_{L_{max}}} \cdot \alpha \cdot T$$

$$L=(12/16.6668) \cdot 0.5 \cdot (1/280)$$

$$L=0.0012H$$

Calcul de C :

$$C = \frac{\alpha \cdot T \cdot I_s}{\Delta V_s}$$

$$C = (0.5 * 4.166667) / (280 * 0.5),$$

$$C = 0.014 \text{ F.}$$

3.8-Simulation du convertisseur boost

Afin de simuler le bon fonctionnement du boost avec les composants calculés, une simulation de celui-ci sur l'environnement Matlab Simulink est faite, les résultats de simulation sont illustré ci-dessous :

- Pour $\alpha=0.95$:

Afin de générer le signal de commande de l'interrupteur idéal, on compare un signal de valeur constante **9.5** avec un signal dents de scie d'amplitude **10** et une fréquence $f_d=280\text{Hz}$ (voir figures 3.11-3.13)

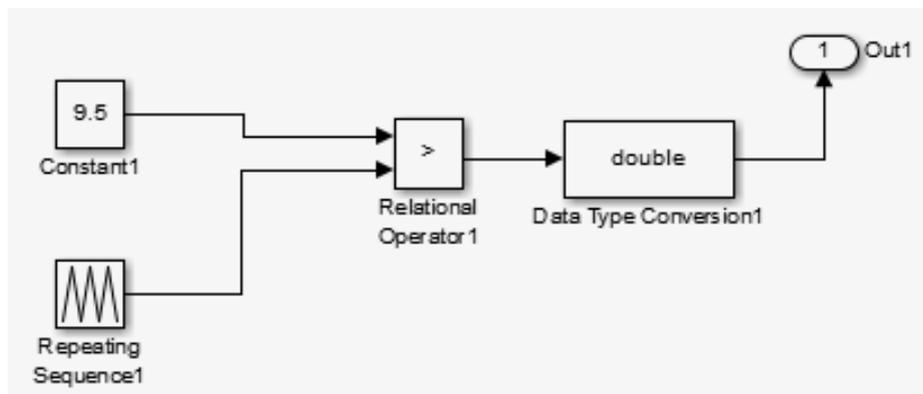


Figure 3.11: Génération du signal de commande pour $\alpha=0.95$.

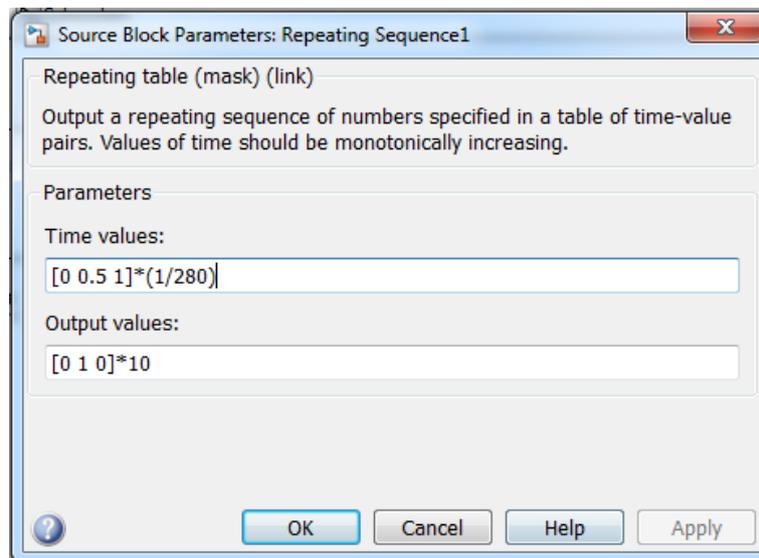


Figure 3.12: Données entré dans le signal dents de scie.

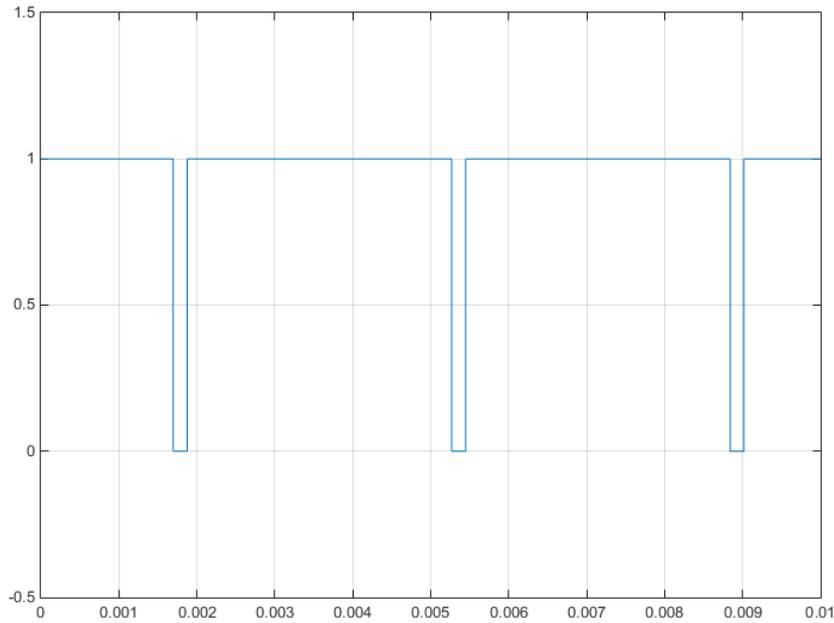


Figure 3.13: Signal de commande

La figure 3.14 suivante illustre le convertisseur boost simulé sous l'environnement Matlab, avec une tension d'entrée $V_e=12V$, et une tension de sortie $V_s=241.3V$. (en jaune).

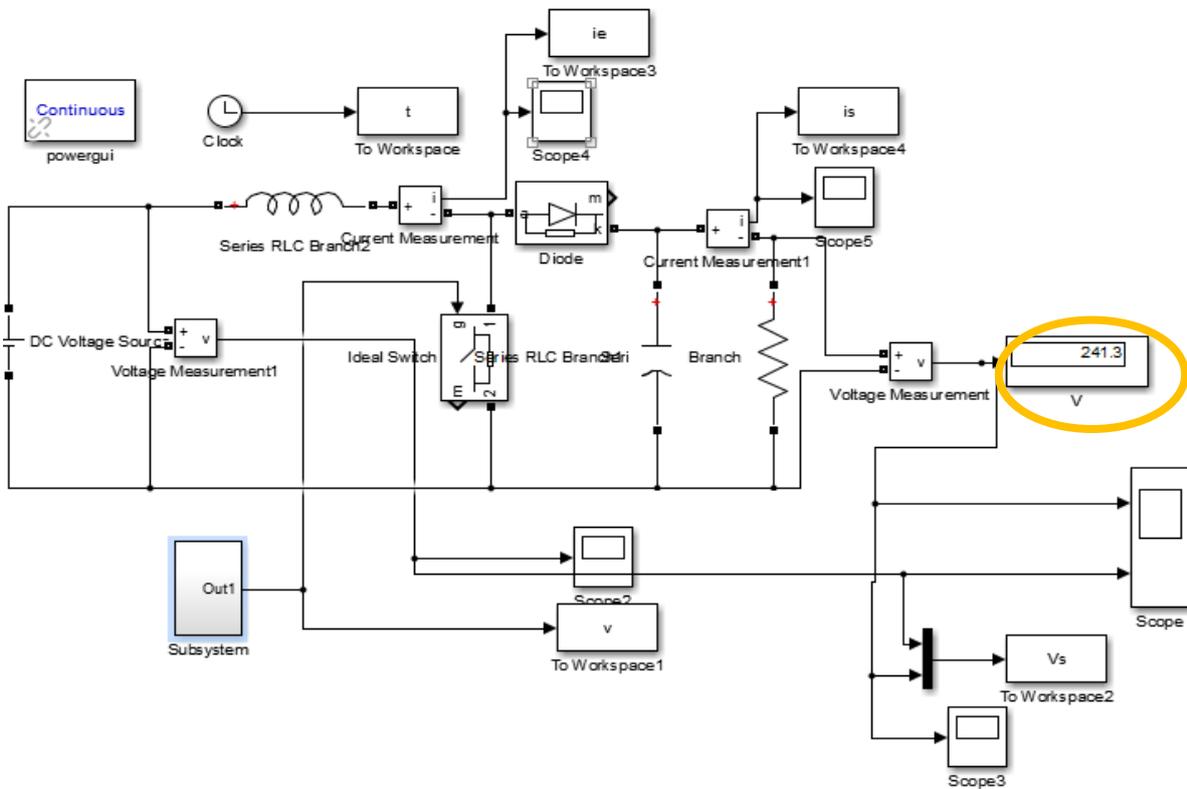


Figure 3.14: Schéma block du hacheur boost pour $\alpha=0.95$.

Les allures de tension d'entrée (bleu), et tension de sortie (orange) sont illustré à la figure 3.15, et le courant de charge illustré à la figure 3.16:

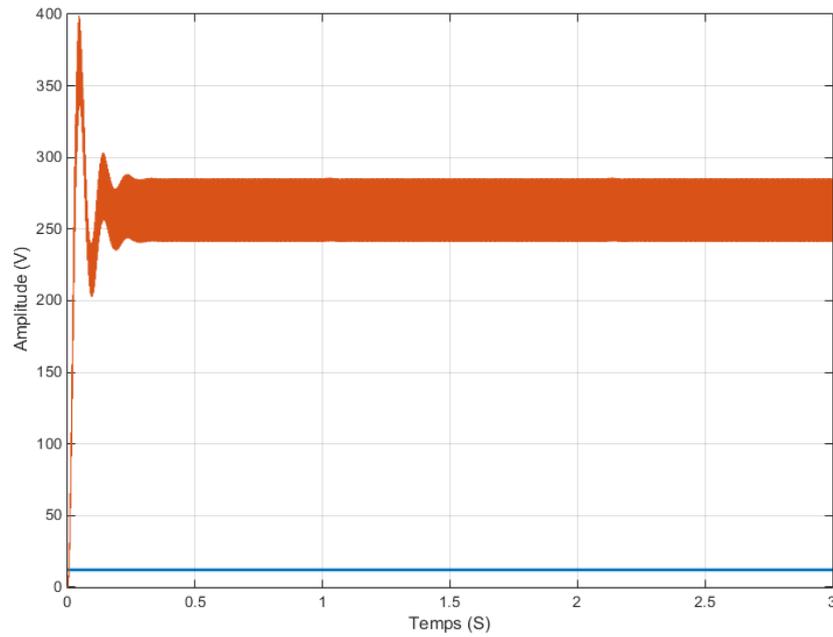


Figure 3.15: Allure des tensions V_e (bleu), V_s (orange).

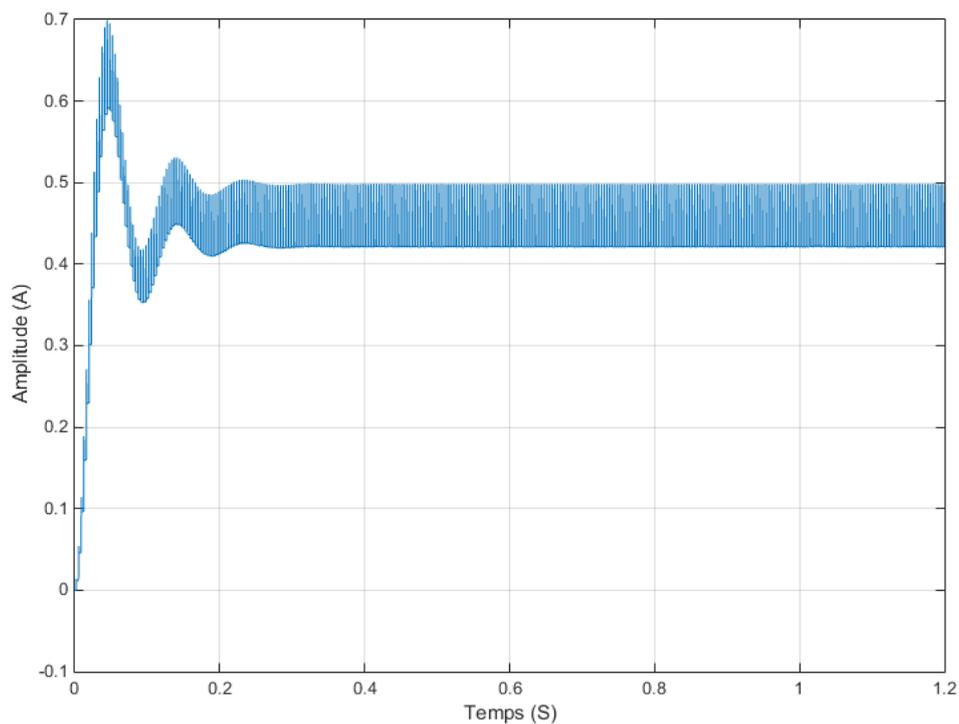


Figure 3.16 : Allure de courant de charge.

- Pour $\alpha=0.5$:

Afin de générer le signal de commande de l'interrupteur idéal, on compare un signal de valeur constante **5** avec un signal dents de scie d'amplitude **10** et une fréquence $f_d=280\text{Hz}$ (voir figure 3.17-3.18)

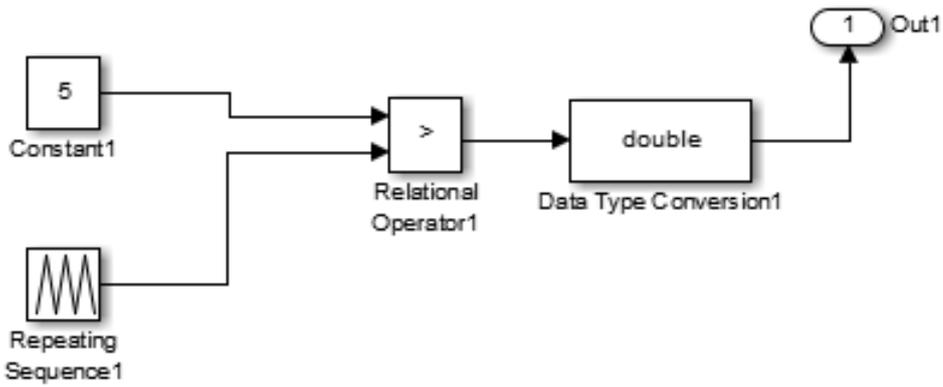


Figure 3.17: Génération du signal de commande pour $\alpha=0.5$.

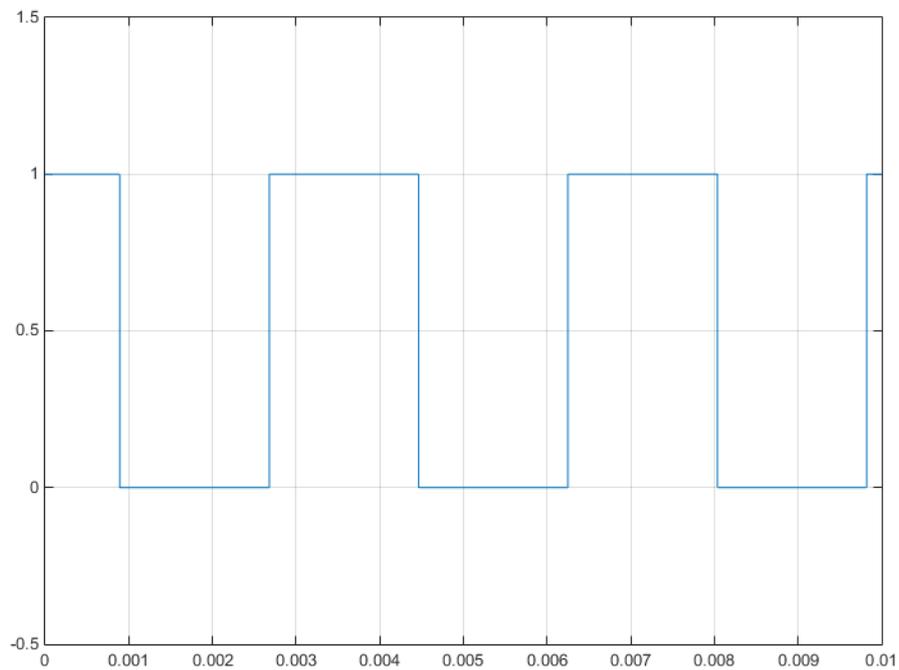


Figure 3.18 : Signal de commande.

La figure 3.19 illustre le convertisseur boost simulé, avec une tension d'entrée $V_e=12V$, et une tension de sortie $V_s=26.31V$.(en jaune).

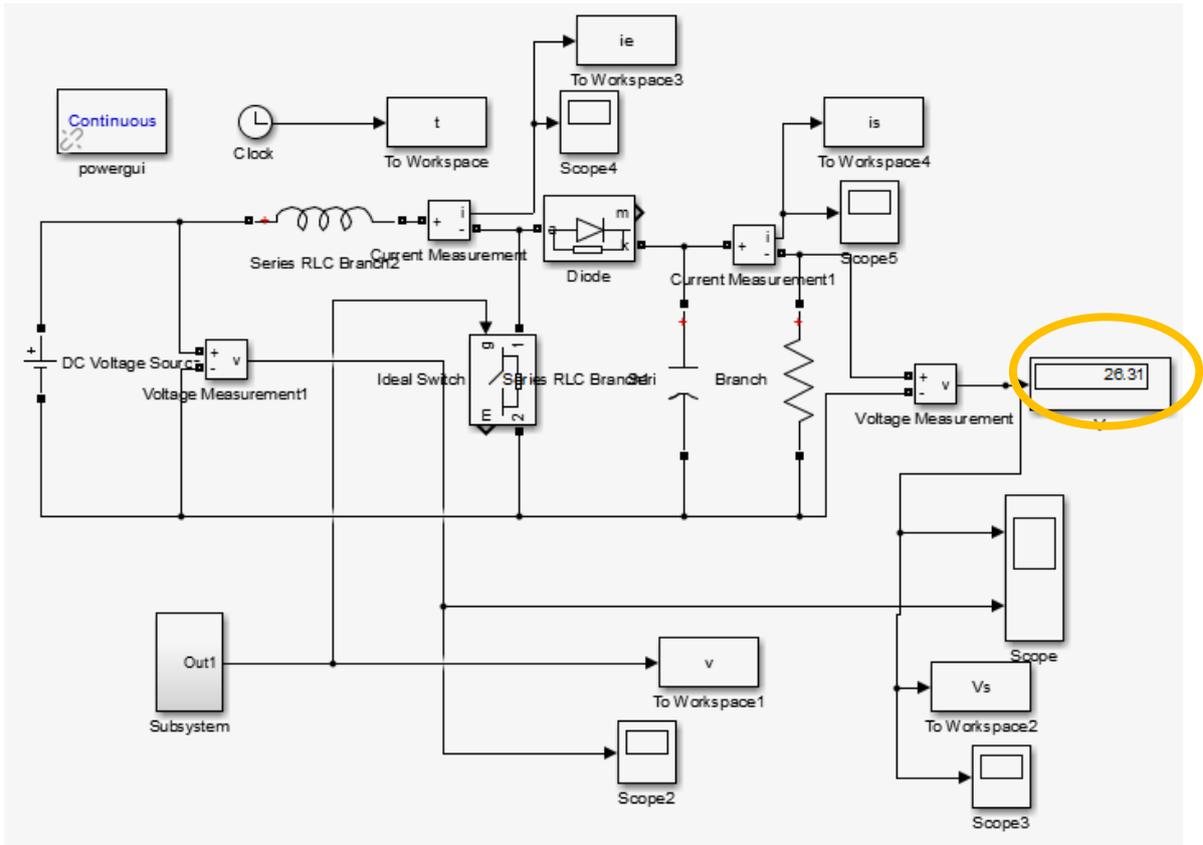


Figure 3.19: Schéma block du hacheur boost pour $\alpha=0.5$.

Les allures de tension d'entrée (bleu), et tension de sortie (orange)(Figure 3.20), et le courant de charge sont illustrés dans figures 3.21 :

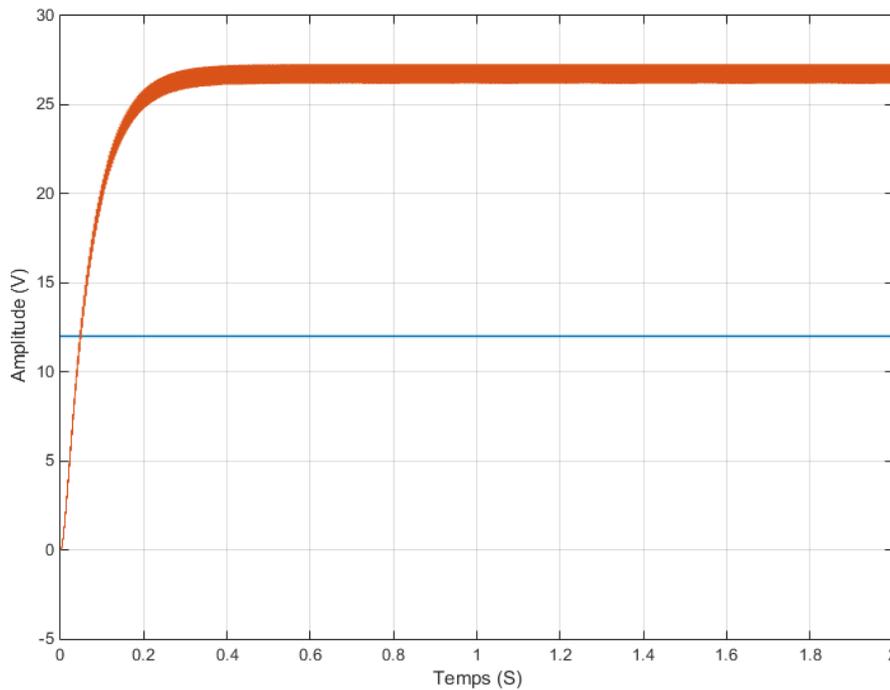


Figure 3.20: Allure des tensions V_e (bleu), V_s (orange).

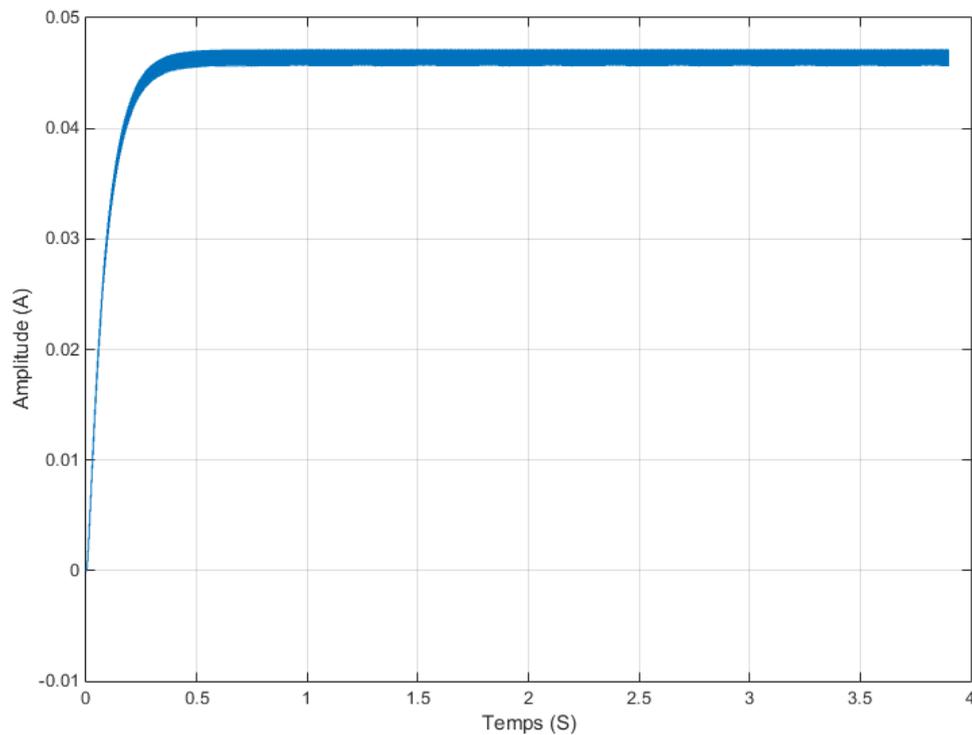


Figure 3.21: Allure de courant de charge.

3.9- Interprétation des résultats

Les résultats trouvés par simulation sont presque similaires aux résultats calculés.

D'après la simulation, la tension de sortie du hacheur est une tension réglable, elle peut varier de 12V jusqu'à la valeur voulue, en contrôlant le rapport cyclique.

Lorsque la tension de sortie augmente, les éléments passifs changent de valeurs, donc il faut un choix précis et judicieux des valeurs de l'inductance et de la capacitance.

Vue la situation du Covid 19 et à défaut de ne pas avoir réalisé notre projet nous présentons un convertisseur Boost réalisé au laboratoire de recherche ICEPS :

3.10- Convertisseur survolteur réalisé au laboratoire ICEPS

- Circuit de puissance

Le circuit de puissance (Voir Figure 3.22) est constitué du panneau solaire, du convertisseur de type BOOST nécessaire pour la régulation de la tension et de la batterie

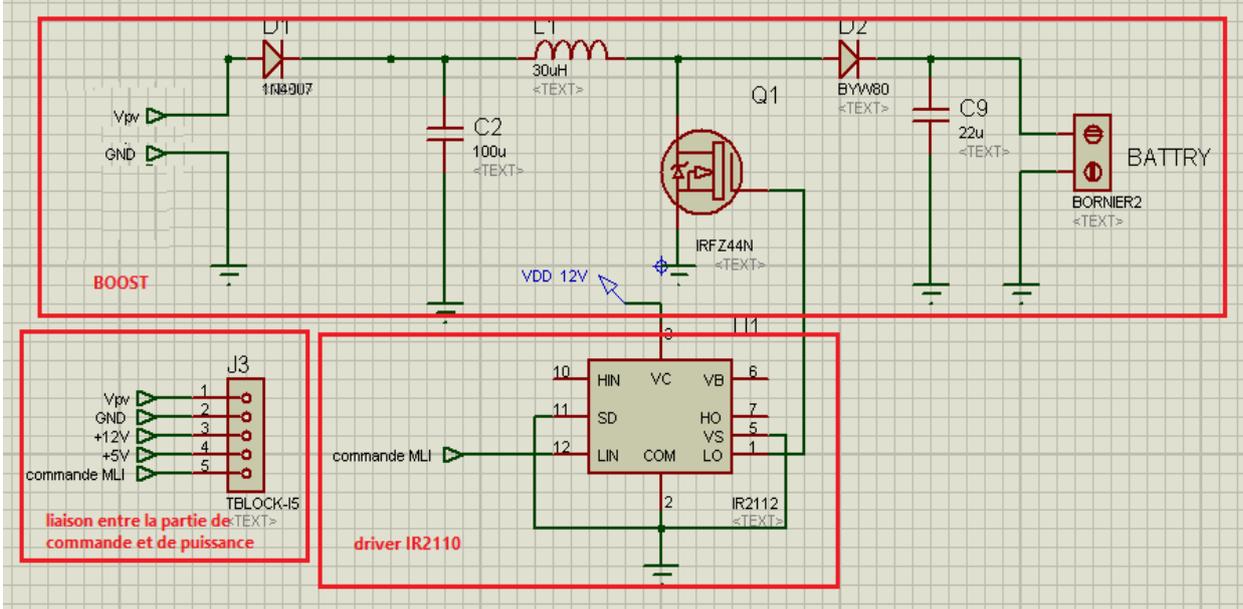


Figure 3.22: Schéma du circuit de puissance. [55]

- Circuit de commande du convertisseur

La figure 3.23 représente le schéma de commande MPPT Numérique

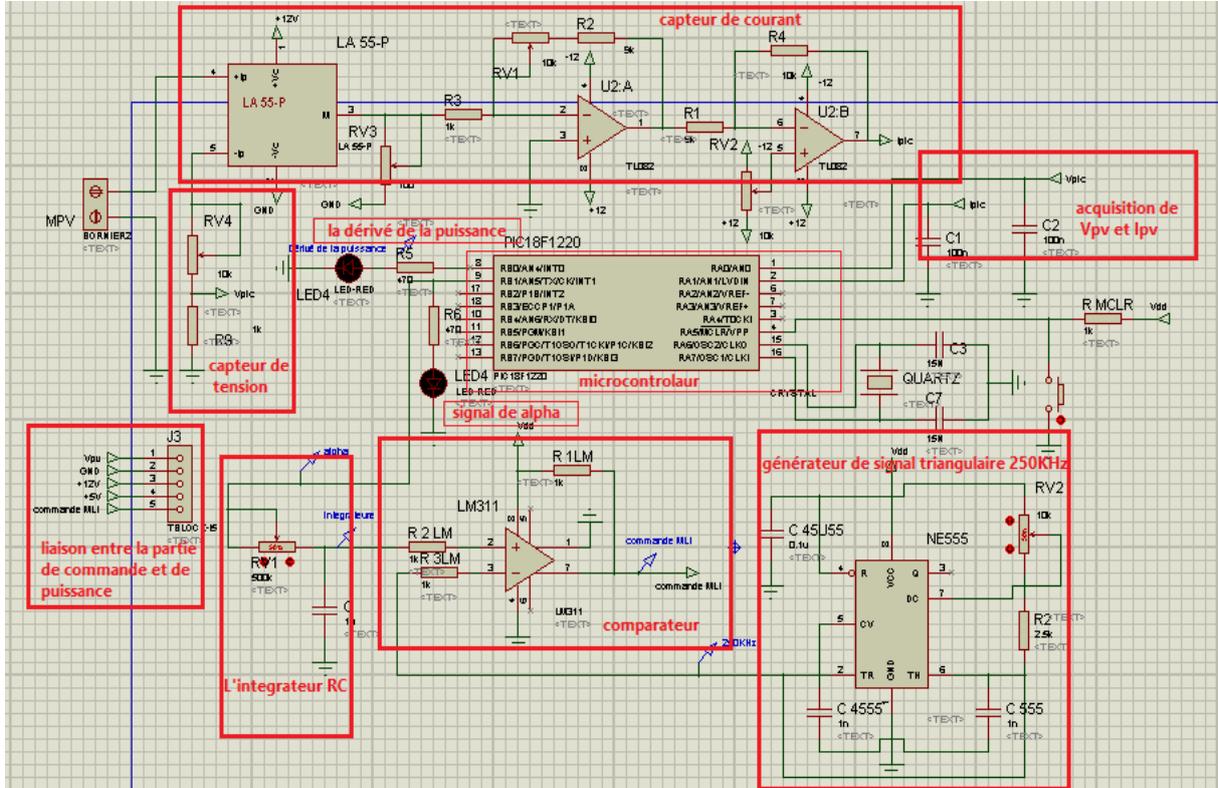


Figure 3.23: Schéma de la commande MPPT Numérique. [55]

- **Photo du circuit de puissance** : Le circuit de puissance est illustré à la figure 3.24.

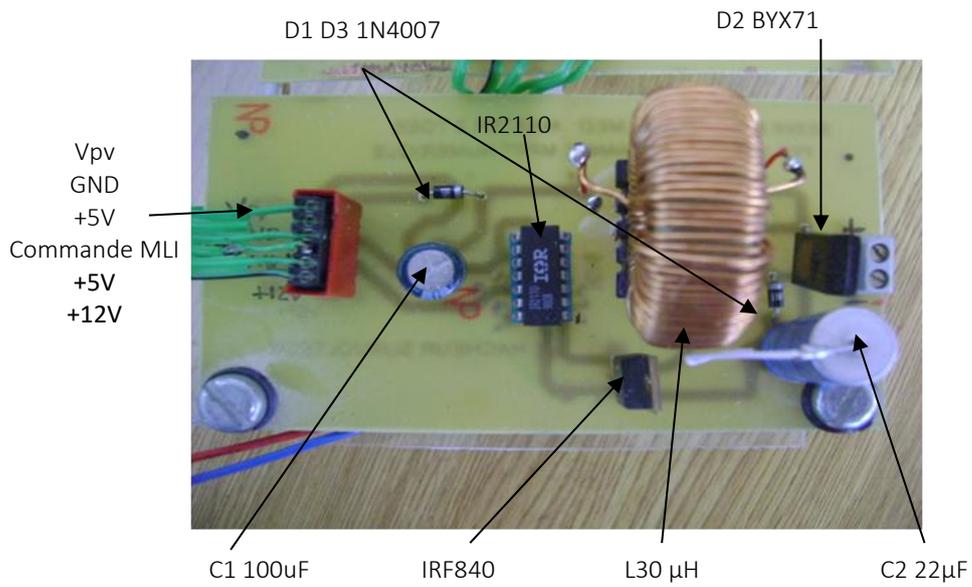


Figure 3.24 : Photo du circuit de puissance. [55]

- **Photo de la carte de commande** : Voir figure 3.25

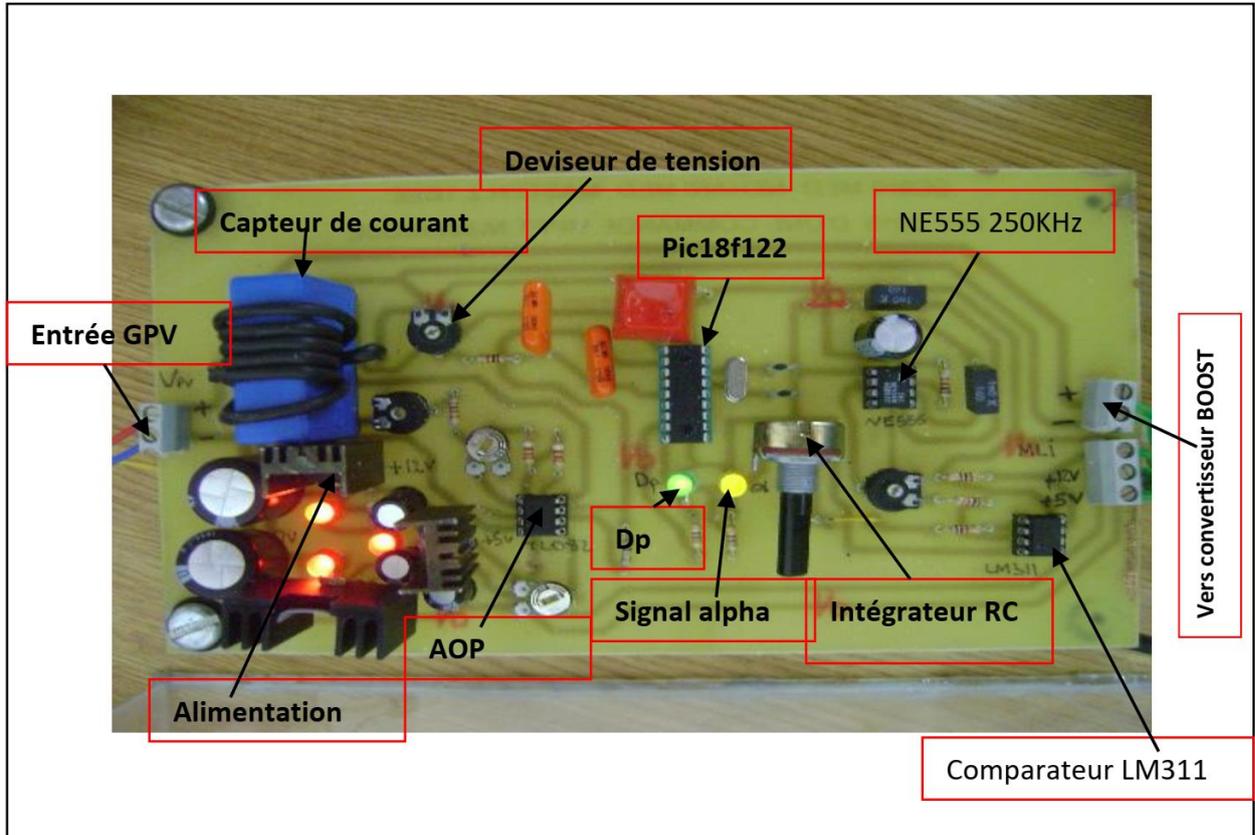


Figure 3.25: Photo de la carte de commande. [55]

La Figure 3.26 représente le prototype réalisé au laboratoire ICEPS



Figure 3.26: Photo du prototype du convertisseur MPPT. [55]

3.11-Conclusion

L'hacheur boost étudié est capable de générer une modulation de largeur d'impulsions (PWM) de durée et de rapport cyclique variables. Ce convertisseur présente l'avantage d'être un élévateur de tension ce qui permet une bonne adaptation entre la charge et le générateur. Pour une tension de sortie prédéfinie, on a choisi des valeurs des composants passifs adéquates et qui sont réellement attribués à cette tension.

Les hacheurs nous permettent d'avoir un rendement fiable de tension, il est par ailleurs possible d'abaisser la tension de l'alimentation ou de l'élever, cela dépend de l'utilisation. Les hacheurs ont différentes applications : le hacheur parallèle est utilisé dans des applications de faible tension comme les systèmes d'éclairage portatifs, ainsi que dans des applications de grandes tensions comme les véhicules hybrides. Les hacheurs série sont utilisés dans le domaine de la variation de vitesse pour machines à courant continu.

CONCLUSION GENERALE

Conclusion générale et Perspectives

Dans ce travail nous avons présenté l'étude d'un convertisseur de type Boost pour système photovoltaïque. Nous avons développé en premier lieu les systèmes photovoltaïques, le principe de fonctionnement, les différentes technologies des cellules photovoltaïques, leurs caractéristiques ainsi que les avantages et les inconvénients de ces systèmes.

En second lieu, nous avons présenté une étude des convertisseurs DC-DC et plus particulièrement les hacheurs boost servant à augmenter la tension à la sortie du générateur photovoltaïque afin de pouvoir l'utiliser dans la vie quotidienne, ensuite nous avons procédé à la modélisation et le dimensionnement des éléments constituant le montage Boost.

Et finalement l'étage d'adaptation (Hacheur BOOST) a été simulé sous Matlab- Simulink, les résultats de simulation ont été présentés afin d'illustrer le fonctionnement de notre hacheur.

Notre application porte sur le choix d'un hacheur Boost sans intégrer un transformateur afin d'obtenir une tension élevée à la sortie pour une faible tension à l'entrée.

Pour la modélisation, nous avons pris un modèle idéal qui ne tient pas compte des chutes de tension et des résistances internes des composants. Nous avons ensuite dimensionné la bobine et le condensateur, puis nous avons fait le choix des composants exigés dans notre montage pour un cahier de charges défini, la commande utilisée est basée sur le principe de MLI.

L'hacheur Boost étudié est capable de générer une modulation de largeur d'impulsions (PWM) de durée et de rapport cyclique variables. Ce convertisseur présente l'avantage d'être un élévateur de tension ce qui permet une bonne adaptation entre la charge et le générateur. Pour une tension de sortie prédéfinie.

Notre projet consistait principalement à réaliser un hacheur parallèle (boost) alimenté par un générateur photovoltaïque. Vu la crise sanitaire (covid- 19), on n'a pas pu faire la réalisation et profitant de notre présence au laboratoire ICEPS nous avons présenté un hacheur BOOST réalisé dans ce laboratoire.

Comme perspective, nous souhaitons concevoir un hacheur à rendement aux alentours de 90% en calculant précisément la majorité des pertes significatives.

Egalement nous proposons d'utiliser des commandes récentes telles que l'intelligence artificielle.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] D. a. B. N. van den Bossche, "ÉLECTRODYNAMIQUE APPLIQUÉE".
- [2] P. Besson, Compréhension des comportements électrique et optique des modules photovoltaïques à haute concentration, et développement d'outils de caractérisations adaptés, Université de Lyon, 2016.
- [3] F. Bandou, Contribution à l'analyse des performances électriques et thermiques des modules photovoltaïques de différentes technologies, Université Mouloud Mammeri, 2016.
- [4] A. Bouakra, Impact et régulation de la tension à la suite d'insertion d'énergie renouvelable dans les réseaux de distribution électrique, Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue, 2016.
- [5] J.-J. e. a. Benattar, "Les rencontres nationales physique-entreprise-recherche", (2016) .
- [6] M. A. N. S. O. U. R. Salaheddine, Etude de Dimensionnement optimal d'une station solaire autonome en site isolé, 2014.
- [7] E. L. .. Aisa, Génération de très hautes pressions d'ablation laser et de chocs forts pour l'allumage des réactions de fusion nucléaire, Université de Bordeaux, 2017.
- [8] M. Meftah, Nouveau regard sur quelques caractéristiques physiques du Soleil, Paris Saclay, 2017.
- [9] P. Spagnou, Les mystères du temps. De Galilée à Einstein, CNRS, 2017.
- [10] M. .. SALMI, Contribution à la quantification de l'irradiation solaire globale en Algérie et applications aux générateurs photovoltaïques, 2014.
- [11] J.-C. Merlin, Comment va la Terre? Climat et réchauffement, Société des Ecrivains, 2013.
- [12] H. CHABANE, Etude D'une Cellule Solaire A Base De Structure Pin, Université de Batna 2, 2015.
- [13] Benchikh Elhoucine Hanane, 'Simulation numérique de modèle de collecteur Hybride Photovoltaïque/Photothermique', Mémoire de magister, Université de Constantine, Algérie, 2009.
- [14] A. Borni, "Etude et régulation d'un circuit d'extraction de la puissance maximale d'un panneau solaire", (2009).
- [15] M. e. a. "REGRAGUI, "Réalisation et caractérisation des cellules photovoltaïques organiques.
- [16] D. BELLALA, Contribution à l'Optimisation des Systèmes de Conversion d'Energie. Application aux Systèmes Photovoltaïques, Université de Batna 2, 2009.

- [17] J. Degoulange, Purification et caractérisations physico-chimiques et électriques de silicium d'origine métallurgique destiné à la conversion photovoltaïque, Institut National Polytechnique de Grenoble-INPG, 2008.
- [18] B. Gallien, Contraintes thermomécaniques et dislocations dans les lingots de silicium pour applications photovoltaïques, Université Grenoble Alpes, 2014.
- [19] R. Champory, Cellules solaires silicium ultra-minces nanostructurées: conception électro-optique et développement technologique, Lyon, 2016.
- [20] C. a. B. G. Miquel, "Systèmes photovoltaïques: fabrication et impact environnemental." Hespul, Énergie Renouvelables et Efficacité énergétique, Publications Photovoltaïques 27 (2009): 2011.
- [21] B. Gallien, Contraintes thermomécaniques et dislocations dans les lingots de silicium pour applications photovoltaïques, Université Grenoble Alpes, 2014.
- [22] A. Skender, Etude et simulation des cellules solaires à triples-jonctions à concentration à base des semi-conducteurs III-V, Université Mouloud Mammeri, 2016.
- [23] Institut Bruxellois pour la gestion de l'environnement LE PHOTOVOLTAÏQUE – MODULE 3 – FONCTIONNEMENT ET TECHNOLOGIES, Edition NOVEMBRE 2010 .
- [24] B. FELLAH, "Système hybride photovoltaïque-éolien, de production d'électricité., Application aux sites de Tlemcen et de Bouzaréah." (2012).
- [25] D. D , B. FLECHE, « Energie solaire photovoltaïque », STI ELT Approche générale , Juin 2007.
- [26] M. MOHAMMEDI, ETUDE ET SIMULATION DE CELLULES PHOTOVOLTAIQUES A CONTACTS ARRIERES INTERDIGITÉS SOUS ENVIRONNEMENT SILVACO, 2012.
- [27] Cédric CABAL, "Optimisation énergétique de l'étage d'adaptation électronique dédié à la conversion photovoltaïque",Thèse de doctorat soutenue le 15 décembre 2008.
- [28] P. Durand-Estèbe, Systèmes de récupération d'énergie pour l'alimentation de capteurs autonomes pour l'aéronautique, INSA de Toulouse, 2016.
- [29] A. a. A. R. Ghamoud, Commande prédictive d'un système photovoltaïque connecté au réseau électrique, 2016.
- [30] S. MEDJDOUB, Etude structurelle des cellules solaires deuxième et troisième génération, 2016.
- [31] F. ZAOUI, UTILISATION DES ENERGIES RENOUVELABLES INFLUENCE DE LA TEMPERATURE SUR LES PERFORMANCES DU MODULE PV, Université Mohamed Khider-Biskra, 2016.
- [32] M. N. BAKHTA, "LA PRODUCTION DECENTRALISEE."(2017).
- [33] A. Besra, AMÉLIORATION DES PERFORMANCES DES COMPOSANTS ÉLECTRONIQUES PAR SIMULATION, BADJI MOKHTAR–ANNABA UNIVERSITY.
- [34] «Mongo Sukulu,» 2019. [En ligne]. Available:
<https://www.mongosukulu.com/index.php/contenu/genie-electrique4/electronique-de-puissance/550-les-hacheurs?showall=1/>.

- [35] «mytopschool,» [En ligne]. Available:
<http://www.mytopschool.net/mysti2d/activites/polynesie2/ETT/C044/32/Modulateurs/index.html?LeHacheur1Qtension.html>. [Accès le 2020 10 12].
- [36] B. VINCENT, Identification de sources électromagnétiques multipolaires équivalentes par filtrage spatial: Application à la CEM rayonnée pour les convertisseurs d'électronique de puissance, Thèse de doctorat, 2009.
- [37] A. BOUAFIA, Techniques de commande prédictive et floue pour les systèmes d'électronique de puissance: application aux redresseurs à MLI, Thèse de doctorat, 2014.
- [38] F. Souleyman et M. Omar, «univ-adrar.edu.dz,» 23 06 2019. [En ligne]. Available:
https://dspace.univadrar.edu.dz/jspui/bitstream/123456789/2272/1/memoire.fine_etude.pdf. [Accès le 2 aout 2020].
- [39] P. B. A. Rufer, Cours d'électronique de puissance Conversion DC/DC, Lausanne: Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, octobre 2001.
- [40] H. LEQUEU, IUT-EDP-9, 2004/2005.
- [41] M. N. VIDEAU, CONVERTISSEURS CONTINU-CONTINU NON ISOLES A HAUT RAPPORT DE CONVERSION POUR PILES A COMBUSTIBLE, Institut National Polytechnique de Toulouse (INP Toulouse), 2014.
- [42] M. D. S. e. L. S. KHEMLICHE, «Diagnostic de défauts dans le système photovoltaïque par les réseaux de neurones artificiels». *Revue des Énergies Renouvelables SIENR'12 Ghardaïa*, pp. 331-343, 2012.
- [43] A. CHOUDER, Contribution à la commande des convertisseurs multicellulaires série, Thèse de doctorat, 2018.
- [44] H. Brahim, Etude et réalisation d'un hacheur Boost, thèse de doctorat, 2016.
- [45] D. galayko, Unité d'enseignement Elec-info pour master ACSI à l'UPMC, 2014.
- [46] «Composants de l'électronique de puissance,» [En ligne]. Available:
http://mach.elec.free.fr/divers/polycop_composants_elec_puiss.pdf. [Accès le 20 10 2020].
- [47] «electrotechnique,» 2018. [En ligne]. Available:
http://www.electrosup.com/convertisseur_boost.php. [Accès le 2020 08 03].
- [48] P. B. A. Rufer, «Cours d'électronique de puissance Conversion DC/DC,» ECOLE POLYTECHNIQUE DE LAUSANNE, LAUSANNE.
- [49] Hidri.Imed, électronique de puissance Les convertisseurs DC-DC et DC-AC, l'ISET de Nabeul.
- [50] A.Ayad, Etude et réalisation d'une commande MLI pilotant un hacheur série, thèse de Master en électrotechnique, Tlemcen: Université Abou Bakr Belkaid, 2014.

- [51] F.Berrezzak, Etude des différentes techniques de commande des onduleurs à MLI associées à une machines asynchrone, thèse de Magister en commande des machines électriques, Annaba: Université Badji Mohtar, 2006.
- [52] T.Touama, *Commande d'un MPPT avec un convertisseur DC/DC pour un système photovoltaïque. Thèse de master en électronique*, M'Sila: Université Mohamed Boudiaf, 2019.
- [53] M. Wagner, «THE IMPORTANCE OF PRINTED CIRCUIT BOARDS,» 2015. [En ligne]. Available: : <http://hardhero.com/the-importance-of-printed-circuit-boards/>.
- [54] A. A. A. ZENAZEL Leila, *ETUDE ET REALISATION DES CONVERTISSEURS EQUIPANT LE TRAIN*, SIDI BEL ABBES, 2018.
- [55] M. E. D. K. M.SEBHI, Etude et réalisation d'une commande MPPT pour systèmes photovoltaïques, Mémoire de master, Université Djillali Liabes, Sidi-Bel-Abbès, 2013.