

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة الجيلالي بونعامة خميس مليانة

Université Djilali Bounaama Khemis Miliana

Faculté des Sciences et Technologies

Département de **Technologie**



Mémoire de fin d'études

En vue de l'obtention de diplôme de **Master** en Automatique et Informatique Industrielle

Filière : Automatique

Spécialité : Automatique Et Informatique Industrielle

Convertisseur PWM-Buck pour le système de gestion de batterie BMS utilisé dans le système photovoltaïque

Présenté par :

- *Klaai Amin.*

Devant le jury :

Mme : Nawel Tedjani

Présidente

(U.D.B Khemis Miliana).

Mr : Sid-Ali Blaifi

Promoteur

(U.D.B Khemis Miliana).

Mr : Boukli Hacene Omar

Examineur

(U.D.B Khemis Miliana).

Année universitaire : 2022/2023



Remerciement

Tout d'abord, nous rendons grâce à Dieu, le tout puissant, le clément et le miséricordieux qui nous a aidé à terminer ce mémoire de fin d'étude.

On tient à exprimer notre profonde gratitude à encadreur SID-ALI BLAIFI, de l'Université DJILLALI BOUNAAMA_KHEMIS-MILLIANA pour nous avoir proposé le sujet à l'origine de ce mémoire. On le remercie d'avoir accepté de diriger ce travail, ainsi que pour ses nombreux conseils et suggestions.

Nous exprimons notre profonde reconnaissance aux membres de jury qui nous ont fait l'honneur d'étudier notre travail.

Nous remercions également tout le corps pédagogique du département de Sciences et Technologie, ainsi que tous ses employés

Nous remercions également à nos camarades pour toute l'aide et le soutien qu'ils nous ont apporté.

Enfin, nous souhaitons dédier ce mémoire à nos parents. Rien n'aurait été possible sans leur soutien, confiance et générosité

Résumé :

Au cours des dernières années, l'énergie solaire a suscité un intérêt considérable. L'optimisation du point de puissance maximale (MPPT) joue un rôle crucial dans les systèmes photovoltaïques car elle permet de maintenir le module photovoltaïque à son point de puissance maximale malgré les perturbations. Cette étude se concentre sur la mise en œuvre d'un convertisseur DC/DC de type Buck sur le logiciel Proteus, ainsi que sur la conception et la simulation de ce convertisseur dans une chaîne photovoltaïque en utilisant une approche sur MATLAB qui utilise une commande MPPT (Perturbation et Observation) pour maintenir la puissance maximale fournie par le générateur photovoltaïque.

Abstract:

In recent years, solar energy has generated considerable interest. Maximizing the maximum power point (MPPT) plays a crucial role in photovoltaic systems as it enables the photovoltaic module to operate at its maximum power point despite disturbances. This study focuses on the implementation of a Buck-type DC/DC converter using Proteus software, as well as the design and simulation of this converter in a photovoltaic system using a MATLAB approach that incorporates MPPT control (Perturbation and Observation) to maintain maximum power output from the photovoltaic generator.

ملخص:

في السنوات الأخيرة، أثارت الطاقة الشمسية اهتمامًا كبيرًا. يلعب تحسين نقطة القدرة القصوى (MPPT) دورًا حاسمًا في أنظمة الطاقة الشمسية حيث يسمح بتحقيق أقصى قدرة للوحة الشمسية رغم التشويشات. يركز هذا الدراسة على تنفيذ محول تيار مستمر / مستمر من نوع Buck باستخدام برنامج Proteus ، بالإضافة إلى تصميم ومحاكاة هذا المحول في نظام طاقة شمسية باستخدام منهجية في MATLAB تعتمد على التحكم (MPPT) التشويش والملاحظة للحفاظ على أقصى قدرة مولد الطاقة الشمسية.

CHAPITRE I :

- Figure I.1 : Panneau solaire 300W 24V monocristalline.
- Figure I.2 : Exemple sur les Batteries.
- Figures I.3 : Exemple de la structure d'un système PV autonome.
- Figure I.4: Schéma simplifié d'un Processus de conversion de la lumière en électricité au niveau d'une cellule PV (L'effet photovoltaïque).
- Figure I.5: Exemple sur l'application de système PV autonome dans les zones rurales éloignées.
- Figure I.6: Exemple sur l'application de système PV autonome en pompage d'eau.
- Figure I.7 : Exemple sur l'application de système PV autonome en stations de télécommunications.
- Figure I.8 : L'application des système PV autonome en l'éclairage public.
- Figure I.9 : Bateau autonome.
- Figure I.10 : Exemple sur des panneaux solaires sont exposés à conditions météorologiques
- Figure I.11 : La courbe d'évolution de l'état de santé d'une batterie par sa capacité de stockage tout au long de sa durée de vie.
- Figure I.12 : Convertisseur DC/DC connecté au système PV.
- Figure I.13 : symbole de convertisseur DC/AC monophasé et triphasé

CHAPITRE II :

- Figure II.1 Schéma de base d'un convertisseur Boost (élevateur).
- Figure II.2 Formes d'ondes du convertisseur Boost(élevateur).
- Figure II.3 : Schéma de base d'un convertisseur Buck(abaisseur).
- Figure II.4. Formes d'ondes du convertisseur Buck (abaisseur).
- Figure II.5 Schéma de base d'un convertisseur Buck-Boost (abaisseur-élevateur).
- Figure II.6 : Formes d'ondes du convertisseur Buck-Boost.
- Figure II.7: Ondulation de la tension de sortie.
- Figure II.8 : Chaine de conversion photovoltaïque avec convertisseur statique contrôlé par une commande MPPT.
- Figure II.9 : Caractéristique de fonctionnement de la méthode P&O.
- Figure II.10 : Principe de l'algorithme P&O. (Tableau 2-4).

CHAPITRE III

- Figure III.1 : Model de Simulink du convertisseur Buck.
- Figure III.3 : a-b illustrent l'évolution de la tension et du courant de sortie du convertisseur au fil du temps, mesurés aux bornes de la charge.
- Figure III.4 : Caractéristique électrique du module Solar world SW85poly R5A. (Tableau 3.1).
- Figure III.5: système permettant d'obtenir les caractéristiques de module PV(SW85).

- Figure III.6 : Les courbes des caractéristiques du panneau (SW85) pour différents niveaux d'irradiation ($G=100, 500, 1000 \text{ W/m}^2$) et $T=25 \text{ C}^\circ$. (a) caractéristique $I(V)$. (b) caractéristique $P(V)$.
- Figure III.7: Couplage direct de la charge résistive avec trois panneaux photovoltaïques.
- Figure III.8 : comparaison entre la tension d'entrée V_{pv} et de sortie V_{ch} en fonction de temps.
- Figure III.9: comparaison entre le courant d'entrée I_{pv} et la sortie I_{chen} en fonction de temps.
- Figure III.10: Schéma bloc de la simulation d'un système PV avec la commande MPPT et le modèle Simulink MPPT P&O. (a) schéma synoptique du système. (b) schéma Simulink.
- Figure III.11: les sorties de GPV avec MPP. (a) puissance. (b) courant. (c) tension.
- Figure III.12: Le MOSFET IRFZ44N.
- Figure III.13: Bobine à tore ferrite
- Figure III.14: Un condensateur $330 \mu\text{F}$.
- Figure III.15: Ir2112 MOSFET driver et son schéma de connexion.
- Figure III.16: Diode Schottky de modèle MBR6045WT.
- Figure III.17: Schéma du convertisseur Buck avec le circuit driver ir2112.
- Figure III.18: L'allure de tension obtenue aux bornes de la charge ($\alpha=90\%$).
- Figure III.19: L'allure de tension obtenue aux bornes de la charge ($\alpha=50\%$).
- Figure III.20: L'allure de tension obtenue aux bornes de la charge ($\alpha=25\%$).
- Figure III.21: Préparation du circuit final pour le routage.
- Figure III.22: L'emplacement des composants avec le routage de la carte.
- Figure III.23: vue inférieure sur la phase routée du circuit imprimé à l'aide du logiciel de première carte.
- Figure III.24: visualisation du modèle en 3D de la carte.
- Figure III.25: Montage final de la carte.

Sommaire

Introduction

| | |
|--|----|
| Introduction Générale | 2 |
| Chapitre I :Généralité sur les systèmes photovoltaïques autonomes et les différents types de convertisseurs utilisés dans ces systèmes | 4 |
| I. Introduction..... | 4 |
| 1. Généralité sur les systèmes photovoltaïques autonomes : | 4 |
| 1.1. Composants d'un système photovoltaïque autonome :..... | 4 |
| 1.2. Panneaux photovoltaïques : | 4 |
| 1.3. Régulateur de charge :..... | 5 |
| 1.4. Batteries : | 5 |
| 1.5. Convertisseurs : | 6 |
| 1.6. Système de surveillance : | 6 |
| 2. Fonctionnement d'un système photovoltaïque autonome : | 7 |
| 2.1. Conversion de la lumière en électricité : | 7 |
| 2.2. Régulation de la charge : | 8 |
| 2.3. Stockage de l'électricité : | 8 |
| 2.4. Conversion du courant continu en courant alternatif : | 8 |
| 2.5. Surveillance du système :..... | 9 |
| 3. Applications des systèmes photovoltaïques autonomes :..... | 9 |
| 3.1. Électrification rurale : | 9 |
| 3.2. Pompes solaires :..... | 10 |
| 3.3. Stations de télécommunications : | 10 |
| 3.4. Éclairage public solaire : | 11 |
| 3.5. Applications mobiles :..... | 11 |
| 4. Avantages d'un système photovoltaïque autonome :..... | 12 |
| II. Problématiques liées aux systèmes autonomes :..... | 12 |
| 1. Perte de performance des panneaux solaires :..... | 12 |
| 2. Vieillessement des batteries : | 13 |
| 3. Perte de conversion : | 14 |
| 4. Instabilité de la tension ou du courant :..... | 14 |
| 5. Maintenance et suivi insuffisants :..... | 15 |
| III. Types de convertisseurs utilisés dans la chaîne photovoltaïque autonomes : | 15 |
| 1. Rôle des convertisseurs dans les systèmes photovoltaïques autonomes : | 15 |
| 1.1. Conversion du courant continu (DC) en courant alternatif (AC) : | 15 |

| | | |
|--|---|----|
| 1.2. | Contrôle et gestion de l'énergie : | 16 |
| 1.3. | Gestion de la charge des batteries : | 16 |
| 2. | Différents types de convertisseurs utilisés dans les systèmes photovoltaïques autonomes : | 16 |
| 2.1. | Convertisseurs DC-DC : (Maximisant l'efficacité des systèmes photovoltaïques autonomes) | 16 |
| 2.2. | Convertisseurs DC-AC : (Rendre l'énergie solaire utilisable) | 17 |
| IV. | Conclusion : | 19 |
| Chapitre II : Les Différentes Technologies Des Régulateurs Solaires. | | 22 |
| I. | Introduction : | 22 |
| II. | Convertisseurs DC/DC : | 22 |
| III. | Mode de fonctionnement du convertisseur statique : | 23 |
| 1. | Mode de Conduction Continue (MCC) : | 23 |
| 2. | Mode de Conduction Discontinue (MCD) : | 23 |
| IV. | Les différents convertisseurs DC/DC : | 23 |
| 1. | Convertisseur Boost (élevateur) : | 23 |
| 1.1. | Principe de fonctionnement: | 24 |
| 1.2. | Applications : | 24 |
| 2. | Convertisseur Buck(abaisseur) : | 25 |
| 2.1. | Principe de fonctionnement : | 25 |
| 2.2. | Applications : | 26 |
| 3. | Convertisseur Buck-Boost (abaisseur-élevateur) : | 26 |
| 3.1. | Principe de fonctionnement: | 27 |
| V. | Choix du convertisseur Buck pour la charge de la batterie : | 28 |
| 1. | Tension de fonctionnement inadaptée : | 28 |
| 2. | Charge incomplète : | 28 |
| 3. | Charge à tension constante impossible : | 28 |
| VI. | Analyse de convertisseur Buck : | 28 |
| 1. | Ondulation du courant et choix de L : | 29 |
| 2. | Ondulation de la tension de sortie V_o , choix de C : | 30 |
| 3. | Analyse fréquentielle : | 31 |
| VII. | Techniques de la commande PWM : | 32 |
| 1. | Principe de la commande PWM : | 32 |
| VIII. | Recherche du point de puissance maximale (MPPT) : | 33 |
| 1. | Principe : | 33 |

| | | |
|--|---|-----------|
| 2. | Classification de l'algorithme de suiveur de la puissance max : | 34 |
| 2.1. | La méthode de MPPT directe : | 34 |
| 2.2. | La méthode de MPPT Indirect : | 34 |
| 3. | L'algorithme de Perturbe & Observe (P&O) : | 34 |
| IX. | Conclusion : | 36 |
| Chapitre III : Simulation et Réalisation Convertisseur PWM-Buck pour le système de gestion de batterie BMS utilisé dans le système photovoltaïque : | | 38 |
| I. | Introduction : | 38 |
| II. | La modélisation et la simulation d'un système PV autonome avec un convertisseur DC /DC Buck : | 38 |
| 1. | Simulation d'un hacheur Buck: | 38 |
| 2. | Caractérisation du module PV : | 40 |
| 3. | Simulation de caractérisation du module PV : | 40 |
| 4. | La simulation consiste en un convertisseur Buck avec trois panneaux solaires photovoltaïques (PV) connectés en parallèle et une charge résistive. | 42 |
| 5. | La simulation de la Commande MPPT : | 43 |
| III. | Réalisation et tests du circuit de puissance avec convertisseur Buck : | 45 |
| 1. | Choix et description des composants de la carte réalisée : | 45 |
| 1.1. | Interrupteur de commutation « MOSFET » : | 45 |
| 1.2. | Bobine à tore ferrite : | 45 |
| 1.3. | Condensateur : | 46 |
| 1.4. | Circuit de commande du MOSFET « Driver IR2112 » : | 46 |
| 1.5. | Diode rapide : | 47 |
| 2. | Tests de la carte par logiciel Proteus : | 47 |
| 3. | La carte finale : | 49 |
| 4. | Routage de la carte : | 49 |
| 5. | Visualisations 3D : | 50 |
| IV. | Conclusion : | 54 |
| Conclusion générale | | 56 |
| Référence bibliographique : | | 58 |

Introduction générale

Introduction Générale

De nos jours, la production d'énergie constitue un défi majeur. Pendant longtemps, celle-ci a été principalement obtenue à partir de sources fossiles, entraînant ainsi un épuisement des ressources naturelles et des conséquences néfastes sur l'environnement et la vie des populations. Par conséquent, la recherche de nouvelles sources d'énergie inépuisables se présente comme une alternative essentielle. Parmi ces sources, on compte les énergies renouvelables telles que l'énergie solaire, éolienne, géothermique et hydraulique. Ces énergies sont réputées pour leur disponibilité abondante, leur caractère respectueux de l'environnement et leur durabilité à long terme. Cependant, leur coût relativement élevé constitue un obstacle majeur à leur exploitation généralisée. Parmi ces ressources renouvelables, l'énergie photovoltaïque solaire semble jouer un rôle prépondérant dans la production d'électricité à l'avenir. Les systèmes photovoltaïques permettent la conversion directe de la lumière solaire en énergie électrique, offrant ainsi la possibilité d'exploiter l'énergie solaire dans divers domaines. Ces systèmes offrent de nombreux avantages tels que la production d'électricité silencieuse, propre, non polluante, sans émission de gaz à effet de serre, renouvelable, fiable et facilement entretenue. Ces avantages font des systèmes photovoltaïques une solution compétitive dans de nombreuses applications, notamment le pompage, l'irrigation, les communications et les signalisations lumineuses. L'utilisation de l'énergie photovoltaïque revêt une importance primordiale pour de nombreux pays situés dans des régions tropicales et tempérées. Dans les systèmes photovoltaïques autonomes, les batteries rechargeables sont largement utilisées pour stocker l'excédent d'énergie et alimenter des charges de faible à moyenne puissance. Cependant, ces batteries sont sensibles à la surcharge, à la décharge profonde, aux variations de température et aux dégradations actuelles, nécessitant une attention particulière lors de la gestion de la charge et de la décharge. Dans ce contexte général, notre étude se concentre sur le secteur photovoltaïque et vise principalement à modéliser, simuler et réaliser un prototype de régulateur d'énergie pour un système photovoltaïque autonome composé de panneaux solaires, de batteries et de charges. Le mode de charge en trois phases, qui est basé sur le signal MLI (Modulation de Largeur d'Impulsion) contrôlant un convertisseur abaisseur, est utilisé pour optimiser la charge de la batterie. Ce mode de charge permet également l'intégration de fonctions de surveillance, de contrôle et de protection de la batterie, dans le but d'améliorer sa durée de vie. Nous avons utilisé le logiciel Proteus pour concevoir un circuit imprimé détaillé du convertisseur Buck MLI, en discutant des différentes parties de la carte de puissance. Enfin, nous avons réalisé des tests sous le logiciel Proteus afin de valider nos résultats.

**Chapitre I : Généralité sur
les systèmes photovoltaïques
autonomes et les différents types
de convertisseurs utilisés dans
ces systèmes**

Chapitre I : Généralité sur les systèmes photovoltaïques autonomes et les différents types de convertisseurs utilisés dans ces systèmes

Chapitre I : Généralité sur les systèmes photovoltaïques autonomes et les différents types de convertisseurs utilisés dans ces systèmes

I. Introduction

Les systèmes photovoltaïques autonomes sont devenus une solution populaire pour la production d'électricité propre et renouvelable dans les endroits éloignés, déconnectés du réseau électrique ou dans des applications mobiles. Ces systèmes utilisent l'énergie solaire captée par des panneaux photovoltaïques pour générer de l'électricité, qui est ensuite stockée dans des batteries ou utilisée directement pour alimenter des équipements électriques. Ils offrent une alternative fiable et durable aux systèmes traditionnels basés sur les combustibles fossiles. Dans ce document, nous examinerons les généralités sur les systèmes photovoltaïques autonomes, ainsi que les différents types de convertisseurs utilisés dans ces systèmes. Nous commencerons par une brève introduction aux systèmes photovoltaïques autonomes, en expliquant leurs principaux composants et leur fonctionnement global. Ensuite, nous nous concentrerons sur les convertisseurs, qui jouent un rôle essentiel dans la conversion, le contrôle et la gestion de l'énergie dans ces systèmes. [1]

1. Généralité sur les systèmes photovoltaïques autonomes :

1.1. Composants d'un système photovoltaïque autonome :

Un système photovoltaïque autonome se compose de plusieurs éléments clés. Chacun de ces composants joue un rôle essentiel dans la conversion de l'énergie solaire en électricité et dans la fourniture d'une source d'énergie durable et fiable. Explorons en détail les différents composants d'un système photovoltaïque autonome : [2]

1.2. Panneaux photovoltaïques :

Les panneaux photovoltaïques sont responsables de la conversion de l'énergie solaire en électricité. Ils sont généralement composés de cellules photovoltaïques en silicium, qui génèrent un courant continu (DC) lorsqu'elles sont exposées à la lumière du soleil. Les cellules photovoltaïques contiennent des matériaux semi-conducteurs qui absorbent les photons du rayonnement solaire et libèrent des électrons, créant ainsi un courant électrique. Les panneaux photovoltaïques sont conçus pour capturer et convertir efficacement l'énergie solaire en électricité. [2]

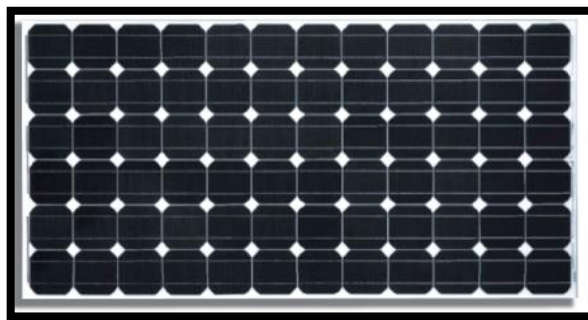


Figure I.1 : Panneau solaire 300W 24V monocristalline.

Chapitre I : Généralité sur les systèmes photovoltaïques autonomes et les différents types de convertisseurs utilisés dans ces systèmes

1.3. Régulateur de charge :

Un régulateur de charge est utilisé pour contrôler la charge des batteries dans un système photovoltaïque autonome. Son rôle principal est de surveiller la tension des batteries et de réguler le courant provenant des panneaux solaires pour éviter une surcharge ou une décharge excessive des batteries. Un régulateur de charge permet d'optimiser la durée de vie des batteries en assurant une charge appropriée et en évitant les conditions qui pourraient les endommager. Il existe différents types de régulateurs de charge, tels que les régulateurs de charge à commutation PWM (Pulse With Modulation) et les régulateurs de charge à commutation MPPT (Maximum Power Point Tracking).

1.4. Batteries :

Les batteries jouent un rôle crucial dans un système photovoltaïque autonome, car elles stockent l'électricité produite par les panneaux solaires. Elles sont utilisées pour stocker l'énergie lorsque la demande est faible ou lorsque le soleil ne brille pas, afin de pouvoir la rendre disponible lorsque la demande d'énergie est élevée. Les batteries peuvent être de différents types, tels que les batteries au plomb-acide, les batteries au lithium-ion et les batteries à flux. Le choix de la batterie dépend des besoins énergétiques du système, tels que :

La capacité d'une batterie solaire indique la quantité d'énergie qu'elle peut stocker. Ses valeurs sont généralement exprimées soit en kilowattheures (kWh), soit en ampères-heures (Ah). La batterie peut stocker plus d'énergie en raison de sa capacité plus élevée.

La tension à laquelle une batterie solaire est conçue pour fonctionner est connue sous le nom de tension nominale. Les tensions nominales des batteries solaires peuvent être de 12 Volts, 24 Volts ou 48 Volts.

La tension que la batterie reçoit pendant le processus de charge est connue sous le nom de tension de charge. Le type de batterie et les recommandations du fabricant déterminent cela. Une tension de charge inappropriée pourrait endommager la batterie.

Le courant de charge est le courant électrique appliqué à la batterie pendant le processus de charge. Pour éviter d'endommager la batterie, il est crucial de respecter les spécifications du fabricant en ce qui concerne la charge maximale.

L'état de charge de la batterie solaire (SOC) est le pourcentage d'énergie actuellement stockée dans la batterie solaire. Un état de charge élevé indique que la batterie est complètement chargée, tandis qu'un état de charge faible signifie que la batterie est déchargée.

L'état de santé (SOH) d'une batterie solaire reflète son état réel par rapport à sa capacité nominale. Il est influencé par des facteurs tels que l'âge de la batterie, le nombre de cycles de charge-décharge, etc.

Chapitre I : Généralité sur les systèmes photovoltaïques autonomes et les différents types de convertisseurs utilisés dans ces systèmes



Figure I.2 : Exemple sur les Batteries.

1.5. Convertisseurs :

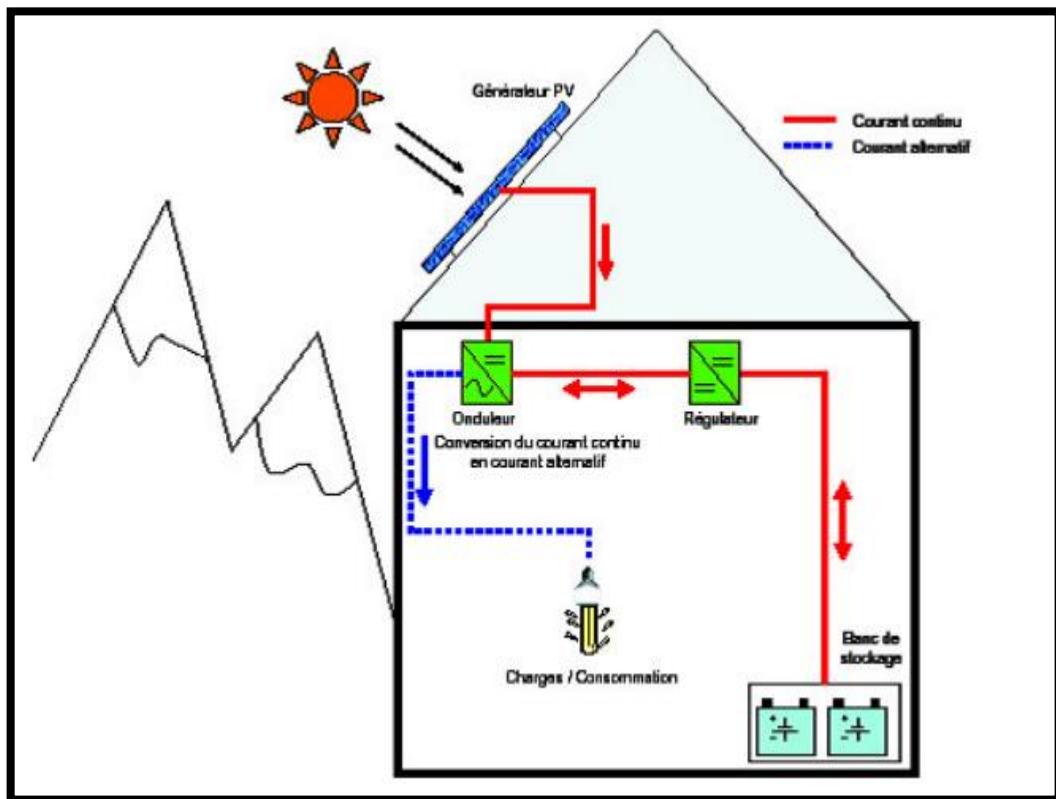
Un convertisseur est responsable de la conversion du courant continu (DC) produit par les panneaux solaires en courant alternatif (AC) utilisable. La plupart des appareils électriques fonctionnent avec du courant alternatif, il est donc nécessaire de convertir le courant continu en courant alternatif pour les alimenter. Les convertisseurs peuvent être de différents types, tels que les onduleurs à onde sinusoïdale pure (TrueSinewaveInverters) et les onduleurs à onde sinusoïdale modifiée (ModifiedSinewaveInverters). Les onduleurs à onde sinusoïdale pure produisent un courant alternatif de haute qualité, similaire à celui fourni par le réseau électrique, tandis que les onduleurs à onde sinusoïdale modifiée produisent un courant alternatif avec des imperfections.

1.6. Système de surveillance :

Un système de surveillance est utilisé pour surveiller les performances du système photovoltaïque autonome. Il permet de mesurer la production d'énergie solaire, de surveiller le niveau de charge des batteries, de contrôler les paramètres importants tels que la tension et le courant, et de détecter toute anomalie ou dysfonctionnement. Un système de surveillance fournit des informations précieuses sur le fonctionnement du système, ce qui permet d'optimiser ses performances et de détecter rapidement les problèmes éventuels.

En conclusion, les composants d'un système photovoltaïque autonome travaillent en harmonie pour convertir l'énergie solaire en électricité utilisable. Les panneaux photovoltaïques captent l'énergie solaire, le régulateur de charge contrôle la charge des batteries, les batteries stockent l'énergie, le convertisseur convertit le courant continu en courant alternatif, et le système de surveillance permet de surveiller et d'optimiser les performances du système. La combinaison de ces composants permet d'établir un système photovoltaïque autonome fiable, durable et respectueux de l'environnement.

Chapitre I : Généralité sur les systèmes photovoltaïques autonomes et les différents types de convertisseurs utilisés dans ces systèmes



Figures I.3 : Exemple de la structure d'un système PV autonome

2. Fonctionnement d'un système photovoltaïque autonome :

Le fonctionnement d'un système photovoltaïque autonome est relativement simple. Ce système utilise l'énergie solaire pour générer de l'électricité, offrant ainsi une source d'énergie propre et renouvelable. Explorons en détail le fonctionnement des différents éléments d'un système photovoltaïque autonome :

2.1. Conversion de la lumière en électricité :

Lorsque la lumière du soleil frappe les panneaux photovoltaïques, les cellules photovoltaïques présentes à l'intérieur des panneaux convertissent cette lumière en électricité. Ces cellules photovoltaïques sont généralement composées de couches de silicium qui ont la capacité de générer un courant électrique lorsqu'elles sont exposées à la lumière. L'énergie solaire est ainsi transformée en courant continu (DC).[2]

Chapitre I : Généralité sur les systèmes photovoltaïques autonomes et les différents types de convertisseurs utilisés dans ces systèmes

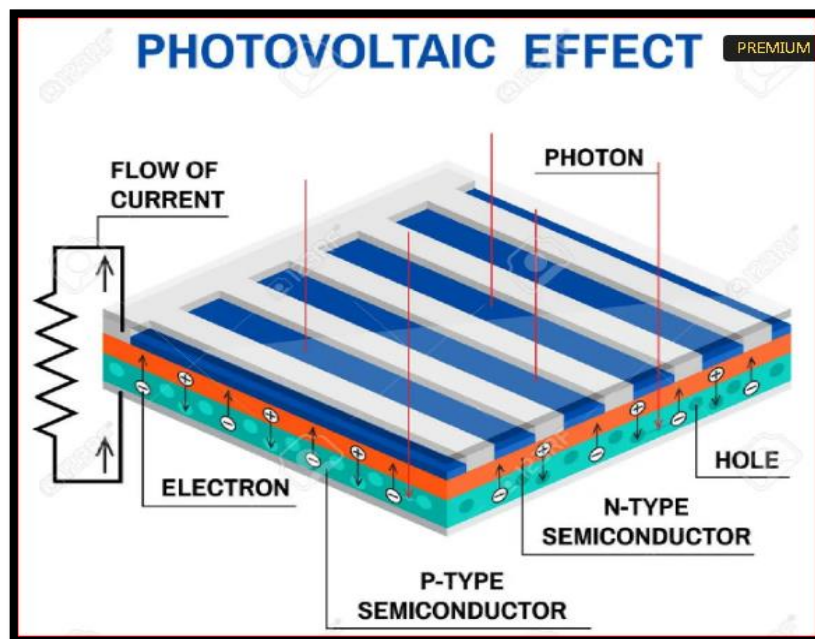


Figure I.4: schéma simplifié d'un Processus de conversion de la lumière en électricité au niveau d'une cellule PV (L'effet photovoltaïque).

2.2. Régulation de la charge :

L'électricité produite par les panneaux solaires est acheminée vers le régulateur de charge. Le rôle du régulateur de charge est de contrôler la quantité d'énergie envoyée aux batteries. Il surveille la tension des batteries et régule le courant provenant des panneaux solaires pour éviter une surcharge ou une décharge excessive des batteries. Cela permet de prolonger la durée de vie des batteries et de garantir leur bon fonctionnement.

2.3. Stockage de l'électricité :

Les batteries jouent un rôle crucial dans un système photovoltaïque autonome. Elles stockent l'électricité produite par les panneaux solaires. Lorsque l'énergie est nécessaire, les batteries la libèrent pour alimenter les convertisseurs. Les batteries peuvent stocker l'électricité pendant les périodes de forte production solaire et la rendre disponible lorsque la demande d'énergie est élevée ou lorsque le soleil ne brille pas, assurant ainsi une alimentation constante.

2.4. Conversion du courant continu en courant alternatif :

Les convertisseurs sont responsables de la conversion du courant continu (DC) stocké dans les batteries en courant alternatif (AC) utilisable par les appareils électriques. La plupart des appareils domestiques et électroniques fonctionnent avec du courant alternatif. Les convertisseurs assurent donc la conversion nécessaire pour alimenter ces appareils. Les onduleurs à onde sinusoïdale pure (TrueSineWaveInverters) sont préférés, car ils produisent un courant alternatif de haute qualité, similaire à celui fourni par le réseau électrique.

Chapitre I : Généralité sur les systèmes photovoltaïques autonomes et les différents types de convertisseurs utilisés dans ces systèmes

2.5. Surveillance du système :

Le système de surveillance est un élément essentiel d'un système photovoltaïque autonome. Il permet de surveiller en temps réel les performances du système. Le système de surveillance collecte des données sur la production d'énergie solaire, le niveau de charge des batteries, les conditions environnementales (température, ensoleillement, etc.) et d'autres paramètres importants. Ces informations permettent de suivre l'efficacité du système, de détecter les éventuelles pannes ou dysfonctionnements, et de prendre des mesures correctives si nécessaire.

En conclusion, le fonctionnement d'un système photovoltaïque autonome repose sur la conversion de la lumière solaire en électricité par les panneaux photovoltaïques. Cette électricité est ensuite régulée, stockée dans les batteries et convertie en courant alternatif pour alimenter les appareils électriques. Un système de surveillance permet de surveiller en temps réel les performances du système. L'utilisation de l'énergie solaire dans un système photovoltaïque autonome offre une solution durable, respectueuse de l'environnement et permettant une indépendance énergétique.

3. Applications des systèmes photovoltaïques autonomes :

Pour répondre aux besoins énergétiques dans diverses applications, ces systèmes offrent une solution pratique et durable. Quelques-unes des utilisations les plus courantes des systèmes photovoltaïques autonomes sont les suivantes :

3.1. Électrification rurale :

Dans les zones rurales éloignées où l'accès à l'électricité du réseau est limité ou inexistant, les systèmes photovoltaïques autonomes sont fréquemment utilisés. Ces systèmes peuvent alimenter des maisons, des écoles, des centres de santé et des infrastructures communautaires, fournissant de l'éclairage, des appareils électriques de base et des possibilités de recharge de téléphones portables.



Figure I.5: Exemple sur l'application de système PV autonome dans les zones rurales éloignées

Chapitre I : Généralité sur les systèmes photovoltaïques autonomes et les différents types de convertisseurs utilisés dans ces systèmes

3.2. Pompes solaires :

Dans les régions où l'approvisionnement en eau est limité, les pompes solaires utilisent l'énergie solaire pour alimenter les pompes à eau. L'irrigation agricole, l'approvisionnement en eau potable dans les régions reculées et les systèmes d'adduction d'eau sont tous des applications courantes de ces systèmes.



Figure I.6: Exemple sur l'application de système PV autonome en pompage d'eau

3.3. Stations de télécommunications :

Les systèmes photovoltaïques autonomes alimentent fréquemment les équipements de communication des stations de télécommunications, en particulier dans les zones éloignées. En fournissant une alimentation continue aux tours cellulaires, aux antennes relais et aux équipements de communication, ces systèmes permettent à des zones isolées de rester connectées.



Figure I.7 : Exemple sur l'application de système PV autonome en stations de télécommunications.

Chapitre I : Généralité sur les systèmes photovoltaïques autonomes et les différents types de convertisseurs utilisés dans ces systèmes

3.4. Éclairage public solaire :

Dans les villes et les zones urbaines, les systèmes d'éclairage public solaire sont largement utilisés pour éclairer les rues, les parcs, les pistes cyclables et d'autres espaces publics. Les lampadaires solaires intègrent des panneaux solaires et des batteries pour fournir un éclairage efficace et écologique pendant la journée et le libérer la nuit.



Figure I.8 : L'application des système PV autonome en l'éclairage public.

3.5. Applications mobiles :

Les systèmes photovoltaïques autonomes peuvent être intégrés dans des applications mobiles comme les véhicules de loisirs, les bateaux, les caravanes et les installations temporaires. Ils offrent une source d'énergie portable et autonome pour répondre aux besoins énergétiques lors des déplacements.



Figure I.9 : Bateau autonome.

Ces exemples démontrent l'utilité et la polyvalence des systèmes photovoltaïques autonomes dans divers domaines. Ils fournissent une source d'énergie propre, renouvelable et fiable, contribuant à la réduction de l'empreinte carbone et à la promotion du développement durable.

Chapitre I : Généralité sur les systèmes photovoltaïques autonomes et les différents types de convertisseurs utilisés dans ces systèmes

4. Avantages d'un système photovoltaïque autonome :

En effet, l'énergie solaire autonome présente des avantages environnementaux importants en termes de réduction des émissions de gaz à effet de serre et de préservation des ressources naturelles. Voici plus d'informations sur ces avantages :

- **Energie renouvelable et propre :** L'énergie solaire est une source d'énergie renouvelable et respectueuse de l'environnement utilisée par les systèmes photovoltaïques autonomes. Ils jouent un rôle dans la réduction des émissions de gaz à effet de serre et dans la lutte contre le changement climatique.
- **Indépendance énergétique :** Les systèmes photovoltaïques autonomes produisent de l'électricité localement, réduisant ainsi notre dépendance aux réseaux électriques conventionnels. Cela est particulièrement utile dans les régions éloignées où l'électricité est rare ou coûteuse.
- **Réduction des coûts énergétiques :** les systèmes photovoltaïques autonomes peuvent réduire considérablement les factures d'électricité en utilisant l'énergie solaire gratuite. Ils offrent une solution économique à long terme, en particulier en période de hausse des prix de l'électricité.
- **Fiabilité et résilience :** En général, les systèmes photovoltaïques autonomes sont fiables et résilients. Même en cas de pannes de courant ou de coupures du réseau électrique, ils peuvent assurer une alimentation continue et stable.
- **L'installation des systèmes photovoltaïques autonomes :** est assez simple par rapport aux systèmes raccordés au réseau. Ils peuvent être adaptés à une variété de configurations et de tailles d'installation et nécessitent moins de travaux d'infrastructure.

II. Problématiques liées aux systèmes autonomes :

Une variété de problèmes et de fautes peut affecter le fonctionnement et l'efficacité des systèmes photovoltaïques autonomes. Afin de maintenir les performances optimales du système et de les résoudre efficacement, il est essentiel de comprendre ces problèmes. Voici une liste plus complète des problèmes et des défauts les plus courants rencontrés dans les systèmes photovoltaïques autonomes :[5]

1. Perte de performance des panneaux solaires :

Les panneaux solaires sont exposés à la saleté, à la poussière, aux débris et aux conditions météorologiques. Ces éléments peuvent réduire la quantité de lumière solaire captée en accumulant sur la surface des panneaux. Cela réduit la production électrique du système. Les panneaux solaires doivent être nettoyés régulièrement pour éliminer ces impuretés et maintenir leur efficacité.

Chapitre I : Généralité sur les systèmes photovoltaïques autonomes et les différents types de convertisseurs utilisés dans ces systèmes

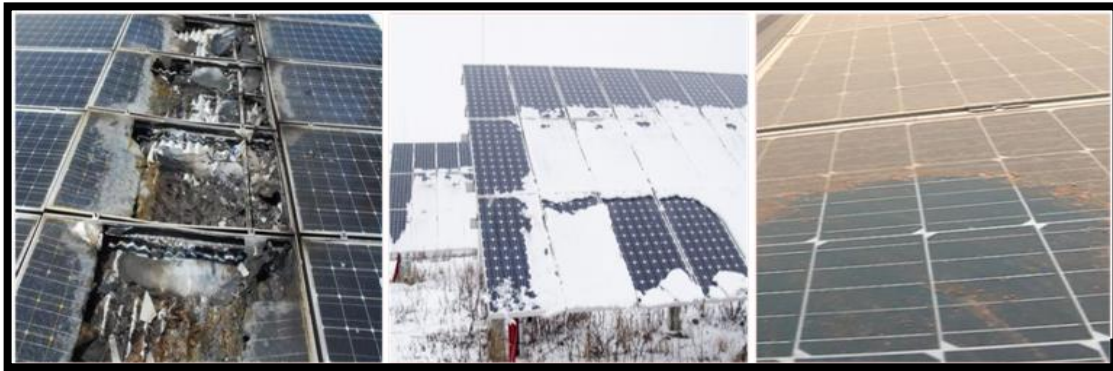


Figure I.10 : Exemple sur des panneaux solaires sont exposés à conditions météorologiques.

2. Vieillessement des batteries :

La durée de vie des accumulateurs est fortement influencée par leur utilisation, en particulier par le nombre de cycles de charge-décharge. Maintenir la batterie dans un état de charge supérieur à 50 % est essentiel pour garantir une durée de vie de 10 à 15 ans. Trois éléments clés affectent la durée de vie des batteries au plomb-acide :

- La durée de vie cyclique et la résistance aux températures élevées : sont des caractéristiques présentes dans toutes les applications des batteries. Les températures élevées et les cycles de charge et de décharge répétés peuvent réduire la durée de vie de la batterie. Par conséquent, il est crucial de choisir une batterie qui peut résister à ces conditions et de la surveiller régulièrement.
- Les effets de la sulfatation et les sous-charges sont les suivants : Ces éléments sont spécifiques aux applications liées aux panneaux photovoltaïques. Lorsque des cristaux de sulfate de plomb se forment sur les plaques de la batterie, la sulfatation se produit, réduisant ainsi la capacité de stockage d'énergie de la batterie. La sulfatation peut également être causée par des sous-charges fréquentes, c'est-à-dire ne pas recharger complètement la batterie. Pour éviter ces effets, il est crucial d'éviter les sous-charges et de maintenir la batterie correctement chargée.
- Facteurs catastrophiques : Des sous-dimensionnements, des utilisations abusives, des défauts de fabrication et du gel peuvent réduire considérablement la durée de vie de la batterie. En choisissant des batteries de qualité, en les dimensionnant correctement et en les utilisant conformément aux spécifications du fabricant, il est crucial d'éviter ces situations.

Chapitre I : Généralité sur les systèmes photovoltaïques autonomes et les différents types de convertisseurs utilisés dans ces systèmes

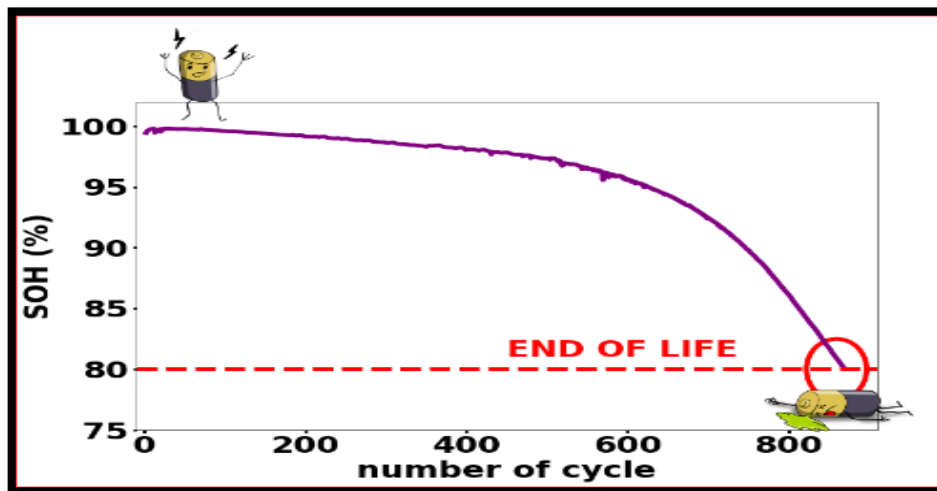


Figure I.11 : La courbe d'évolution de l'état de santé d'une batterie par sa capacité de stockage tout au long de sa durée de vie.

En résumé, pour prolonger la durée de vie des batteries dans les systèmes photovoltaïques autonomes, il est crucial de maintenir un niveau de charge supérieur à 50 %, de surveiller régulièrement l'état de la batterie, d'éviter les sous-charges, de choisir des batteries adaptées à l'utilisation et d'éviter toute surcharge ou utilisation excessive. En prenant ces mesures, les systèmes photovoltaïques autonomes peuvent prolonger efficacement la durée de vie des batteries.

3. Perte de conversion :

La conversion de l'énergie solaire en électricité utilisable est effectuée par les convertisseurs utilisés dans les systèmes photovoltaïques autonomes. Cependant, pendant le processus de conversion, ces convertisseurs peuvent présenter des pertes d'efficacité. Des pertes supplémentaires peuvent également survenir lors de la conversion de la tension ou du courant pour répondre aux besoins spécifiques des charges électriques. Il est crucial d'utiliser des convertisseurs de haute qualité et de concevoir le système de manière à réduire ces pertes.

4. Instabilité de la tension ou du courant :

L'instabilité de la tension ou du courant dans un système photovoltaïque (PV) autonome peut être causée par plusieurs facteurs. Voici quelques défauts courants liés à l'instabilité de la tension ou du courant dans un tel système :

- Variation de la radiation solaire : Les systèmes PV autonomes dépendent de la lumière solaire pour générer de l'électricité. Si la radiation solaire varie de manière significative, cela peut entraîner des variations de la tension ou du courant générés par les panneaux solaires.
- Variation de la température : Les performances des panneaux solaires peuvent être affectées par les changements de température. Une augmentation de la température

Chapitre I : Généralité sur les systèmes photovoltaïques autonomes et les différents types de convertisseurs utilisés dans ces systèmes

peut entraîner une diminution de l'efficacité de conversion de l'énergie solaire en électricité, ce qui peut entraîner une instabilité de la tension ou du courant.

- Défauts des panneaux solaires : Des problèmes tels que des cellules solaires défectueuses, des connexions lâches ou des panneaux endommagés peuvent entraîner des variations de la tension ou du courant. Par exemple, une cellule solaire défectueuse peut provoquer une baisse de la tension de sortie du panneau solaire.
- Mauvaise conception du système : Une conception inadéquate du système PV, telle qu'une taille inappropriée des panneaux solaires ou des composants sous-dimensionnés, peut entraîner des problèmes d'instabilité de la tension ou du courant.

Il est essentiel de noter que ces défauts peuvent être évités ou minimisés grâce à une conception soignée, une installation correcte, une maintenance régulière et des composants de qualité dans le système PV autonome.

5. Maintenance et suivi insuffisants :

Maintenance et suivi insuffisants : Une maintenance régulière est essentielle pour assurer un fonctionnement fiable du système photovoltaïque autonome. Cela comprend le nettoyage régulier des panneaux solaires, la vérification des connexions électriques, le remplacement des composants défectueux, etc. En addition, le suivi des performances du système, la surveillance des données en temps réel et l'identification précoce des problèmes sont importants pour prévenir les défauts potentiels et assurer une efficacité maximale du système.

III. Types de convertisseurs utilisés dans la chaîne photovoltaïque autonomes :

1. Rôle des convertisseurs dans les systèmes photovoltaïques autonomes :

Les systèmes photovoltaïques autonomes sont devenus une solution populaire pour la production d'énergie électrique à partir de sources renouvelables. Au cœur de ces systèmes se trouvent les convertisseurs, qui jouent un rôle crucial dans la conversion et la gestion de l'énergie solaire. Dans ce texte, nous explorerons en détail le rôle des convertisseurs dans les systèmes photovoltaïques autonomes, en mettant l'accent sur leur capacité à convertir le courant continu (DC) en courant alternatif (AC) et à assurer le contrôle et la gestion efficaces de l'énergie.

1.1. Conversion du courant continu (DC) en courant alternatif (AC) :

Les panneaux solaires produisent un courant continu (DC) à partir de l'énergie solaire captée. Cependant, la plupart des appareils électriques et des équipements domestiques fonctionnent avec du courant alternatif (AC). C'est là que les convertisseurs entrent en jeu. Leur rôle principal est de convertir le courant continu (DC) produit par les panneaux solaires en courant alternatif (AC) utilisable pour alimenter les appareils électriques. Cette conversion permet d'utiliser efficacement l'énergie solaire produite par les panneaux photovoltaïques.

Chapitre I : Généralité sur les systèmes photovoltaïques autonomes et les différents types de convertisseurs utilisés dans ces systèmes

1.2. Contrôle et gestion de l'énergie :

Les convertisseurs assurent également le contrôle et la gestion de l'énergie dans les systèmes photovoltaïques autonomes. Ils régulent la tension et la fréquence du courant alternatif (AC) en fonction des besoins des appareils électriques connectés au système. Cela garantit que les appareils reçoivent une alimentation électrique stable et adaptée à leurs exigences. Les convertisseurs surveillent en permanence les paramètres électriques du système, tels que la tension, la fréquence et la qualité du courant, afin de maintenir des conditions de fonctionnement optimales.

1.3. Gestion de la charge des batteries :

Dans les systèmes photovoltaïques autonomes, les batteries jouent un rôle essentiel dans le stockage de l'énergie solaire pour une utilisation ultérieure, notamment pendant les périodes de faible ensoleillement ou la nuit. Les convertisseurs sont responsables de la gestion de la charge des batteries. Ils surveillent en permanence le niveau de charge des batteries et ajustent la conversion du courant continu (DC) en courant alternatif (AC) en conséquence. L'objectif est d'optimiser l'utilisation de l'énergie stockée dans les batteries, en évitant la surcharge ou la décharge excessive, ce qui contribue à prolonger la durée de vie des batteries et à garantir une alimentation fiable.

Enfin, les convertisseurs jouent un rôle crucial dans les systèmes photovoltaïques autonomes. Ils sont responsables de la conversion du courant continu (DC) produit par les panneaux solaires en courant alternatif (AC) utilisable pour alimenter les appareils électriques. De plus, ils assurent le contrôle et la gestion efficaces de l'énergie dans le système, en régulant la tension et la fréquence du courant alternatif (AC) en fonction des besoins des appareils électriques connectés. Ils surveillent également le niveau de charge des batteries et ajustent la conversion en conséquence pour optimiser l'utilisation de l'énergie stockée. Une conception appropriée et une utilisation efficace des convertisseurs sont essentielles pour assurer le bon fonctionnement et la performance optimale des systèmes photovoltaïques autonomes.

2. Différents types de convertisseurs utilisés dans les systèmes photovoltaïques autonomes :

Dans la chaîne photovoltaïque autonome, différents types de convertisseurs sont utilisés pour gérer et réguler l'énergie électrique produite par les panneaux solaires. Ces convertisseurs jouent un rôle essentiel dans la gestion de l'énergie électrique, optimisant l'efficacité de conversion et assurant une alimentation stable. Examinons les principaux types de convertisseurs utilisés dans les systèmes photovoltaïques autonomes :

2.1. Convertisseurs DC-DC : (Maximisant l'efficacité des systèmes photovoltaïques autonomes)

Les convertisseurs DC-DC jouent un rôle essentiel dans les systèmes photovoltaïques autonomes en convertissant la tension continue produite par les panneaux solaires à un niveau approprié pour la charge de la batterie ou l'alimentation des charges électroniques. Ils assurent une adaptation optimale entre la source d'énergie solaire et les composants du système, ce qui permet de maximiser l'efficacité globale de la chaîne photovoltaïque

Chapitre I : Généralité sur les systèmes photovoltaïques autonomes et les différents types de convertisseurs utilisés dans ces systèmes

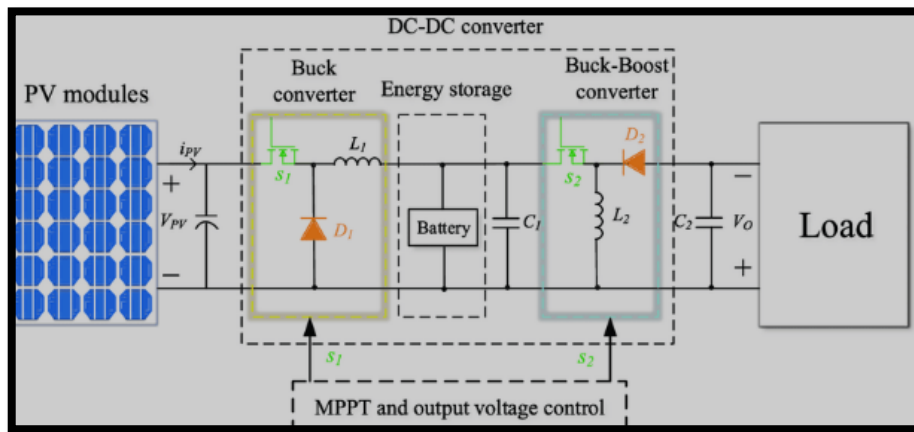


Figure I.12 : Convertisseur DC/DC connecté au système PV.

L'une des principales fonctions des convertisseurs DC-DC est de gérer les variations de tension causées par les fluctuations de l'ensoleillement. Les panneaux solaires produisent une tension continue qui peut varier en fonction de la quantité de lumière solaire disponible. Pour garantir un fonctionnement stable du système, il est essentiel d'adapter cette tension à des niveaux appropriés pour la charge de la batterie et l'alimentation des charges électroniques. Les convertisseurs DC-DC permettent cette adaptation en régulant et en contrôlant la tension continue selon les besoins du système.

Il existe différents types de convertisseurs DC-DC utilisés dans les systèmes photovoltaïques autonomes, en fonction des besoins spécifiques du système.

2.2. Convertisseurs DC-AC : (Rendre l'énergie solaire utilisable)

Les convertisseurs DC-AC, également connus sous le nom d'onduleurs, jouent un rôle essentiel dans les systèmes photovoltaïques autonomes en convertissant l'énergie de type continue stockée dans la batterie en énergie alternative pour alimenter les charges électroniques. Ces convertisseurs permettent de rendre l'énergie solaire utilisable dans les foyers et les installations électriques, car la plupart des équipements domestiques et des appareils électroniques fonctionnent avec du courant alternatif (AC).

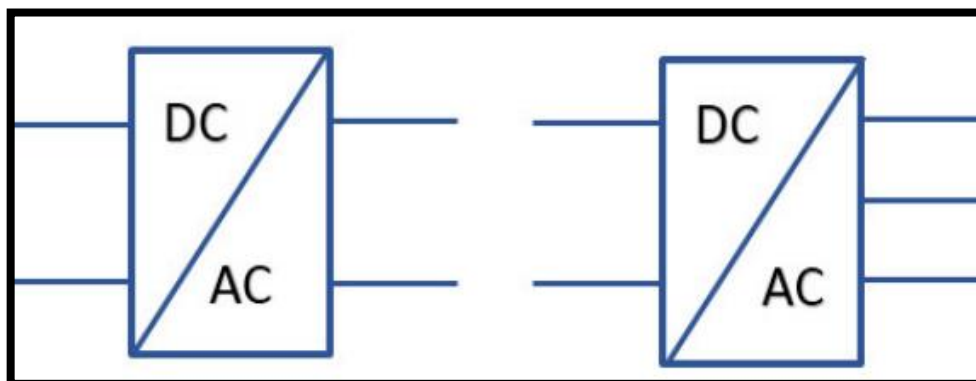


Figure I.13 : symbole de convertisseur DC/AC monophasé et triphasé

Chapitre I : Généralité sur les systèmes photovoltaïques autonomes et les différents types de convertisseurs utilisés dans ces systèmes

Le rôle principal des convertisseurs DC-AC est de convertir la tension continue de la batterie en une tension alternative de qualité suffisante pour alimenter les charges AC. La conversion est réalisée par une combinaison de techniques de modulation de largeur d'impulsion (PWM) et de filtrage pour obtenir une forme d'onde AC stable et utilisable.

Il existe différentes catégories d'onduleurs DC-AC en fonction de la qualité de l'onde de sortie. Les deux types principaux sont les onduleurs à onde sinusoïdale pure et les onduleurs à onde sinusoïdale modifiée.

Enfin, les convertisseurs DC-AC, ou onduleurs, sont essentiels dans les systèmes photovoltaïques autonomes pour convertir l'énergie continue stockée dans les batteries en énergie alternative utilisable. Ils permettent d'alimenter les charges électriques courantes et offrent une compatibilité avec les équipements domestiques. Les onduleurs à onde sinusoïdale pure et les onduleurs à onde sinusoïdale modifiée sont les types d'onduleurs les plus couramment utilisés, en fonction des exigences spécifiques du système et des charges à alimenter.

3. Avantage des convertisseurs dans les systèmes photovoltaïques autonomes :

Les convertisseurs jouent un rôle essentiel dans les systèmes photovoltaïques autonomes en offrant de nombreux avantages. Ils permettent une utilisation optimale de l'énergie solaire produite par les panneaux photovoltaïques en convertissant le courant continu (DC) en courant alternatif (AC) utilisable. Cette conversion est essentielle pour alimenter en électricité les appareils électriques et garantir un fonctionnement stable et fiable du système.

L'un des principaux avantages des convertisseurs est de fournir une alimentation électrique stable. Les appareils électriques courants fonctionnent généralement avec du courant alternatif, tandis que les panneaux solaires produisent du courant continu. Les convertisseurs permettent de convertir le courant continu en courant alternatif de la bonne tension et fréquence, ce qui permet d'alimenter directement les appareils électriques sans aucune interruption.

Un autre avantage important des convertisseurs dans les systèmes photovoltaïques autonomes est leur capacité à réguler la charge des batteries. Les batteries sont utilisées pour stocker l'énergie solaire produite pendant la journée, afin de l'utiliser lorsque les panneaux solaires ne génèrent pas suffisamment d'électricité, comme la nuit ou par temps nuageux. Les convertisseurs surveillent le niveau de charge des batteries et ajustent la conversion du courant continu en conséquence pour optimiser l'utilisation de l'énergie stockée. Cela prolonge la durée de vie des batteries et garantit une utilisation efficace de l'énergie.

En outre, les convertisseurs offrent une flexibilité dans la gestion de l'énergie dans les systèmes photovoltaïques autonomes. Ils peuvent être programmés pour fonctionner selon des modes spécifiques, tels que le mode de charge, le mode d'alimentation, ou le mode de secours. Ces modes permettent de répondre aux besoins énergétiques spécifiques du

Chapitre I : Généralité sur les systèmes photovoltaïques autonomes et les différents types de convertisseurs utilisés dans ces systèmes

système, en maximisant l'efficacité de conversion de l'énergie solaire et en optimisant l'utilisation de l'énergie stockée dans les batteries.

Les convertisseurs sont également conçus pour être efficaces sur le plan énergétique. Ils réduisent les pertes d'énergie lors de la conversion du courant continu en courant alternatif, ce qui permet d'optimiser l'utilisation de l'énergie solaire captée par les panneaux photovoltaïques. Une efficacité élevée des convertisseurs contribue à améliorer la performance globale du système et à maximiser la production d'électricité à partir de l'énergie solaire.

Enfin, les convertisseurs offrent plusieurs avantages dans les systèmes photovoltaïques autonomes. Ils permettent une utilisation optimale de l'énergie solaire en convertissant le courant continu en courant alternatif utilisable, garantissant ainsi une alimentation stable et fiable pour les appareils électriques. De plus, les convertisseurs régulent la charge des batteries, prolongeant ainsi leur durée de vie et assurant une utilisation efficace de l'énergie stockée.

IV. Conclusion :

Les systèmes photovoltaïques autonomes jouent un rôle crucial dans la fourniture d'une source d'énergie durable et économique dans les endroits éloignés et déconnectés du réseau électrique. Ces systèmes permettent de convertir l'énergie solaire en électricité utilisable, offrant ainsi une solution pratique pour répondre aux besoins énergétiques des utilisateurs. Les convertisseurs jouent un rôle essentiel dans ces systèmes en permettant la conversion du courant continu produit par les panneaux solaires en courant alternatif utilisable, tout en assurant le contrôle et la gestion de l'énergie.

Les convertisseurs DC-DC jouent un rôle clé dans la régulation de la tension et du courant des panneaux solaires. Ils permettent d'adapter la tension continue produite par les panneaux à des niveaux appropriés pour la charge de la batterie et l'alimentation des charges électroniques. Grâce à ces convertisseurs, l'énergie solaire peut être efficacement captée et utilisée de manière optimale, maximisant ainsi l'efficacité globale du système photovoltaïque.

D'autre part, les convertisseurs DC-AC sont responsables de la conversion du courant continu stocké dans les batteries en courant alternatif utilisable pour alimenter les appareils électriques. Ces convertisseurs permettent aux systèmes photovoltaïques autonomes de fournir une alimentation électrique fiable, compatible avec les besoins des utilisateurs. En choisissant des convertisseurs appropriés, il est possible de garantir une conversion efficace de l'énergie et une alimentation stable des appareils électriques.

Les systèmes photovoltaïques autonomes offrent de nombreux avantages, notamment la réduction de la dépendance aux combustibles fossiles, la diminution des émissions de gaz à effet de serre et la possibilité d'accéder à l'électricité dans des régions éloignées. Cependant, ils soulèvent également des questions complexes et multidimensionnelles.

Chapitre I : Généralité sur les systèmes photovoltaïques autonomes et les différents types de convertisseurs utilisés dans ces systèmes

Il est essentiel de prendre en compte les enjeux de fiabilité, de responsabilité juridique, d'impact sur l'emploi, de biais, de confidentialité et de protection des données liés à l'utilisation des systèmes autonomes. Une attention continue de la part des chercheurs, des décideurs politiques et de la société dans son ensemble est nécessaire pour aborder ces problématiques de manière proactive.

En développant et en améliorant constamment les technologies des systèmes photovoltaïques autonomes et des convertisseurs, nous pouvons promouvoir l'utilisation de l'énergie solaire comme une source d'énergie propre et durable. Cette transition vers un avenir énergétique plus écologique est cruciale pour atténuer les effets du changement climatique et assurer un avenir durable pour les générations futures.

En conclusion, les systèmes photovoltaïques autonomes et les différents types de convertisseurs utilisés dans ces systèmes offrent un potentiel immense pour répondre aux besoins énergétiques de manière durable et économique. Cependant, il est crucial de continuer à étudier et à résoudre les problématiques liées à ces systèmes, tout en garantissant une utilisation responsable et éthique des technologies autonomes. En tirant parti des avantages des systèmes autonomes tout en minimisant les risques, nous pouvons façonner un avenir énergétique plus propre et plus prospère.

Chapitre II :
Les Différentes Technologies
Des Régulateurs Solaires.

Chapitre II : Les Différentes Technologies Des Régulateurs Solaires.

I. Introduction :

En contrôlant le flux d'énergie des panneaux solaires, les régulateurs solaires, également appelés contrôleurs de charge solaire, jouent un rôle crucial dans les systèmes d'énergie solaire en assurant une régulation efficace de la charge de la batterie. Leur objectif principal est de maximiser l'efficacité et la longévité de la batterie.

Les régulateurs pour l'énergie solaire offrent une protection contre les effets nocifs causés par la surcharge ou la décharge excessive des batteries. Avec la régulation, ces appareils prolongent la durée de vie de la batterie et sont donc considérés comme essentiels pour tout système d'énergie solaire. La capacité à gérer intelligemment les charges électriques est une fonction cruciale des régulateurs solaires, empêchant les dommages permanents et garantissant un état optimal de la batterie.

II. Convertisseurs DC/DC :

Les convertisseurs DC-DC sont des appareils qui utilisent des commutations pour transférer une tension électrique d'un niveau à un autre. Leur efficacité par rapport aux régulateurs linéaires et leur petite taille contribuent à leur popularité. Ces convertisseurs sont largement utilisés pour fournir des tensions continues dans les ordinateurs personnels, les périphériques informatiques et les adaptateurs d'appareils électroniques, car ils ont une large gamme d'applications.

Ils sont principalement constitués de composants passifs, tels que des condensateurs et des inductances, ainsi que de composants de puissance, tels que les transistors et les diodes. En commutant l'interrupteur dans une direction spécifique à intervalles réguliers, ces composants modulent le courant du circuit de charge.

Les convertisseurs DC/DC peuvent être configurés de différentes manières. Ils sont classés en fonction de s'ils sont isolés ou non. Les topologies isolées utilisent un transformateur d'isolement à haute fréquence et sont fréquemment utilisées dans les alimentations à découpage. Pour des raisons de sécurité, ces topologies isolées sont souvent préférées aux systèmes de couplage avec le réseau électrique dans les applications photovoltaïques. Cependant, les topologies non isolées sont généralement utilisées dans les moteurs à courant continu car elles ne nécessitent pas de transformateurs d'isolement. Ces topologies non isolées sont ensuite divisées en trois catégories distinctes : abaisseur (Buck), élévateur (Boost) et abaisseur-élévateur.

Pour les tensions faibles, la topologie Buck est utilisée. Le convertisseur Buck est fréquemment utilisé dans les applications photovoltaïques comme chargeur de batteries et dans les systèmes de pompage d'eau. En revanche, la topologie Boost est utilisée pour augmenter la tension. Avant l'étage de l'onduleur, les systèmes de production d'énergie utilisent un convertisseur Boost pour augmenter la tension de sortie.

Enfin, il existe des topologies qui peuvent à la fois augmenter et diminuer la tension, comme le convertisseur Boost-Buck.

III. Mode de fonctionnement du convertisseur statique :

Le Dépendant De sa capacité de stockage d'énergie, de la période de commutation et de la Charge Ces deux modes sont : Convertisseur peut fonctionner suivant deux modes de fonctionnement.

1. Mode de Conduction Continue (MCC) :

Dans ce cas, l'énergie emmagasinée dans l'inductance L est transférée partiellement. Le courant dans l'inductance ne s'annule pas sur une période de commutation.

2. Mode de Conduction Discontinue (MCD) :

Dans ce cas, l'énergie emmagasinée dans l'inductance L est transférée totalement. Le courant dans l'inductance s'annule avant la fin d'une de commutation. [30]

IV. Les différents convertisseurs DC/DC :

Il existe plusieurs types de convertisseurs DC/DC, qui sont des dispositifs permettant de convertir une tension continue d'une valeur à une autre. Voici les principaux convertisseurs DC/DC : [21]

1. Convertisseur Boost (élevateur) :

Ou hacheur parallèle, est une alimentation à découpage qui convertit une tension continue en une autre tension continue de plus forte valeur.

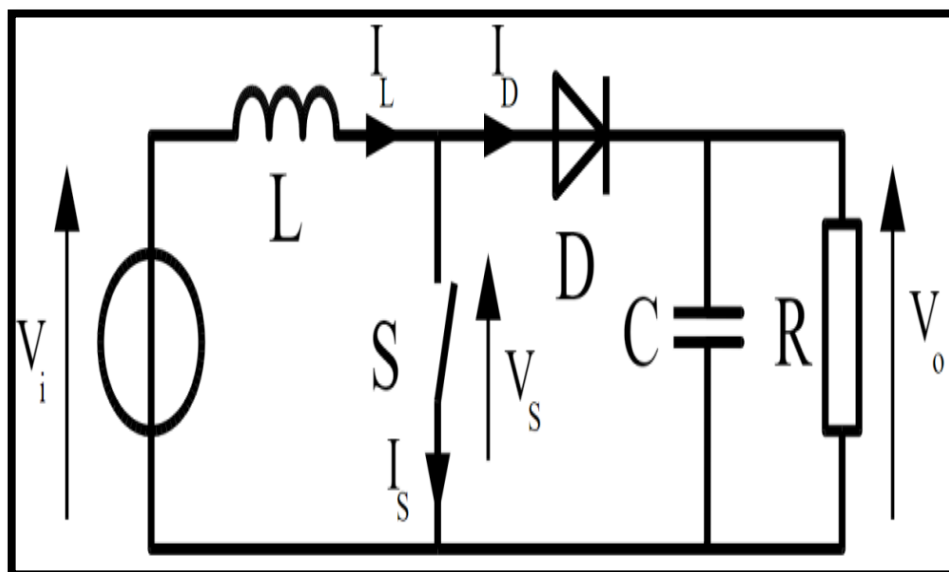


Figure II.1 Schéma de base d'un convertisseur Boost (élevateur).

1.1. Principe de fonctionnement :

En fonction de l'état de l'interrupteur S, le fonctionnement d'un convertisseur Boost peut être divisé en deux étapes distinctes.

Une étape d'accumulation d'énergie : Lorsque l'interrupteur S est fermé (état passant), l'inductance augmente, ce qui permet de stocker de l'énergie sous forme magnétique. La diode D est bloquée pendant cette phase et la charge est déconnectée de l'alimentation.

Lorsque l'interrupteur est ouvert, la bobine est reliée au générateur en série, ce qui entraîne une augmentation de la force électromotrice (f.é.m.) de la bobine par rapport à celle du générateur (effet de surtension). La diode D, le condensateur C et la charge R sont ensuite traversés par le courant qui traverse la bobine. En conséquence, l'énergie accumulée dans la bobine est transférée au condensateur.

- La figure II.2 montre les formes d'ondes de courant et de tension en mode de conduction continue.

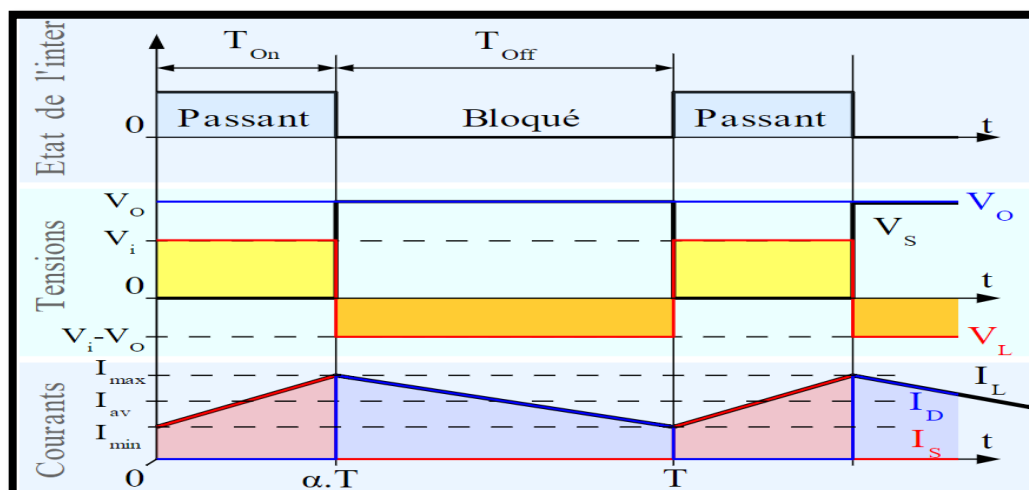


Figure II.2 Formes d'ondes du convertisseur Boost(élévateur).

1.2. Applications :

Un convertisseur Boost peut être utilisé pour augmenter la tension d'une source continue. Il est courant d'utiliser plusieurs accumulateurs en série pour obtenir une tension suffisamment élevée dans les systèmes alimentés par des batteries d'accumulateurs. Cependant, il n'est pas toujours possible d'avoir un nombre suffisant d'accumulateurs en raison de contraintes d'espace fréquentes. Dans de telles situations, un convertisseur Boost est utilisé pour augmenter la tension fournie par les batteries, réduisant ainsi le nombre d'accumulateurs nécessaires pour atteindre le niveau de tension souhaité. Dans des domaines tels que les véhicules hybrides et les systèmes d'éclairage, les convertisseurs Boost sont couramment utilisés. L'utilisation de convertisseurs Boost dans des applications de faible puissance telles que les systèmes d'éclairage portatifs en est un exemple typique.

Les convertisseurs Boost peuvent produire des tensions beaucoup plus élevées pour alimenter plusieurs dispositifs, comme les tubes à cathode froide utilisés dans le rétro-éclairage des écrans LCD ou les flashes des appareils photo.

2. Convertisseur Buck(abaisseur) :

Un convertisseur Buck, également connu sous le nom d'hacheur série, est une alimentation à découpage capable de convertir une tension continue en une tension continue inférieure.

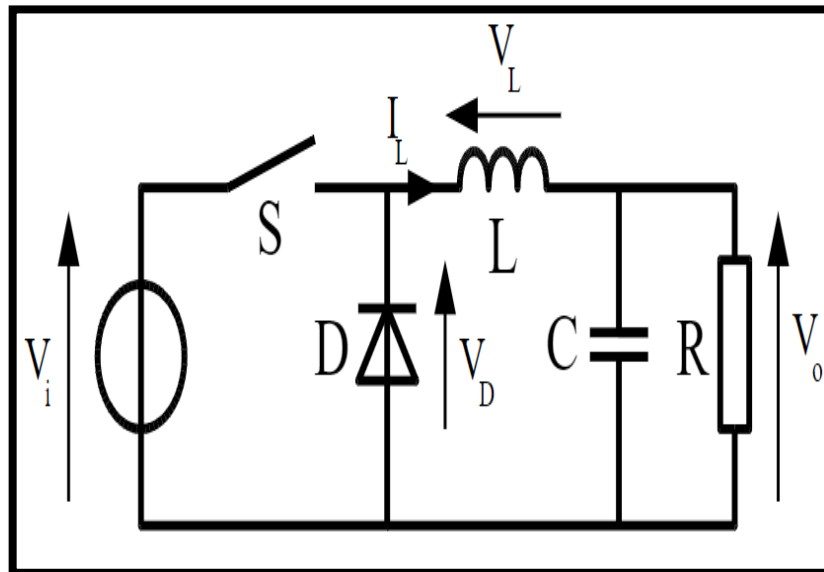


Figure II.3 : Schéma de base d'un convertisseur Buck(abaisseur).

2.1. Principe de fonctionnement :

Comme indiqué dans la Figure I.5, il existe deux configurations possibles pour décrire le fonctionnement d'un convertisseur Buck en fonction de l'état de l'interrupteur S :

- Lorsque l'interrupteur S est en position "passante", il est fermé, ce qui crée une tension aux bornes d'inductance. Le courant qui passe par l'inductance augmente de manière linéaire. En raison de sa tension négative, aucun courant ne traverse la diode.
 - L'interrupteur S est ouvert lorsqu'il est en position "bloquée". Pour garantir la continuité du courant dans l'inductance, la diode devient alors conductrice. La tension aux bornes de l'inductance ne change pas.
 - L'inductance réduit le courant qui traverse.
- Les formes d'ondes de courant et de tension sont représentées à la figure II.4 lorsque ce convertisseur fonctionne en mode de conduction continue.

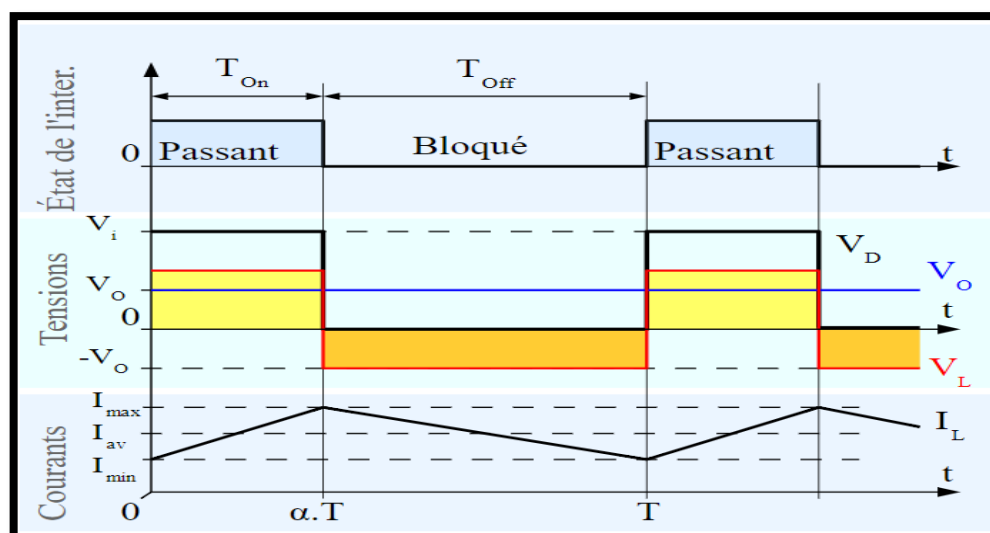


Figure II.4. Formes d'ondes du convertisseur Buck (abaisseur).

2.2. Applications :

Il existe deux catégories principales d'applications utilisent ce type de convertisseur. En premier lieu, il est utilisé pour générer une tension continue fixe (et parfois réglée) à partir d'un générateur de tension continue supérieur. Par exemple, il peut convertir la tension 12-24V d'une batterie d'ordinateur portable en une tension inférieure nécessaire au fonctionnement du processeur.

De plus, il a la capacité de transformer la tension alternative du secteur en une tension continue fixe. Ensuite, il est utilisé comme un variateur de tension continue dans des applications qui nécessitent une tension réglable mais toujours inférieure à celle présente à l'entrée. Il est crucial que l'impédance interne du système créé pour ces deux applications soit faible, de l'ordre de grandeur de celle du générateur qui alimente le dispositif. Cela exclut l'utilisation d'un diviseur de tension, qui dissiperait la chaleur de l'excès de tension et aurait un faible rendement, ce qui est inacceptable pour les applications d'électronique de puissance.

Un convertisseur Buck bien conçu offre un rendement élevé (jusqu'à 95 %) et une tension de sortie réglable.

3. Convertisseur Buck-Boost (abaisseur-élevateur) :

Un convertisseur Buck-Boost est un type d'alimentation à découpage qui transforme une tension continue dans une autre tension continue de valeur plus faible ou plus élevée, mais avec une polarité inverse. Cependant, l'un des inconvénients de ce convertisseur réside dans le fait que son interrupteur ne dispose pas d'une borne connectée au zéro, ce qui rend la commande plus complexe.[32]

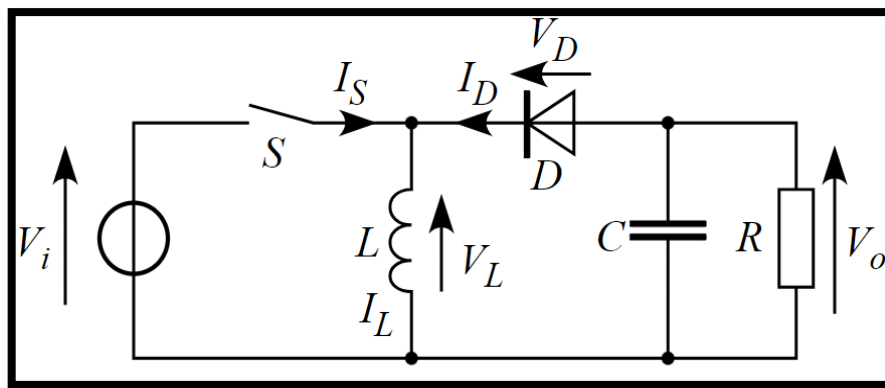


Figure II.5 Schéma de base d'un convertisseur Buck-Boost (abaisseur-élevateur).

3.1. Principe de fonctionnement:

Le fonctionnement d'un convertisseur Buck-Boost peut être divisé en deux configurations suivant l'état de l'interrupteur S :

- Dans l'état passant, l'interrupteur S est fermé, conduisant ainsi à une augmentation de l'énergie stockée dans l'inductance.
- Dans l'état bloqué, l'interrupteur S est ouvert. L'inductance est reliée à la charge et à la capacité. Il en résulte un transfert de l'énergie accumulée dans l'inductance vers la capacité et la charge.

Comparé aux convertisseurs Buck et Boost, les principales différences sont :

- La tension de sortie est de polarité inverse de celle d'entrée.
- La tension de sortie peut varier de 0 à (pour un convertisseur idéal).

En conduction continue, les formes d'ondes de courant et de tension de ce convertisseur sont présentées dans la figure suivante.

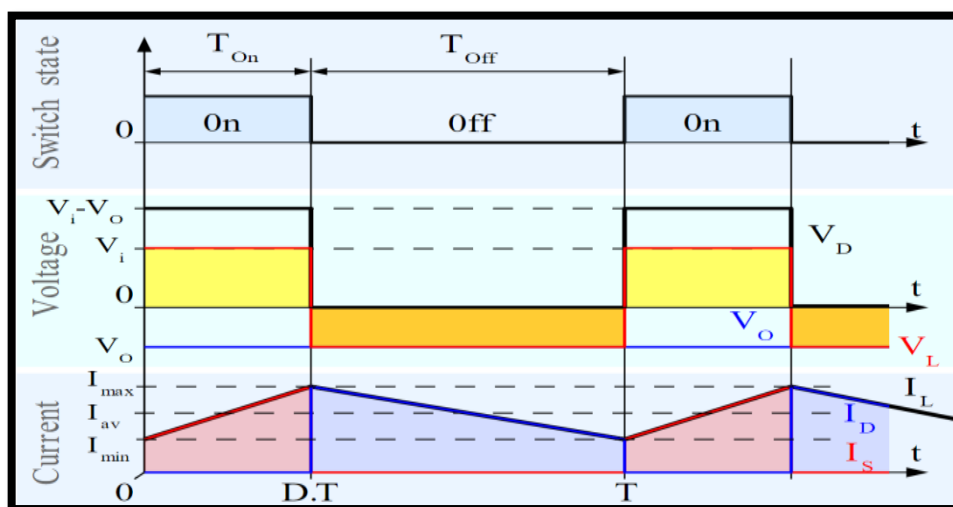


Figure II.6 : Formes d'ondes du convertisseur Buck-Boost.

V. Choix du convertisseur Buck pour la charge de la batterie :

Le choix d'un convertisseur Buck est justifié dans ce contexte pour résoudre les problèmes suivants qui sont liés à la charge directe des batteries à partir du générateur photovoltaïque.

1. Tension de fonctionnement inadaptée :

La tension de sortie standard d'un panneau solaire est de 16 à 18 Volts, mais la tension de charge limitée de la batterie est généralement de 12 à 14 Volts. La batterie rallongerait le temps de charge si elle n'avait pas de régulateur de charge car elle fonctionnerait à une tension inférieure à son niveau optimal. De plus, lorsque la batterie atteint sa tension maximale, la tension continue d'augmenter, ce qui peut entraîner une surcharge et des dommages à long terme à la santé de la batterie.

2. Charge incomplète :

Une fois la tension maximale de la batterie atteinte, elle ne pourra pas atteindre la charge complète si elle est déconnectée. En conséquence, la batterie ne sera pas chargée à son plein potentiel, ce qui réduit sa capacité de stockage.

3. Charge à tension constante impossible :

Il est essentiel de procéder à une charge à tension constante pour assurer une charge complète de la batterie. Cependant, cette méthode devient impossible sans régulateur de charge. Un régulateur de charge garantit une charge complète et optimale de la batterie en maintenant une tension constante tout au long de la charge.

En conclusion, Il est essentiel de choisir un convertisseur Buck parmi les nombreux types disponibles (Boost – Buck-Boost), afin de réduire la tension élevée du panneau solaire à la tension de charge de la batterie. La commande du convertisseur Buck à l'aide de la technique de modulation de la largeur d'impulsion (MLI) est essentielle pour garantir une performance optimale du système photovoltaïque en permettant un contrôle précis du flux d'énergie. De manière efficace et sécurisée, cette sélection judicieuse garantit une charge optimale de la batterie.

VI. Analyse de convertisseur Buck :

A l'aide de la Figure II.3, Le courant qui circule à travers l'inductance (I_L) ne s'annule jamais lorsque le convertisseur Buck est en mode de conduction continue. Les variations de courant et de tension dans un convertisseur Buck sont illustrées dans la Figure II.4.

La formule suivante peut être utilisée pour calculer le taux d'augmentation du courant (I_L) :

$$V_L = L \cdot \frac{dI_L}{dt} \quad (6.1)$$

Avec :

- Pendant l'état passante : $V_L = V_i - V_o$ (6.2)

- Pendant l'état bloquée. $V_L = -V_o$ (6.3)

L'augmentation d'il durant l'état passant est donnée par :

$$\Delta_{I_{L,on}} = \int_{I_L(0)}^{I_L(\alpha T)} \frac{dI_L}{dt} = \int_0^{\alpha T} \frac{V_L}{L} dt = \frac{(V_i - V_o)}{L} \quad (6.4)$$

De la même manière, la diminution du courant dans l'inductance pendant l'état de blocage est calculée par :

$$\Delta_{I_{L,off}} = \int_{I_L(\alpha T)}^{I_L(T)} \frac{dI_L}{dt} = \int_{DT}^T \frac{V_L}{L} dt = - \frac{V_o \cdot (T - \alpha T)}{L} \quad (6.5)$$

En supposant que le convertisseur soit en régime permanent, l'énergie stockée dans chaque composant est identique au début et à la fin de chaque cycle de commutation. Par conséquent, le courant traversant l'inductance, noté ' I_L ', reste constant du début à la fin de chaque cycle de commutation. Cette relation peut être exprimée de la manière suivante :

$$\Delta_{I_{L,on}} + \Delta_{I_{L,off}} = 0 \rightarrow V_o = \alpha \cdot v_i \quad (6.6)$$

La tension de sortie évolue de manière linéaire en fonction du rapport cyclique α . Avec un rapport cyclique compris entre 0 et 1, la tension de sortie V_o est toujours inférieure à la tension d'entrée.

En supposant que l'inductance, la diode et le commutateur soient idéaux et qu'il n'y ait pas de perte de puissance, les puissances moyennes à l'entrée et à la sortie du circuit sont égales.

$$V_i \cdot I_i = V_o \cdot I_o = \alpha \cdot V_i \cdot I_i \rightarrow I_o = \frac{I_i}{\alpha} \quad (6.7)$$

Le courant traversant la diode de roue libre est donné par :

$$I_D = (1 - \alpha) \cdot I_o \quad (6.8)$$

1. Ondulation du courant et choix de L :

En se référant à la Figure II.6, on peut observer que le courant qui traverse l'inductance. La présente une ondulation, notée i_L (l'ondulation du courant étant définie comme la différence entre la valeur maximale et la valeur minimale du courant). Cette ondulation du courant est déterminée par :

$$I_D = (1 - \alpha) \cdot I_o = \Delta I_L = \frac{(V_i - V_o)}{L} \quad (6.9)$$

Avec : $f = \frac{1}{T}$ fréquence de commutation.

Si l'on considère que l'ondulation du courant est maximale lorsque $\alpha = 0,5$, on peut exprimer cela en disant que pour obtenir une valeur désirée maximale de l'ondulation du courant, notée $\Delta i_{L,max}$

$$L \geq \frac{V_i}{4 \cdot \Delta i_L \cdot f} \quad (6.10)$$

$$I_{L,moy} = I_o = \frac{V_o}{R_o} \quad (6.11)$$

$$\frac{\Delta i_L}{I_{L,moy}} = \frac{(1-D)}{L \cdot f} \cdot R_o \quad (6.12)$$

La valeur maximale acceptable pour Δi_L est déterminée par un compromis :

- Une valeur trop faible de Δi_L entraîne une valeur excessive de l'inductance L.
- Une valeur trop élevée de Δi_L augmente le courant maximal que le commutateur S1 et la diode doivent supporter, le maximum correspondant également au courant que S1 doit être en mesure d'interrompre.
- Une valeur trop élevée de Δi_L augmente également la largeur de la zone correspondant à la conduction discontinue. Le choix de la fréquence de commutation f est donc crucial. Plus la fréquence est élevée, plus petite est la taille du noyau de l'inductance, mais les pertes de puissance dues à la commutation deviennent plus importantes.

2. Ondulation de la tension de sortie V_o , choix de C :

Dans une installation PV, les condensateurs C est ajouté pour maintenir la tension de sortie V_o et le courant I_o à des valeurs constantes, même pendant l'ouverture de l'interrupteur. De plus, les composants du convertisseur sont dimensionnés de manière à ce que les tensions et les courants à l'entrée et à la sortie présentent de faibles variations lors de la commutation de l'interrupteur entre l'état fermé et l'état ouvert.

L'ondulation de la tension de sortie peut être estimée en supposant que le courant traversant le condensateur est égal à l'ondulation du courant dans l'inductance. En d'autres termes, nous faisons l'hypothèse que l'ondulation du courant traversant la charge Reste négligeable. Sur la Figure II.8, on peut observer que pour chaque demi-période de commutation, le condensateur accumule ou libère une charge S (représentée par l'aire du triangle hachuré), ce qui entraîne une variation de la tension aux bornes du condensateur.

$$\Delta V_c = \frac{\Delta Q}{C} = \frac{1}{C} * \frac{1}{2} * \frac{\Delta I_L}{2} * \frac{T}{2} = \frac{\Delta I_L}{8 \cdot C \cdot f^2} \quad (6.13)$$

$$= \frac{V_o}{8 \cdot L \cdot C \cdot f^2} * (1 - \alpha) = \frac{V_i}{8 \cdot L \cdot C \cdot f^2} * (1 - \alpha) * \alpha \quad (6.14)$$

Ou en valeur relative :

$$\frac{\Delta V_C}{C} = \frac{(1-\alpha)}{8 \cdot LC \cdot f^2} \quad (6.15)$$

La relation (6.6) montre que l'ondulation relative est indépendante de la charge.

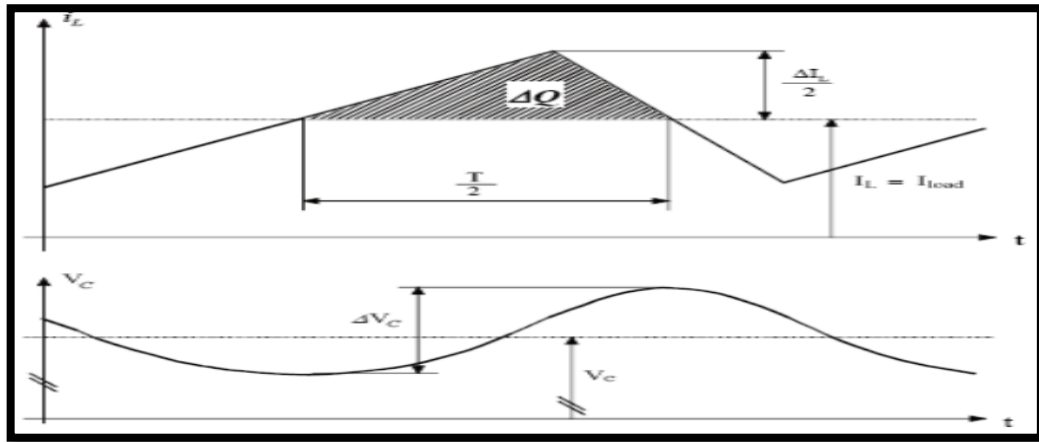


Figure II.7: Ondulation de la tension de sortie

L'ondulation absolue maximale a lieu pour un rapport cyclique $\alpha = 0.5$.

$$\Delta V_C = \frac{V_i}{32 \cdot LC \cdot f^2} \quad (6.16)$$

Par conséquent, la valeur du condensateur C permettant d'avoir une ondulation inférieure à ΔV_C doit satisfaire :

$$C \geq \frac{V_i}{32 \cdot LC \cdot f^2} \quad (6.17)$$

Si la valeur de l'ondulation du courant dans l'inductance il est déterminé, alors la valeur de C peut être établie à partir de l'expression (6.13) :

$$C \geq \frac{\Delta I_L}{8 \cdot L \cdot V_C \cdot f^2} \quad (6.18)$$

3. Analyse fréquentielle :

En effectuant une analyse fréquentielle du circuit du convertisseur Buck, on peut observer que l'inductance et le condensateur forment un filtre de second ordre, dans lequel la résistance de charge agit comme un élément d'amortissement. La fréquence de coupure du filtre est déterminée par la relation :

$$f_c = \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{LC}} \quad (6.19)$$

On obtient, à l'aide de la relation (6.19), pour l'ondulation relative de la tension

$$\frac{\Delta v_c}{v_c} = \frac{\pi^2}{2} (1 - \alpha) \left(\frac{f_c}{f}\right)^2 \quad (6.20)$$

En choisissant une fréquence de coupure du filtre passe-bas considérablement inférieure à la fréquence de commutation (f), il est possible de réduire au minimum l'ondulation relative de la tension, comme le montre cette relation.

VII. Techniques de la commande PWM :

Il existe plusieurs techniques de commande de modulation de largeur d'impulsion (PWM) utilisées. Cependant, nous pouvons les regrouper en quatre catégories principales :

- Les modulations sinus-triangle : Elles consistent à comparer un signal de référence à une porteuse, généralement de forme triangulaire. Cette technique permet de générer des signaux de sortie dont la forme d'onde suit une modulation sinusoïdale.
- Les modulations pré-calculées : Dans cette approche, les angles de commutation sont calculés préalablement pour éliminer certaines composantes du spectre harmonique. Cela permet de réduire les perturbations et d'obtenir des signaux de sortie plus propres.
- Les modulations post-calculées (PWM régulières) : Ce type de modulation implique des calculs effectués en temps réel pour déterminer les angles de commutation des signaux de sortie PWM. Cette méthode est couramment utilisée et permet une régulation précise et flexible.
- Les modulations stochastiques : L'objectif de cette technique est de minimiser le bruit et d'obtenir un spectre de sortie plus uniforme. Les largeurs des impulsions sont réparties selon une densité de probabilité, ce qui permet de réduire les harmoniques et d'améliorer la qualité du signal.

L'utilisation de la modulation de largeur d'impulsion offre de nombreuses possibilités dans les systèmes de commande et d'autres applications. Elle permet une mise en œuvre souple et économique des circuits de commande des hacheurs, qu'ils soient symétriques ou basés sur des PWM vectorielles, où les angles de commutation sont calculés en temps réel.

1. Principe de la commande PWM :

Le principe fondamental de la commande PWM repose sur le découpage d'une onde rectangulaire complète. Ainsi, la tension de sortie est formée par une série d'impulsions de même amplitude que la tension d'alimentation continue, mais avec une largeur variable. La méthode la plus couramment utilisée pour obtenir un signal PWM consiste à comparer deux signaux :

- Le 1er signal, appelé signal de référence, est un signal continu qui varie entre deux seuils définis en fonction de l'application.
- Le 2ème signal, appelé signal de porteuse, définit la fréquence de commutation des interrupteurs statiques du convertisseur. Il s'agit d'un signal à haute fréquence par rapport au signal de référence.
- Les instants de commutation des interrupteurs sont déterminés par l'intersection de ces deux signaux.

Ainsi, en ajustant la largeur des impulsions du signal de sortie PWM, il est possible de contrôler la quantité d'énergie transmise au dispositif de charge ou à la charge connectée.

Cette technique de commande PWM permet une régulation précise et flexible de la puissance délivrée par le convertisseur, en adaptant la durée des impulsions pour répondre aux exigences de l'application.

VIII. Recherche du point de puissance maximale (MPPT) :

1. Principe :

Pour optimiser le fonctionnement des systèmes photovoltaïques en exploitant les points de puissance maximum de leurs caractéristiques, il existe des techniques de commande spécifiques qui répondent à ce besoin. Dans la littérature, cette commande est connue sous le nom de "Recherche du Point de Puissance Maximum" ou "Maximum Power Point Tracking" (MPPT) en anglais. L'objectif de ces commandes est de trouver le point de puissance maximale (MPP) en assurant une bonne correspondance entre le générateur photovoltaïque et sa charge, afin de transférer la puissance maximale disponible.

Cette commande MPPT est couplée à un convertisseur statique qui permet d'adapter le générateur photovoltaïque à la charge, de manière à maximiser la puissance générée et à la transférer efficacement vers la charge. Cette approche garantit que la puissance produite par le système photovoltaïque est optimisée et utilisée de manière efficiente.

L'objectif principal de la commande MPPT est d'ajuster en temps réel les paramètres de fonctionnement du générateur photovoltaïque, tels que la tension ou le courant, afin de maintenir le système à son point de puissance maximale malgré les variations des conditions environnementales. Cela permet d'exploiter au mieux le potentiel énergétique des panneaux solaires et d'assurer un rendement élevé du système photovoltaïque.

En résumé, la commande MPPT est une méthode essentielle pour optimiser le rendement des systèmes photovoltaïques en recherchant et en maintenant le point de puissance maximale, assurant ainsi une adaptation optimale entre le générateur et la charge connectée.

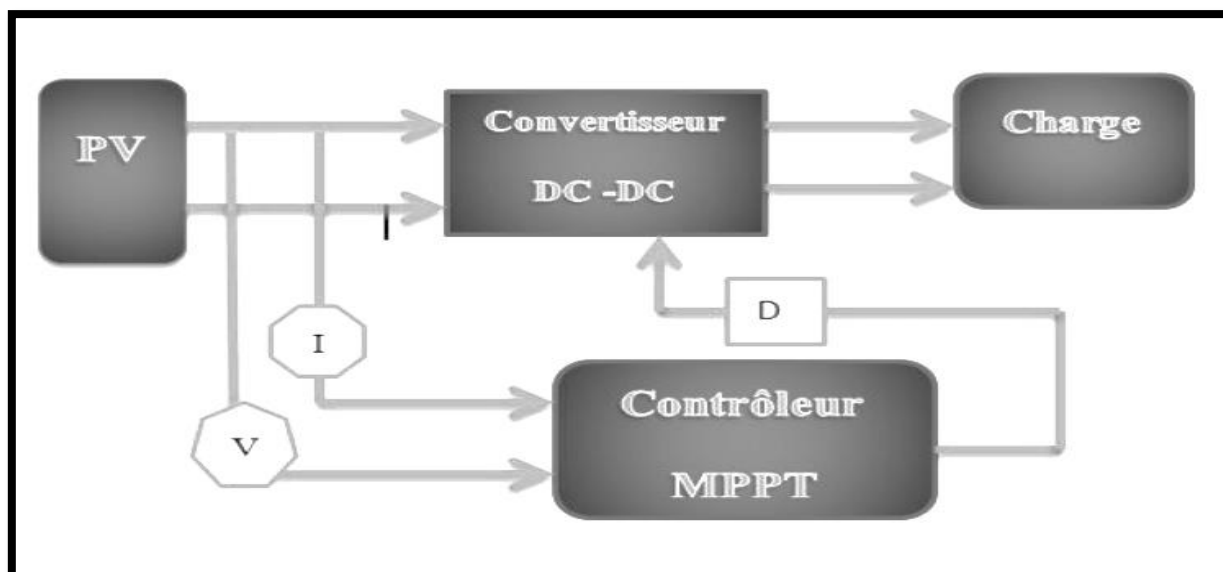


Figure II.8 : Chaîne de conversion photovoltaïque avec convertisseur statique contrôlé par une commande MPPT.

2. Classification de l'algorithme de suiveur de la puissance max :

2.1. La méthode de MPPT directe :

Les méthodes directes sont des approches qui exploitent les mesures de tension et de courant des panneaux solaires et dont l'algorithme repose sur la variation de ces mesures. Ce qui les rend avantageuses, c'est qu'elles ne nécessitent pas de connaissances préalables sur les caractéristiques spécifiques des panneaux solaires. Parmi ces méthodes, on retrouve la méthode de différenciation, la méthode Perturbe & Observe (P&O), et l'incrément de conductance. Pour notre étude, nous avons choisi de nous baser sur la méthode Perturbe & Observe (P&O).

2.2. La méthode de MPPT Indirect :

Les méthodes indirectes utilisent des bases de données regroupant les caractéristiques des panneaux photovoltaïques (PV) dans différentes conditions climatiques (température, ensoleillement...) mais aussi des équations mathématiques empiriques permettant de déterminer le point de puissance maximum. Ces méthodes sont souvent propres à chaque type de panneau et donc difficile à généraliser : la méthode d'ajustement de courbe, la méthode « look-up table », la méthode de la tension de circuit ouvert du générateur, la méthode de court-circuit

3. L'algorithme de Perturbe & Observe (P&O) :

L'algorithme de Perturbation et Observation (connu sous le nom de P&O) est une méthode de type "Hill climbing" (escalade de colline en anglais). C'est l'algorithme le plus couramment utilisé dans la littérature et la pratique en raison de sa simplicité de mise en œuvre. Son objectif principal est de faire fonctionner le système à sa puissance maximale

en ajustant la tension du point de fonctionnement et en observant l'effet de cette perturbation sur la puissance générée par le générateur photovoltaïque (GPV).

L'algorithme P&O prend des décisions pour la prochaine itération en se basant sur l'observation de l'effet de la perturbation sur la puissance délivrée.

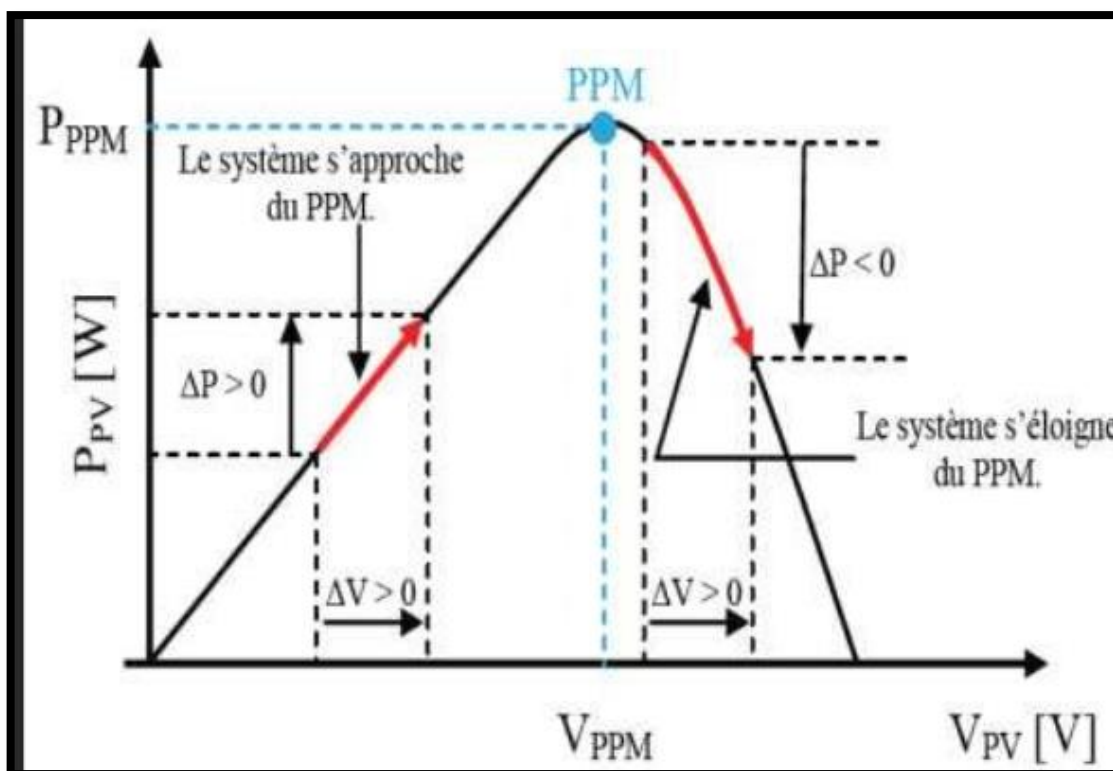


Figure II.9 : Caractéristique de fonctionnement de la méthode P&O

| Cas n° | ΔV | ΔP | $\frac{\Delta P}{\Delta V}$ | Sens de la poursuite | Action de contrôle |
|--------|------------|------------|-----------------------------|----------------------|---|
| 1 | + | + | + | Bon | Incrémenter $V_{ref} = V_{ref} + \Delta V$ |
| 2 | - | - | + | Mauvais | Incrémenter $V_{ref} = V_{ref} + \Delta V$ |
| 3 | + | - | - | Mauvais | Décrémenter $V_{ref} = V_{ref} - \Delta V$ |
| 4 | - | + | - | Bon | Décrémenter $V_{ref} = V_{ref} - \Delta V$ |

Figure II.10 : Principe de l'algorithme P&O. (Tableau 2-4)

L'algorithme P&O (Perturb and Observe) présente l'avantage d'être précis et réactif. Il permet de déterminer le point de puissance maximale (MPP) pour différentes conditions telles que l'ensoleillement, la température ou le niveau de dégradation des caractéristiques.

Cependant, cet algorithme présente certains problèmes :

- a. **Oscillation autour du MPP** : Dans des conditions de fonctionnement normales, l'algorithme P&O peut présenter des oscillations autour du MPP. Cela signifie qu'il peut fluctuer entre des valeurs légèrement supérieures et inférieures au MPP, ce qui peut entraîner une perte d'efficacité de conversion de puissance.
- b. **Mauvaise convergence en cas de variations brusques** : L'algorithme P&O peut avoir des difficultés à converger rapidement lorsque des variations brusques de la température et/ou de l'ensoleillement se produisent. Cela peut entraîner des retards dans la détermination précise du MPP, ce qui peut affecter les performances globales du système.

Il est important de prendre en compte ces limitations lors de l'utilisation de l'algorithme P&O pour le suivi du MPP dans les systèmes photovoltaïques. Des améliorations et des ajustements peuvent être nécessaires pour réduire les oscillations et améliorer la convergence, notamment en utilisant des techniques de lissage, des stratégies de contrôle avancées ou des algorithmes alternatifs.

IX. Conclusion :

La régulation du système de stockage est essentielle pour optimiser la durée de vie des batteries. Après avoir examiné les divers modes de charge des batteries ainsi que les technologies de charge disponibles, nous avons finalement opté pour l'utilisation d'un convertisseur Buck. Cette décision a été prise en raison de ses avantages et de sa capacité à réguler efficacement le processus de charge des batteries.

Chapitre III :
Simulation et Réalisation
Convertisseur PWM-Buck pour
le système de gestion de
batterie BMS utilisé dans le
système photovoltaïque

Chapitre III : Simulation et Réalisation Convertisseur PWM-Buck pour le système de gestion de batterie BMS utilisé dans le système photovoltaïque :

I. Introduction :

Le présent chapitre se concentre sur l'étude de la modélisation et de la simulation d'un système photovoltaïque utilisant un convertisseur dévolteur de type "Buck" avec une régulation PI et une commande MPPT numérique basée sur la technique de perturbation et d'observation. Toutes les simulations sont réalisées à l'aide du logiciel MATLAB 2017b. L'objectif principal de ce chapitre est d'effectuer une mise en pratique de l'implémentation du convertisseur Buck. Nous allons également appliquer des signaux PWM générés par un GBF (Générateur Basse Fréquence) sur le convertisseur Buck en utilisant une carte avec le DRIVER 2112. Pour la conception du circuit imprimé, nous avons utilisé le logiciel Proteus Pro8.15 qui offre une vaste gamme de bibliothèques de composants provenant de nombreux fabricants. Avant de passer à la phase expérimentale, nous validerons d'abord les dimensions du système par des simulations sous le logiciel MATLAB.

II. La modélisation et la simulation d'un système PV autonome avec un convertisseur DC /DC Buck :

1. Simulation d'un hacheur Buck:

Afin de mieux appréhender le fonctionnement du convertisseur Buck, nous avons réalisé une simulation en tant que sous-système. Cette approche nous a permis de facilement modifier les paramètres du convertisseur. Dans cette simulation, nous avons utilisé une source de tension en tant qu'entrée du convertisseur et une charge résistive en tant que sortie.

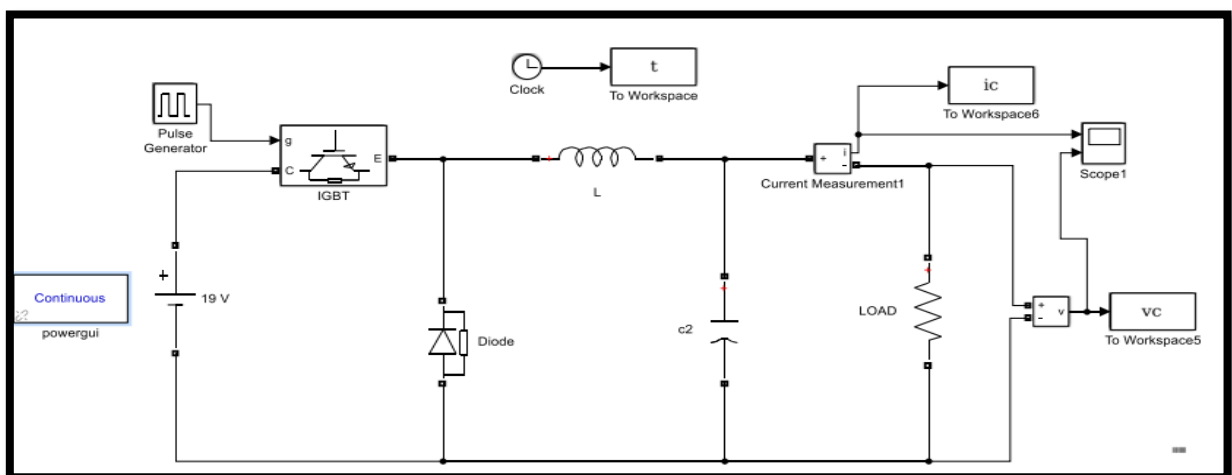


Figure III.1 : Model de Simulink du convertisseur Buck.

Voici les résultats de la simulation présentés ci-dessous. Les valeurs des composants du convertisseur Buck ont été sélectionnées en suivant la méthode décrite précédemment, avec des calculs détaillés présentés dans le chapitre 2.

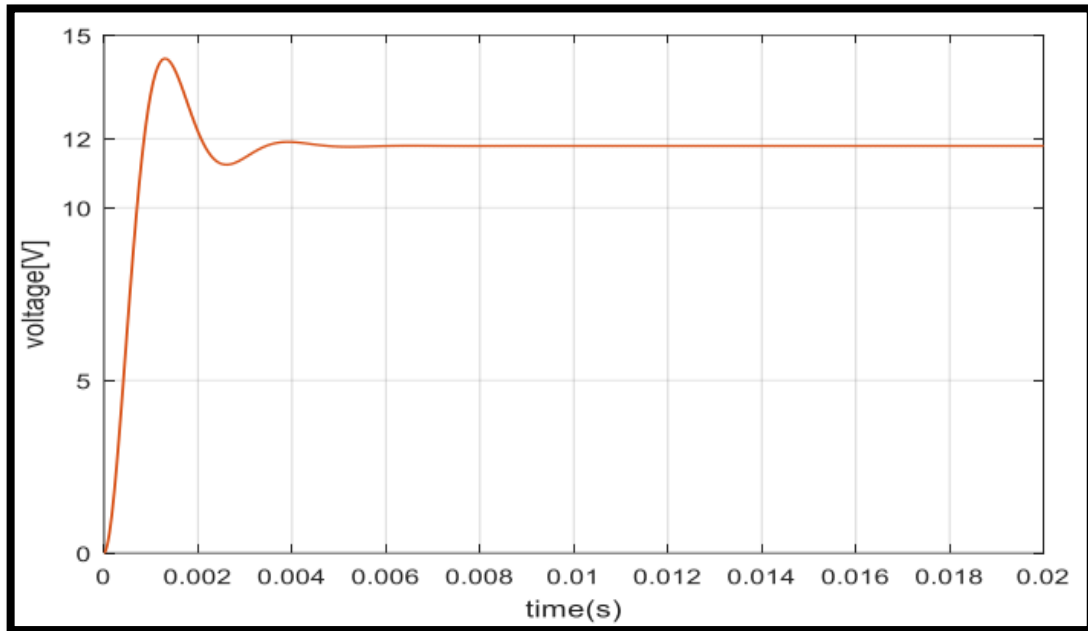
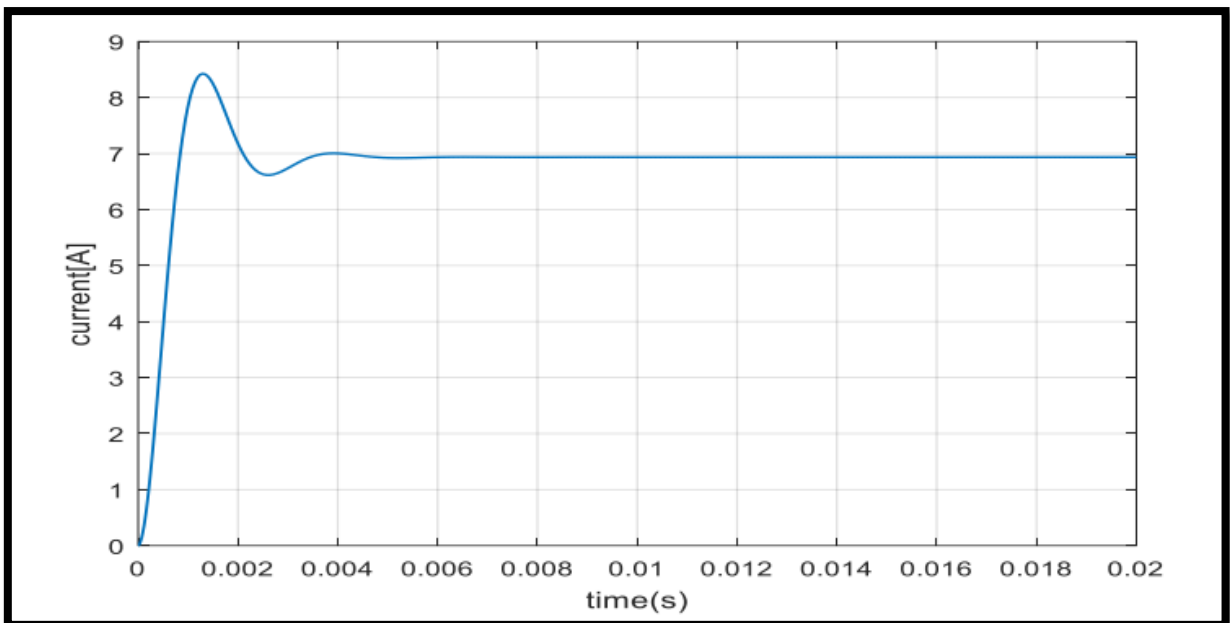


Figure III.2 :(a)



(b)

Figure III.3 :a-b illustrent l'évolution de la tension et du courant de sortie du convertisseur au fil du temps, mesurés aux bornes de la charge.

On peut observer qu'après une période transitoire de moins de 6 ms, le régime permanent est atteint. Ces résultats démontrent que le circuit a rempli correctement sa fonction, car la tension de sortie est inférieure à celle de l'entrée.

2. Caractérisation du module PV :

Dans cette étude, J'ai effectué une simulation du module photovoltaïque (Solar World SW85polyR5A/D). Ce module PV a une capacité de production maximale de 85 watts, et ses caractéristiques électriques sont représentées dans le tableau (3.1) .

| | |
|--|-------------------------------------|
| • Marque | • SolarWorld SW85poly R5A/D |
| • <i>Nombre</i> | • <i>Trois modules en parallèle</i> |
| • <i>Puissance crête maximale, Pm.</i> | • <i>85Wc</i> |
| • <i>Tension optimale,</i> | • <i>17.9 V</i> |
| • <i>Courant optimale</i> | • <i>4.76 A</i> |
| • <i>Tension de circuit ouvert</i> | • <i>22.1 V</i> |
| • <i>Courant de court-circuit, Isc</i> | • <i>5.02 A</i> |
| • <i>Nombre de cellules</i> | • <i>36</i> |

Figure III.4 : Caractéristique électrique du module Solar world SW85poly R5A.(Tableau 3.1)

3. Simulation de caractérisation du module PV :

Afin d'obtenir les caractéristiques I/V (courant/tension) et P/V (puissance/tension) du modèle PV SW85, nous avons utilisé des composants pour faciliter la simulation. Nous avons utilisé une source de tension contrôlée en série avec un bloc de mesure de courant et une résistance de 1 Ω , comme indiqué dans la Figure 3.4. Ces composants nous ont permis de mesurer et d'analyser les relations entre le courant, la tension et la puissance du modèle PV SW85.

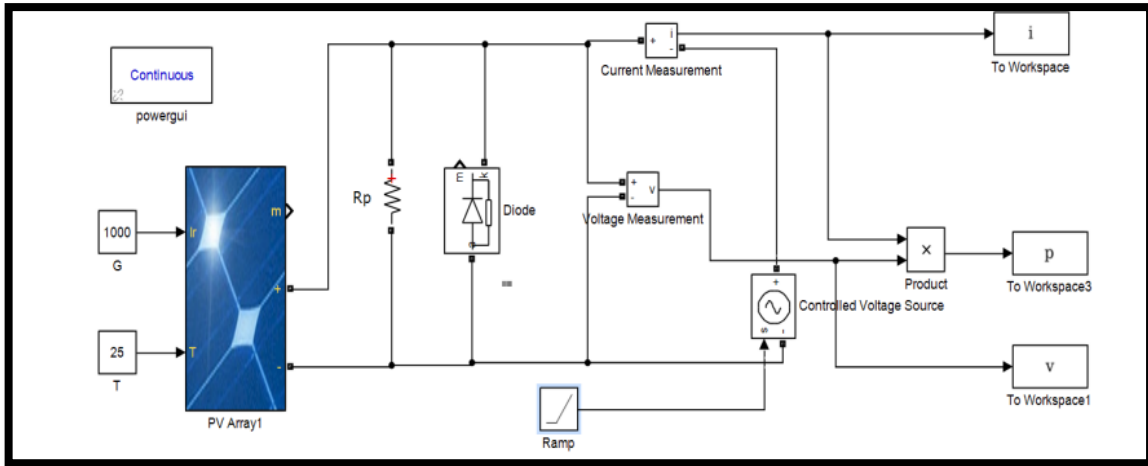
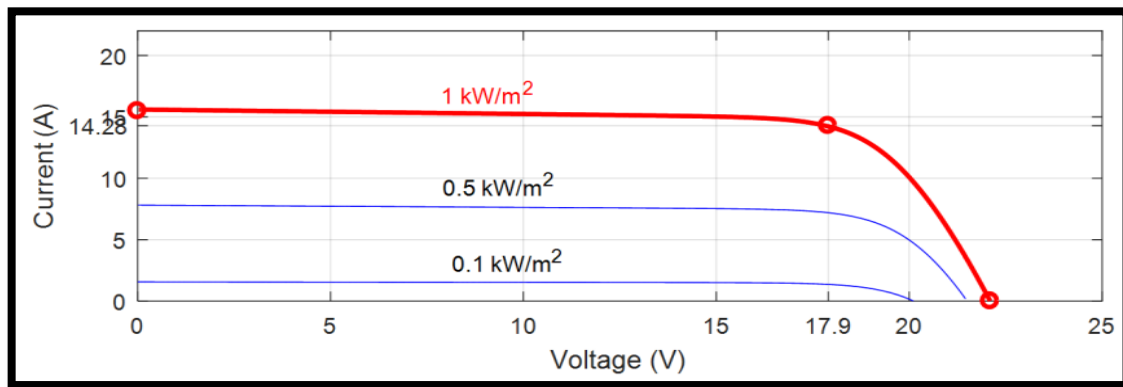
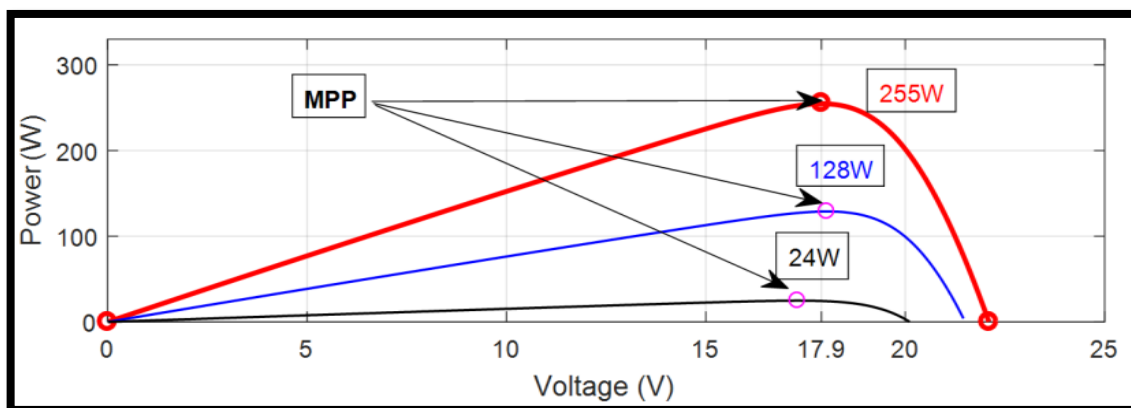


Figure III.5: système permettant d'obtenir les caractéristiques de module PV(SW85)

Ces graphiques illustrent l'effet de l'ensoleillement sur les caractéristiques I-V (courant-tension) et P-V (puissance-tension) respectivement. La simulation a été réalisée en utilisant trois modules solaires en parallèle, en variant les niveaux d'ensoleillement, tandis que la température reste constante à 25°C.



(a)



(b)

Figure III.6 : Les courbes des caractéristiques du panneau (SW85) pour différents niveaux d'irradiation ($G=100, 500, 1000 \text{ W/m}^2$) et $T=25 \text{ C}^\circ$. (a) caractéristique I(V). (b) caractéristique P(V)

4. La simulation consiste en un convertisseur Buck avec trois panneaux solaires photovoltaïques (PV) connectés en parallèle et une charge résistive.

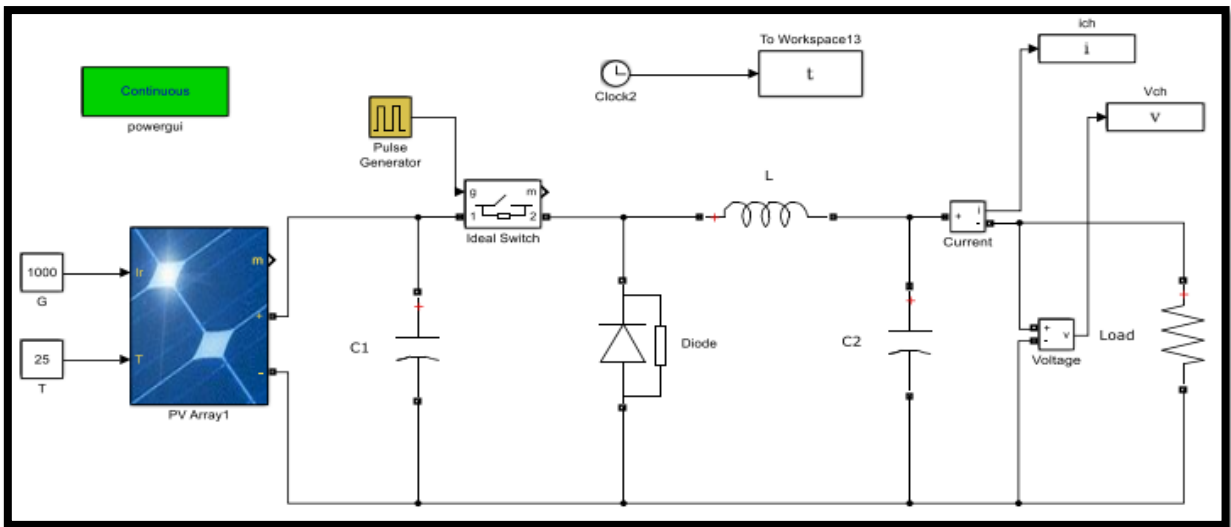


Figure III.7: Convertisseur Buck avec la charge résistive et trois panneaux photovoltaïques.

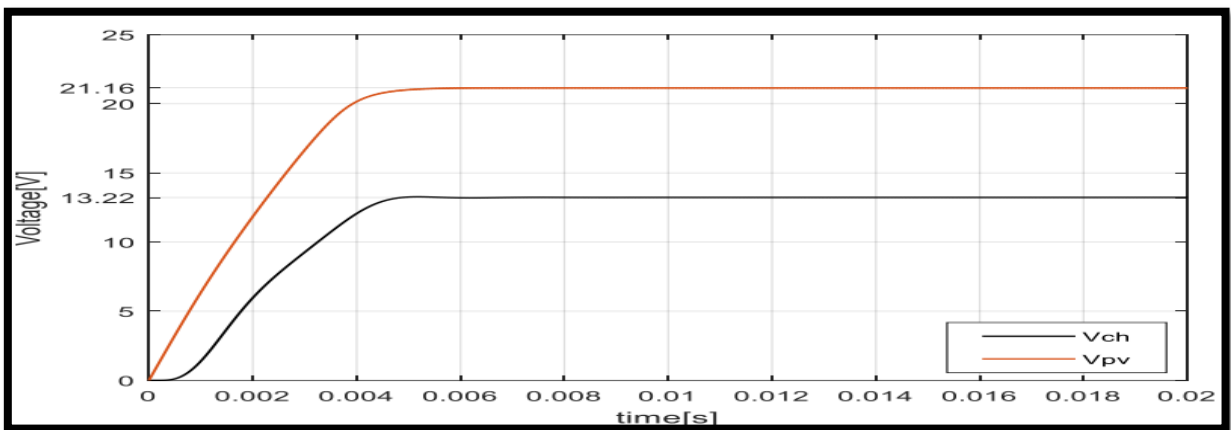


Figure III.8 : Comparaison entre la tension d'entrée V_{pv} et de sortie V_{ch} en fonction de temps.

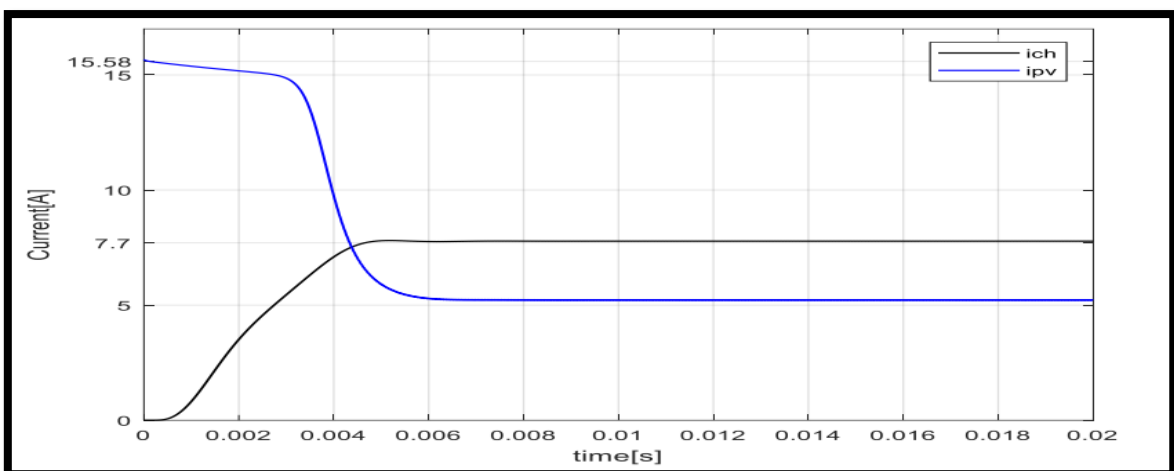


Figure III.9: comparaison entre le courant d'entre I_{pv} et la sortie I_{chen} fonction de temps.

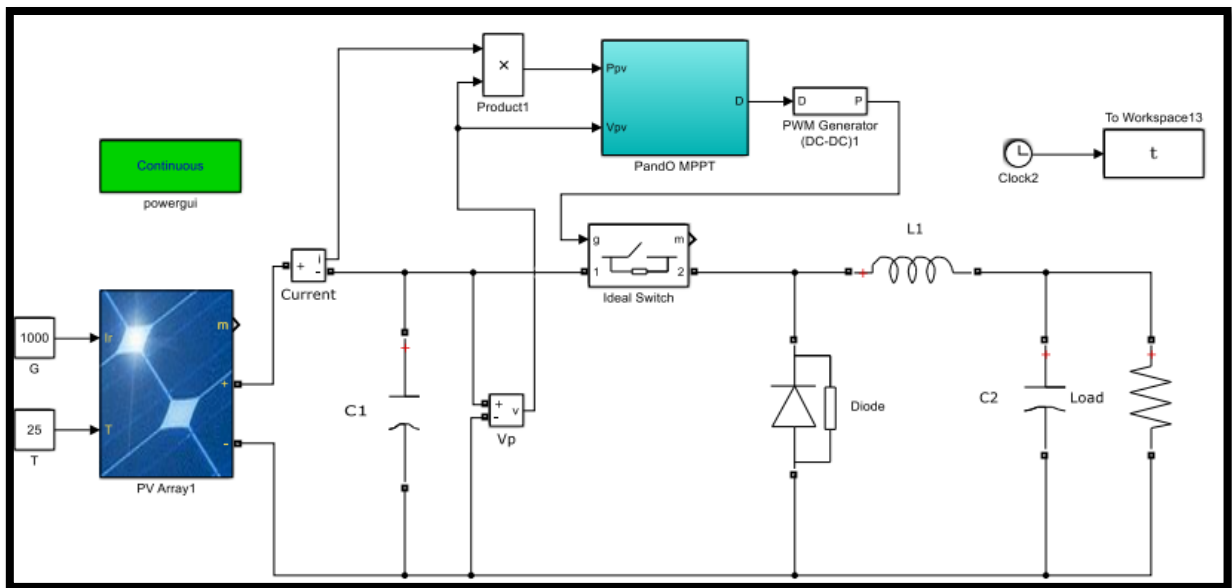
En observant la figure III.8, nous pouvons constater que la tension d'entrée est de 22V, et après l'utilisation du convertisseur Buck, nous obtenons une tension de sortie de 13V. En examinant la figure III.9, nous remarquons que le courant d'entrée est de 5,22A, tandis qu'aux bornes de la charge, il augmente à 7,7A. À partir de ces observations, nous pouvons conclure que le rôle du convertisseur Buck est de réduire la tension et d'augmenter le courant de sortie.

5. La simulation de la Commande MPPT :

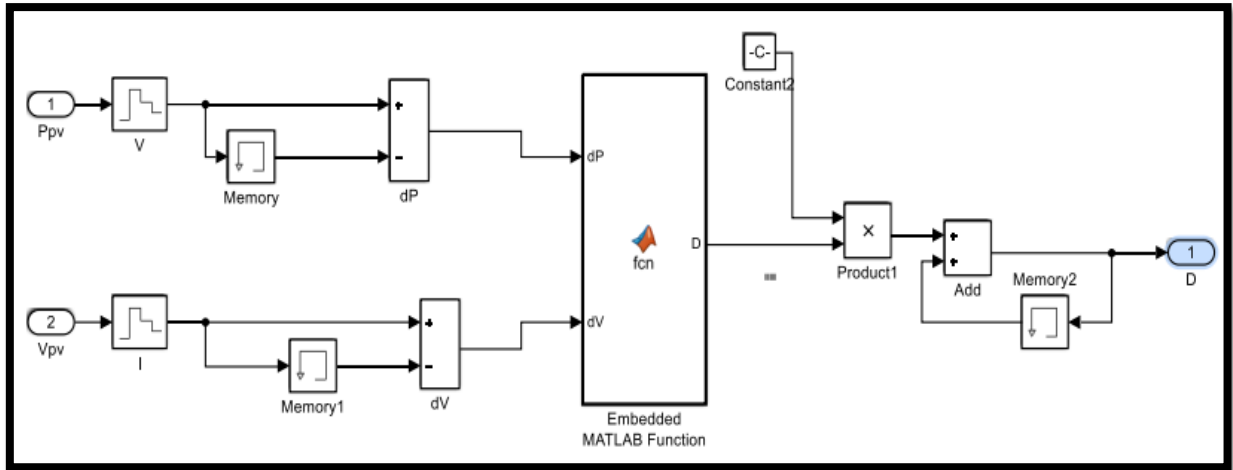
Comme démontré précédemment, afin d'assurer le fonctionnement optimal du générateur photovoltaïque (PV), il est nécessaire de disposer d'un quadripôle d'adaptation. Cette adaptation est réalisée en recherchant automatiquement le point de puissance maximale (MPP) du générateur PV, en tenant compte des variations des conditions météorologiques telles que l'ensoleillement et la température. Dans notre travail, nous utilisons la méthode de P&O (perturbation et observation) pour cela.

L'objectif est d'observer la puissance maximale produite par le générateur PV. Pour cela, nous utilisons une résistance comme charge ($R=3\Omega$). Les conditions atmosphériques choisies pour la simulation dans cette partie sont les conditions standard, avec un rayonnement de $1000W/m^2$ et une température ambiante de $25^\circ C$.

Les figures suivantes illustrent les schémas blocs du système photovoltaïque avec MPPT (Maximum Power Point Tracking).



(a)

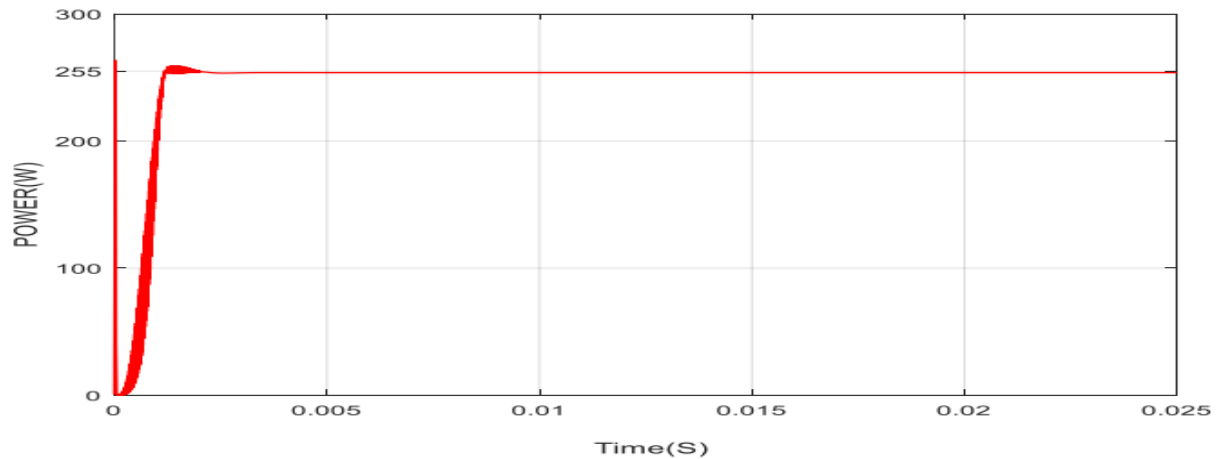


(b)

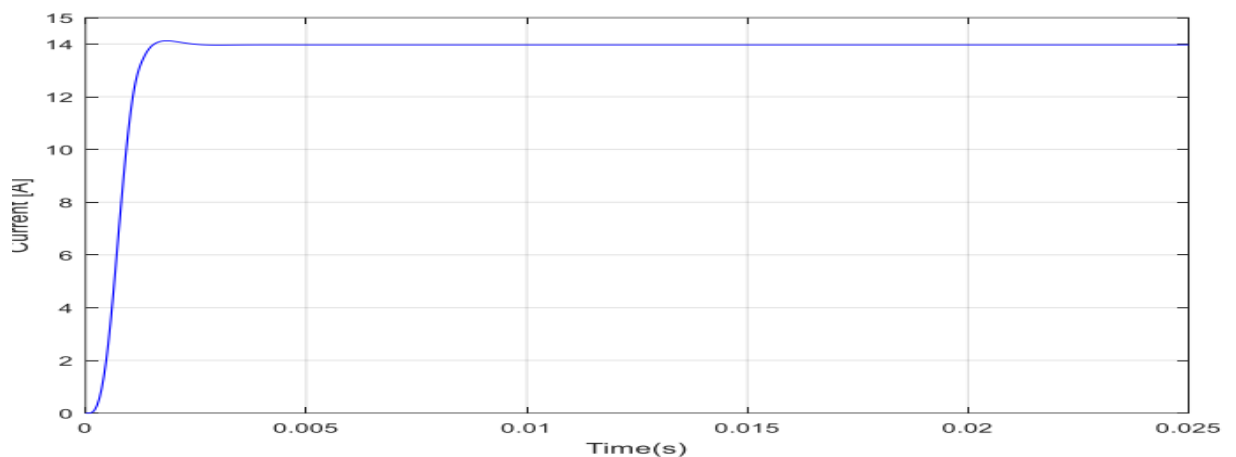
Figure III.10: Schéma bloc de la simulation d'un système PV avec la commande MPPT et le model Simulink MPPT P&O. (a) schéma synoptique du système. (b) schéma Simulink.

Les figures (III.11-a), (III.11-b) et (III.11-c) illustrent respectivement la puissance, le courant et la tension pour une résistance de $R=3\Omega$ connectée directement au GPV.

(a)



(b)



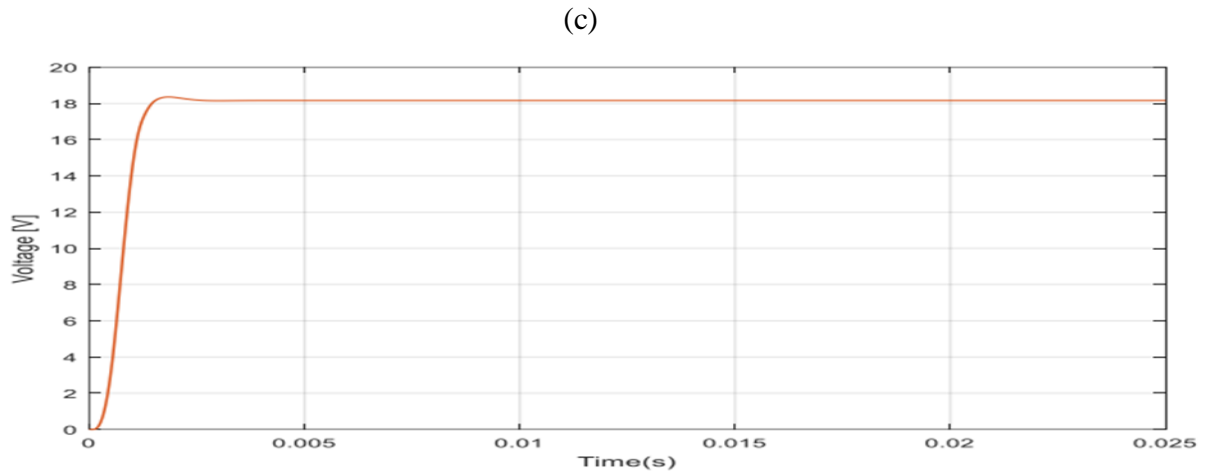


Figure III.11: Les sorties de GPV avec MPP. (a) puissance. (b) courant. (c) tension.

En se référant à la figure (III.11-a), on observe que le panneau solaire fournit sa puissance maximale lorsque l'éclairement atteint son niveau maximal de 1000 W/m^2 et que la température est de 25°C . La puissance fournie par le générateur photovoltaïque se stabilise autour de 255 W. Les figures (III.11-b) et (III.11-c) illustrent respectivement le courant et la tension du générateur photovoltaïque.

III. Réalisation et tests du circuit de puissance avec convertisseur Buck :

1. Choix et description des composants de la carte réalisée :

1.1. Interrupteur de commutation « MOSFET » :

On a choisi le MOSFET IRFZ44N qui est destiné aux applications de commutation à basse tension et à grande vitesse. Il a comme tension maximale directe de 55V entre le drain source, une résistance à l'état passant de $32\text{m}\Omega$ entre drain et source, Tension de seuil minimale : $V_{TH}(\text{min}) = 2\text{V}$, et un courant drain maximal à 25°C de 49A « I_D ».



Figure III.12: Le MOSFET IRFZ44N

1.2. Bobine à tore ferrite :

Une bobine à noyau ferromagnétique d'inductance de 1mH est utilisée. Elle supporte un courant maximal de 25A , pour ce faire Nous avons eu besoin d'un tore de

ferrite avec un diamètre suffisamment grand pour faire passer un nombre de tour précis de spires. Le nombre de tour : $N = 11$ tours.

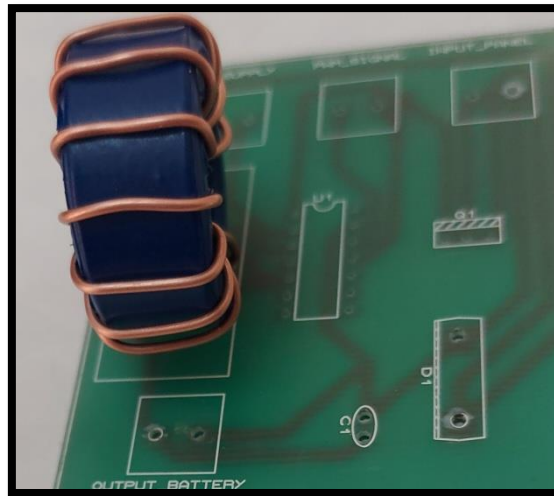


Figure III.13: Bobine à tore ferrite

1.3. Condensateur :

Un condensateur d'accumulation capacitive de capacité $C=330\mu\text{F}$ est utilisé au filtre passif du convertisseur. Il a comme tension d'isolation 25V.



Figure III.14: Un condensateur 330 uF

1.4. Circuit de commande du MOSFET « Driver IR2112 » :

Le IR2112 permet de commander des transistors de type MOSFET et IGBT a forte tension et a vitesse élevée, il possède deux signaux de sortie (haut et bas) utilisés pour la commande d'un bras de pont. La connexion de ce composant est indiquée sur la figure III.15.

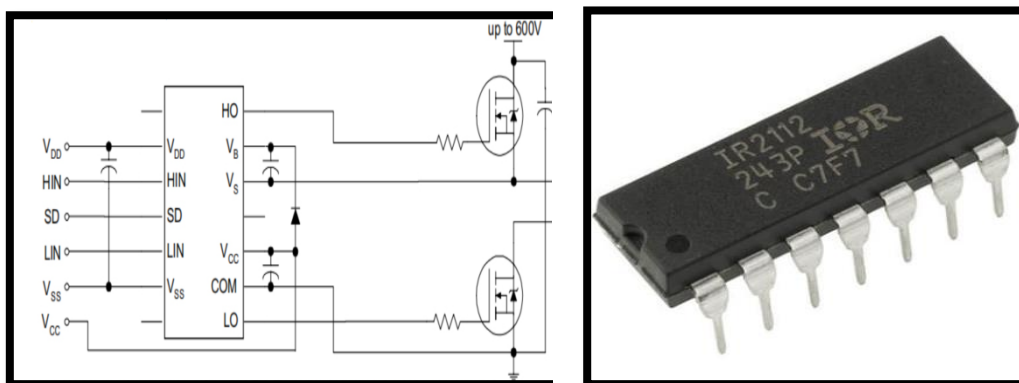


Figure III.15: Ir2112 MOSFET driver et son schéma de connexion

1.5. Diode rapide :

Nous avons choisi d'utiliser une diode Schottky rapide, le modèle MBR6045WT, en raison de sa fréquence de commutation élevée. Cette diode est idéale pour réduire les pertes et protéger l'interrupteur. Elle possède une tension de claquage de 45V (VRRM) et présente une faible chute de tension d'environ 0.4V.

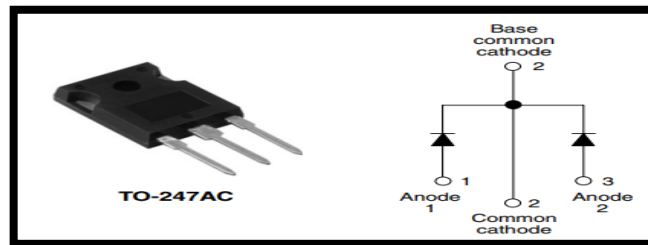


Figure III.16: Diode Schottky de modèle MBR6045WT

2. Tests de la carte par logiciel Proteus :

Nous avons réalisé notre circuit dans Proteus, en utilisant les composants sélectionnés. Le schéma correspondant est présenté dans la figure suivante.

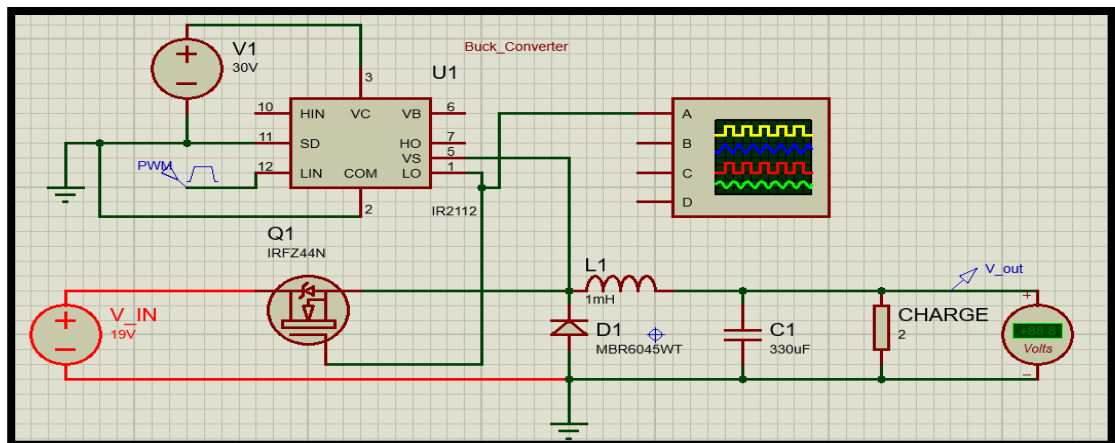


Figure III.17: Schéma du convertisseur Buck avec le circuit driver ir2112.

Nous avons varié le rapport cyclique de signal MLI afin d'obtenir différents résultats suivants :

- **1^{er} teste :** Lorsque nous avons pris un rapport cyclique $\alpha=90\%$.la tension de sortie obtenue $V_{out} = 17v$.

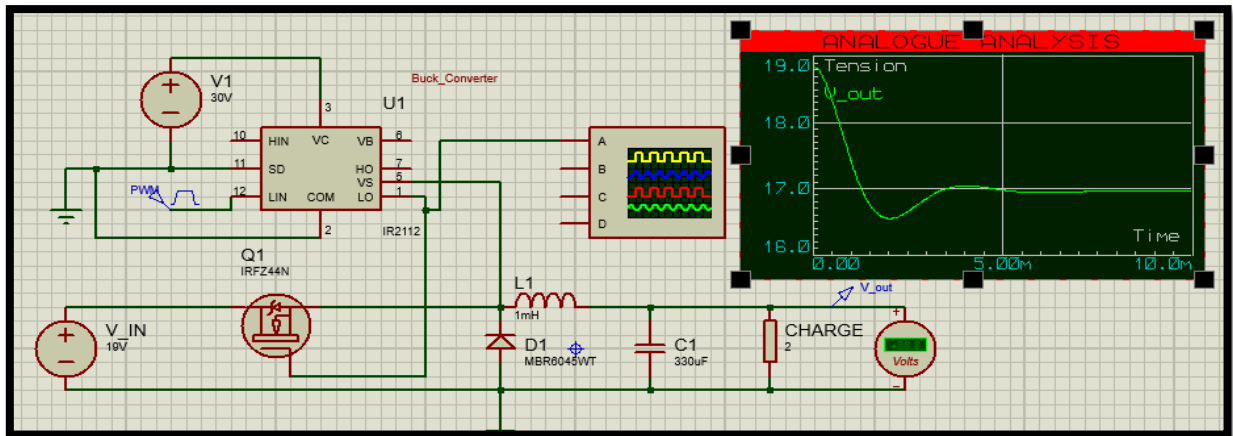


Figure III.18: L'allure de tension obtenu aux bornes de la charge ($\alpha=90\%$)

- **2me teste :** Lorsque nous avons pris un rapport cyclique $\alpha=50\%$.la tension de sortie obtenue $V_{out} = 9.16v$.

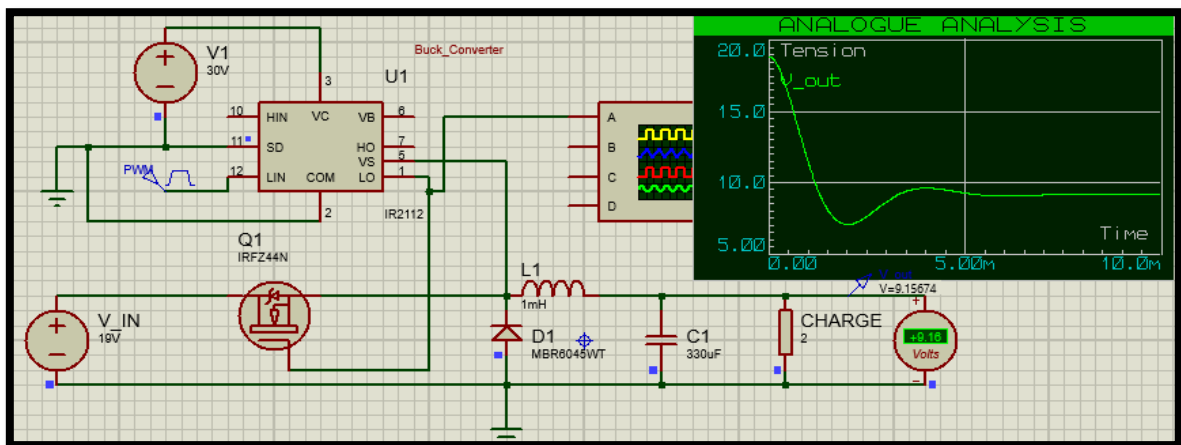


Figure III.19: L'allure de tension obtenu aux bornes de la charge ($\alpha=50\%$)

- **3eme teste :** Lorsque nous avons pris un rapport cyclique $\alpha=25\%$.la tension de sortie obtenue $V_{out} = 4.28v$

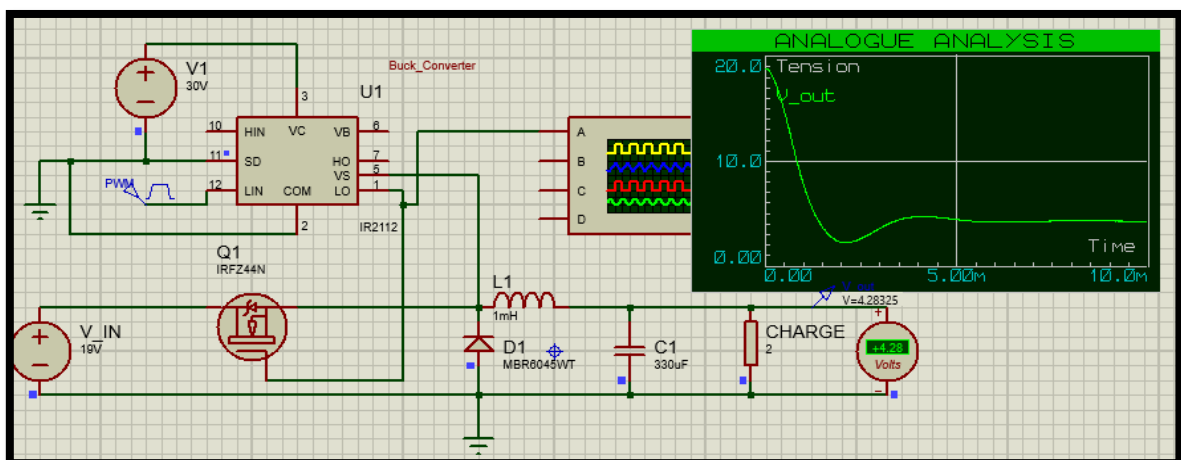


Figure III.20: L'allure de tension obtenu aux bornes de la charge ($\alpha=25\%$)

3. La carte finale :

Pour finaliser notre carte, nous devons supprimer les composants tels que les générateurs, les voltmètres, et tout autre équipement qui n'est pas nécessaire pour la fonctionnalité de la carte.

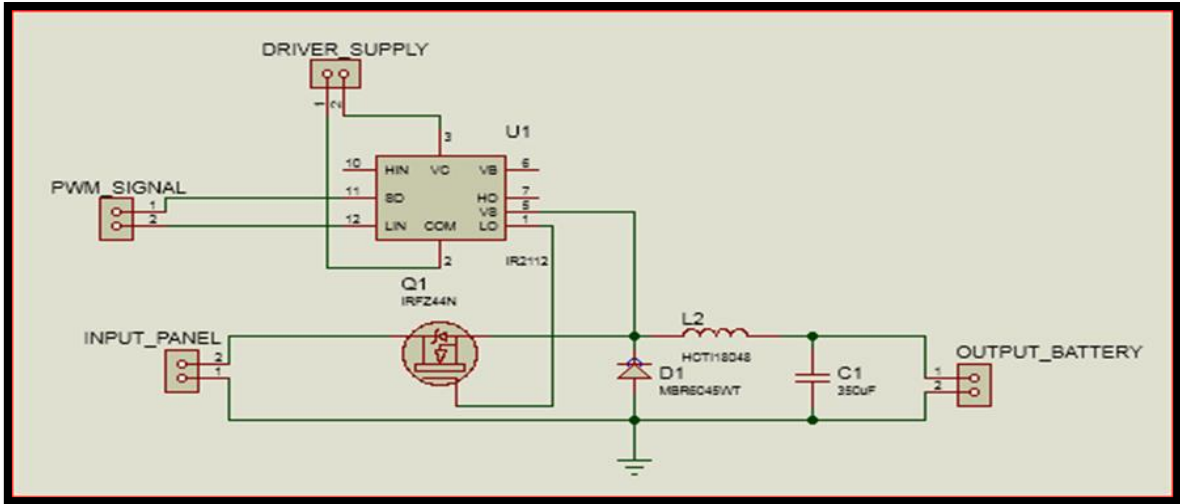


Figure III.21: Préparation du circuit finale pour le routage.

4. Routage de la carte :

Une fois que la taille et la forme de la carte ont été déterminées, l'étape suivante consiste à positionner chaque composant sur le circuit imprimé en suivant l'ordres schématique du circuit. Ensuite, nous procédons à un routage automatique et manuel des pistes de cuivre sur une seule face de la carte.

Pour lancer le routage automatique, vous pouvez cliquer sur l'option "Routeur automatique" dans le menu "Outils de conception de PCB". Ensuite, en maintenant les paramètres de routage par défaut, vous pouvez cliquer sur le bouton "Lancer routage". Le logiciel de conception de PCB placera alors automatiquement toutes les pistes du schéma sur le circuit imprimé.

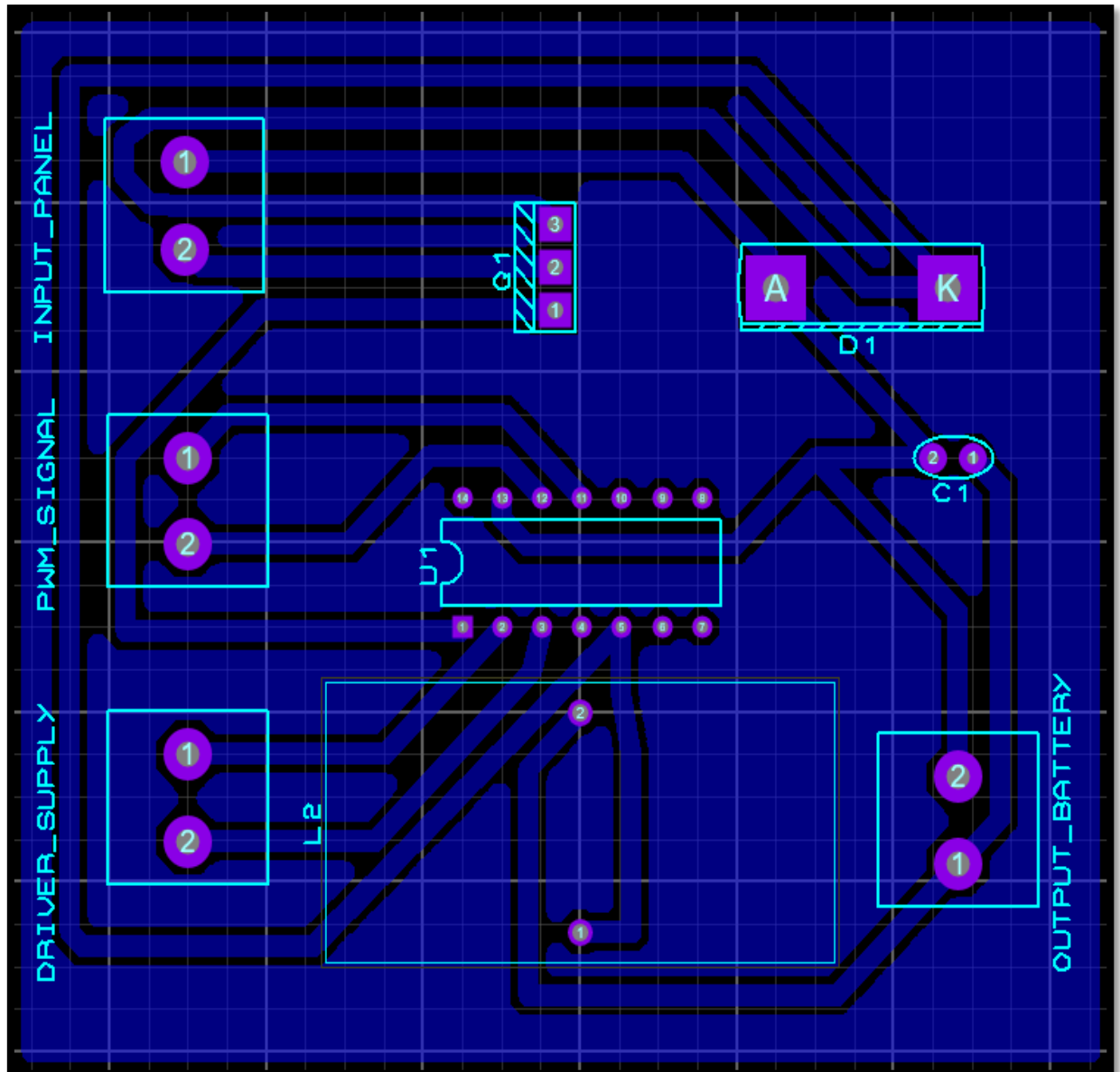


Figure III.22: L'emplacement des composants avec routage de La carte.

5. Visualisations 3D :

Pour visualiser la carte électronique en 3D, cliquez sur « Visualisation 3D » dans le menu Sorties de **PCB lay-out**. On peut alors zoomer et faire pivoter la carte dans l'espace pour l'observer sous différents angles.

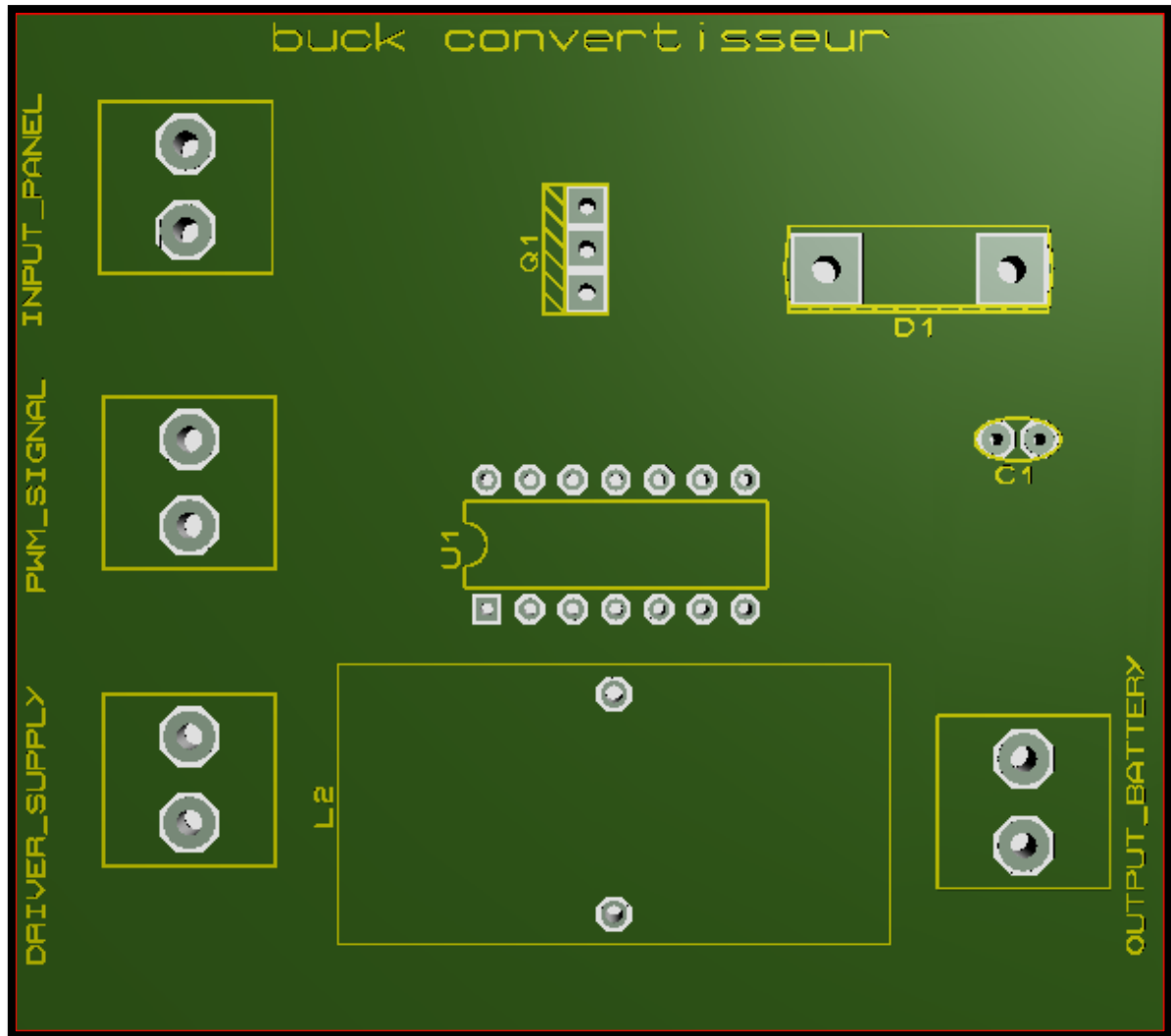


Figure III.23: vue inferieure sur la phase routée du circuit imprimé à l'aide du logiciel de première carte

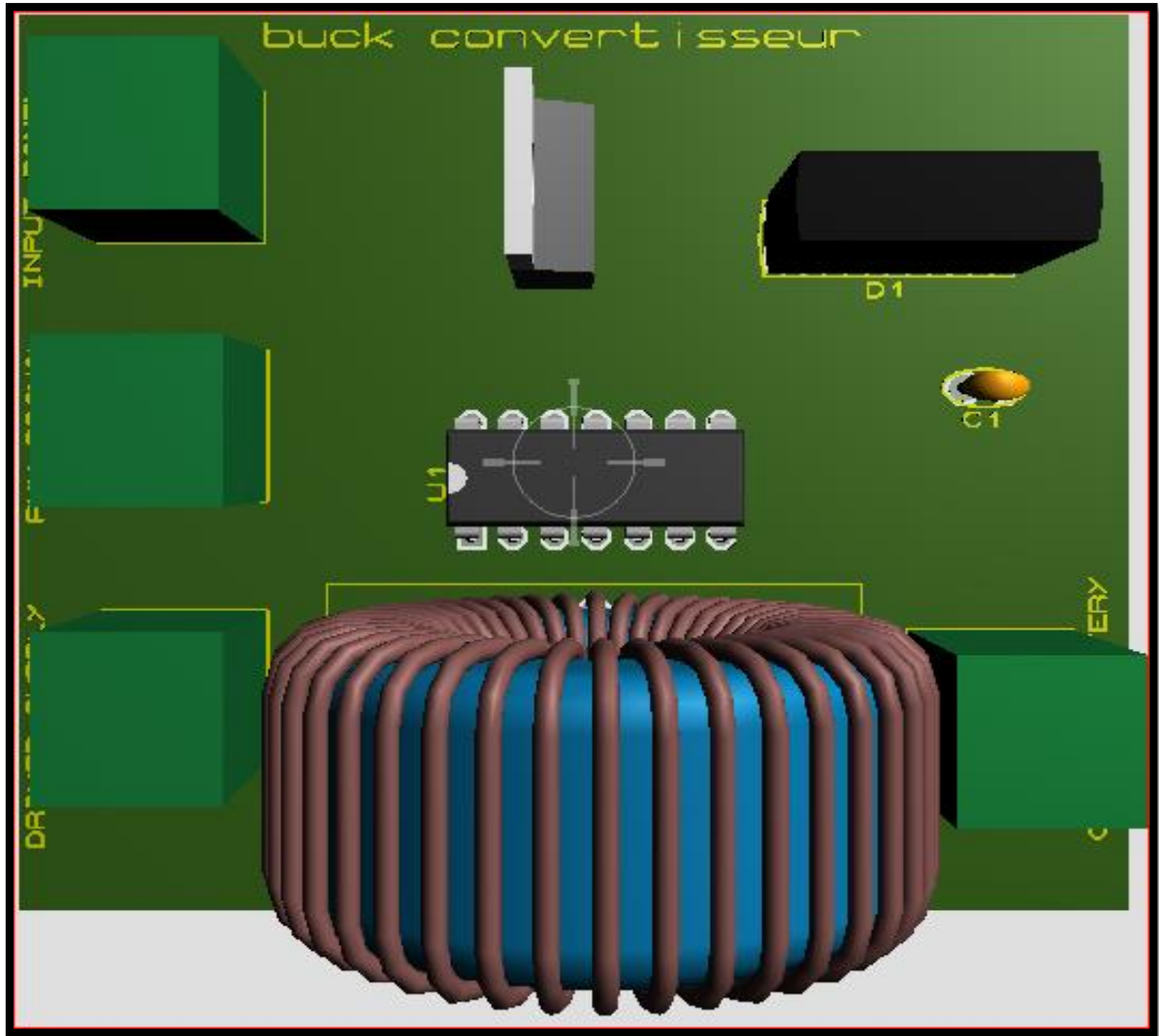


Figure III.24: visualisation du modèle en 3D de la carte

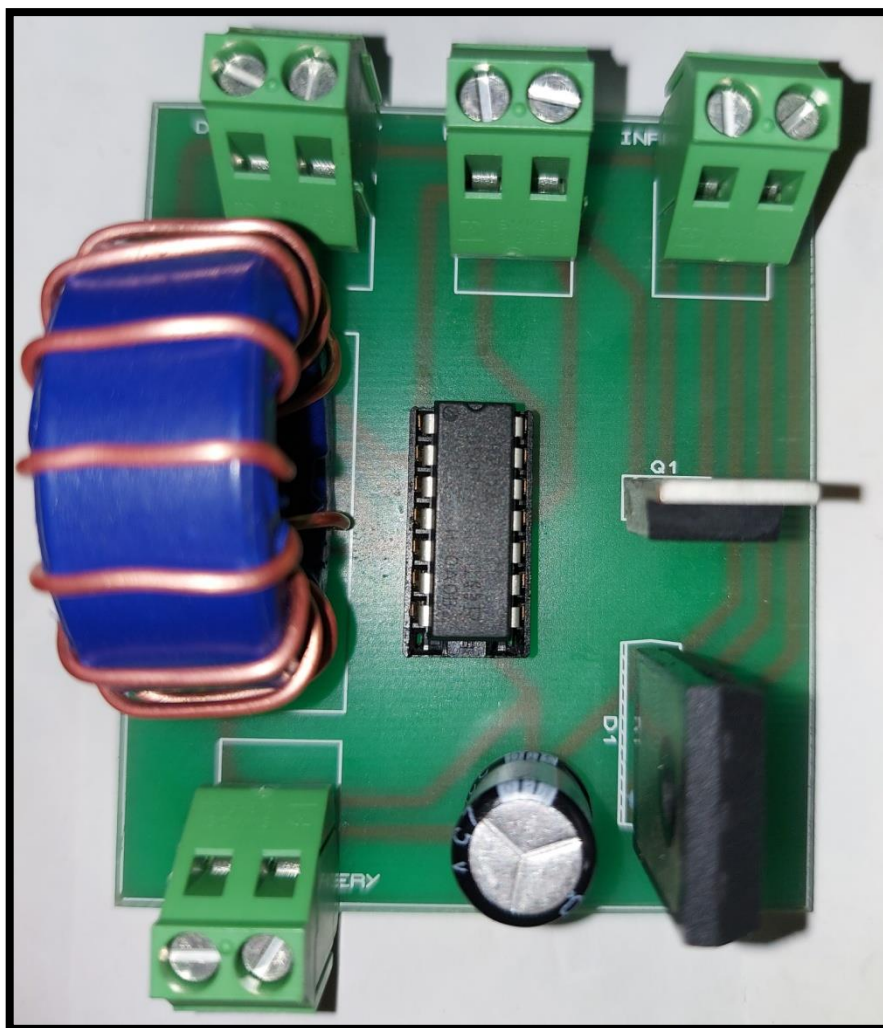


Figure III.25: Montage final de la carte.

IV. Conclusion :

Dans ce dernier chapitre, nous avons simulé le convertisseur Buck et les caractéristiques du module PV. Nous avons également simulé un système de régulation de la tension de sortie en utilisant le régulateur PWM et avons testé son fonctionnement avec une charge résistive. Nous avons également simulé la commande MPPT dans des conditions climatiques stables et instables afin d'optimiser le stockage d'énergie et maximiser la puissance de la chaîne photovoltaïque en utilisant l'algorithme P&O. De plus, nous avons effectué des mesures de température et d'éclairement réelles sur le système en utilisant un profil d'une journée pour simuler l'ensemble de notre travail. Nous avons intégré le MPPT et le régulateur PWM dans une même simulation avec un commutateur pour automatiser la transition entre les phases de MPPT et de régulation PWM selon les conditions définies. Ce chapitre a présenté les étapes importantes de la réalisation du convertisseur DC-DC Buck, notamment les schémas, les spécifications des composants et les tests réalisés sous Proteus.

Conclusion générale

Conclusion générale

L'objectif de cette étude est de contribuer au développement de l'utilisation de l'énergie photovoltaïque dans les systèmes autonomes, en particulier dans les domaines nécessitant l'utilisation d'accumulateurs coûteux et demandant un contrôle continu de leur état de charge. Le but envisagé à travers ce travail est de concevoir un convertisseur DC-DC de type Buck permettant de réguler le flux d'énergie dans un système photovoltaïque composé d'un module photovoltaïque et d'une batterie au plomb-acide. Nous avons abordé l'unité de puissance en identifiant les composants constitutifs du convertisseur Buck afin d'ajuster le courant fourni par le panneau photovoltaïque à la batterie. Nous nous sommes basés sur les étapes nécessaires pour générer les signaux MLI requis pour contrôler l'ouverture et la fermeture de l'élément de puissance "Mosfet". Nous avons réalisé l'ensemble du dispositif expérimental, décrivant en détail chaque composant du convertisseur Buck qui représente la carte de puissance d'un chargeur solaire. Nous avons procédé à la réalisation et aux tests du convertisseur Buck, et les résultats obtenus à travers le logiciel Proteus se sont révélés satisfaisants. Ce travail de recherche présente un intérêt scientifique, d'une part, en améliorant les compétences dans la conception de circuits imprimés, la programmation de microcontrôleurs et la modélisation des systèmes photovoltaïques, et d'autre part, en approfondissant les connaissances dans le domaine des systèmes de régulation et de stockage d'énergie solaire photovoltaïque. Malgré les défis rencontrés, nous sommes satisfaits des résultats obtenus, qui répondent de manière adéquate aux objectifs initialement fixés. Nous sommes toutefois conscients qu'il y a toujours place à l'amélioration dans tout projet. En poursuivant les recherches et les investigations, plusieurs perspectives intéressantes peuvent être envisagées, telles que l'ajout de filtres dans le circuit à l'entrée du panneau solaire ou aux bornes de la batterie, l'amélioration de l'efficacité du convertisseur Buck en prenant en compte les pertes, l'introduction d'une fonction de poursuite du point de puissance maximale (MPPT) et l'adaptation de l'appareil de manière à le rendre universel pour différents types de batteries (12V, 24V, 48V) et différentes capacités.

Références bibliographiques

Référence bibliographique :

- [1] H. Patel, V. Agarwal, "A MATLAB-Based Simulation for PV Systems With Different Converters," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 23, no. 1, pp. 302-310, March 2008.
- [2] G. Carrara, R. C. Naldi, R. Salutari, "Solar Photovoltaic Inverters: A Survey on the Different Technologies and Topologies Adopted," *IEEE Journal of Photovoltaics*, vol. 7, no. 5, pp. 1328-1340, Sept. 2017.
- [3] C. Deline, G. Granata, J. Broderick, "The Role of Power Electronics in Photovoltaic Energy Systems," *IEEE Journal of Photovoltaics*, vol. 8, no. 2, pp. 509-519, March 2018.
- [4] M. H. Rashid, "Power Electronics Handbook: Devices, Circuits, and Applications," Third Edition, Elsevier, 2011.
- [5] J. W. Kimball, "DC-DC Power Conversion Handbook," 2nd Edition, Newnes, 2011.
- [6] C. R. Sullivan, "Switching Power Supply Design," Third Edition, McGraw-Hill Education, 2009.
- [7] K. H. Hussein, I. Muta, T. Hoshino, "Maximum Photovoltaic Power Tracking: An Algorithm for Rapidly Changing Atmospheric Conditions," *IEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution*, vol. 142, no. 1, pp. 59-64, January 1995.
- [8] G. R. Walker, P. C. Sernia, "Cascaded DC-DC Converter Connection of Photovoltaic Modules," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 19, no. 4, pp. 1130-1139, July 2004.
- [9] A. S. El-Dein, M. M. A. Salama, "Photovoltaic Module Model Based on Manufacturer Data Sheets," *Electric Power Systems Research*, vol. 68, no. 1, pp. 59-66, October 2003.
- [10] A. M. Ibrahim, "Power Electronics for Renewable Energy Systems, Transportation and Industrial Applications," John Wiley & Sons, 2014.
- [11] M. H. Rashid, "Power Electronics Handbook: Devices, Circuits, and Applications," Third Edition, Elsevier, 2011.
- [12] R. W. Erickson and D. Maksimović, "Fundamentals of Power Electronics," Second Edition, Springer, 2001.
- [13] K. Iniewski, "Photovoltaics: Fundamentals, Technology and Practice," CRC Press, 2014.
- [14] C. Kim and A. Mohamed, "Design of DC-DC Converters for Photovoltaic Systems," *Energies*, 2017.
- [15] F. Blaabjerg, R. Teodorescu, M. Liserre, and A. V. Timbus, "Overview of Control and Grid Synchronization for Distributed Power Generation Systems," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2006.
- [16] M. H. Rashid, "Power Electronics Handbook: Devices, Circuits, and Applications," Third Edition, Elsevier, 2011.
- [17] J. W. Kimball, "DC-DC Power Conversion Handbook," 2nd Edition, Newnes, 2011.

- [18] C. R. Sullivan, "Switching Power Supply Design," Third Edition, McGraw-Hill Education, 2009.
- [19] L'architecture de système photovoltaïque autonome : <http://www.solaire-offgrid.com/le-solaire-et-ses-applications/architectures-solaire-photovoltaique/>
- [20] "Design of Autonomous Photovoltaic Power Systems" de John Dunlop (2002).
- [21] "Convertisseurs photovoltaïque" de Ludovic Protin et Stéphan Astier, Technique de l'ingénieur [-D360-]
- [22] Bendris Y, Belhabib F, « Etude comparative des différents convertisseurs statiques dédiés au photovoltaïque » Mémoire de Master, Université de Béjaïa, Juin 2013
- [23] M. belarbi, 'Modélisation et simulation d'un système de pompage photovoltaïque', Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed Boudiaf: Mémoire de Magister, (2006)
- [24] BELMILI, h, AYAD, m, BERKOUK, 'Optimisation de dimensionnement des installations photovoltaïques autonomes-Exemples d'applications, éclairage et pompage au fil du soleil. Revue des Energies Renouvelables' CICME, (2008),
- [25] BOUZIANE, Afaf. 'Évaluation du rayonnement solaire en Algérie pour des applications photovoltaïques'. Thèse de doctorat. Université Mohamed BOUDIAF de M'Sila, (2018)
- [26] OLEKSIY, Nichiporuk. 'Simulation, fabrication et analyse de cellules photovoltaïques à contacts arrières interdigités'. Institut national des sciences appliquées de Lyon. (2005).
- [27] M. Karim, 'Etude D'une Batterie De Stockage Dans Un Système Photovoltaïque', Université Abderrahmane-Mira-Bejaia, (2012)
- [28] SLAMA, Fateh. 'Modélisation d'un système multi générateurs photovoltaïques interconnectés au réseau électrique'. Thèse de doctorat. (2018)
- [29]] ZUE, Aslain Ovono. 'Conception et simulation de systèmes d'interfaçage de l'énergie photovoltaïque au réseau de distribution opérationnels [sic] 24 h par jour' technologie supérieure, (2007).
- [30] BOUKLI-HACENE, Omar. 'Conception et réalisation d'un générateur photovoltaïque muni d'un convertisseur MPPT pour meilleure gestion énergétique'. Thèse de doctorat. (2011).
- [31] TARIQ, Touama, NOUH, Hafidi. 'Commande d'un MPPT avec un convertisseur DC/DC pour un système photovoltaïque'. Université Mohamed Boudiaf-Msila. Thèse de doctorat.
- [32] [5] BOUDJEMA, Malika. 'Etude et identification des défauts de matériaux utilisés dans les systèmes photovoltaïques'. Thèse de doctorat (2016).
- [33] C. Kim and A. Mohamed, "Design of DC-DC Converters for Photovoltaic Systems," Energies, 2017.
- [34]] ISMAIL, Khoudrane. 'Etude d'un système de poursuite solaire pour les panneaux photovoltaïques'. Thèse de doctorat. (2014).