

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

UNIVERSITÉ BADJI MOKHTAR 0- ANNABA
BADJI MOKHTAR – ANNABA UNIVERSITY



جامعة بادجي مختار – عنابة

Faculté : TECHNOLOGIE
Département : ELECTROTECHNIQUE
Domaine : SCIENCES ET TECHNOLOGIES
Filière : ELECTROTECHNIQUE
Spécialité : commande électrique

Mémoire

Présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Master

Thème :

Etude d'un système a énergie renouvelable avec batterie de stockage

Présenté par : Boutaya Aya Romaissa

Gater Lamis

Encadrant : Ben Si Ali Nadia

Grade : Pr

BADJI Mokhtar - Annaba

Jury de Soutenance :

Benamimour Tariq	MCB	Badji Mokhtar- Annaba	Président
Ben Si Ali Nadia	Pr	Badji Mokhtar- Annaba	Encadrant
Kelaiaia Samia	MCA	Badji Mokhtar- Annaba	Examineur

Année Universitaire : 2024/2025

Remerciement

"Avant toute chose, nous exprimons notre profonde gratitude à Allah, qui nous a accordé la force, la persévérance et la patience nécessaires pour mener à bien ce travail."

Comme il est dit : « Celui qui ne remercie pas les gens ne remercie pas Allah. »

C'est dans cet esprit que nous adressons nos sincères remerciements à notre encadrante, M^{me} BENSIALI NADIA, pour son accompagnement constant tout au long de ce parcours, ses conseils précieux, le temps qu'elle nous a généreusement consacré, ainsi que le partage de son savoir approfondi et de sa précieuse expérience

DEDICACE

À ma mère,

*Toi qui as toujours été ma lumière, ma force silencieuse.
Par tes prières, ton amour inconditionnel et ton soutien discret mais
puissant, tu as guidé chacun de mes pas. Ce travail t'est dédié de
tout cœur.*

À mon père,

*Celui qui ne m'a jamais laissé manquer de rien,
Qui m'a transmis des valeurs de persévérance et de respect.
Je suis fier(ère) de porter ton nom et d'avancer avec ta confiance.*

À mes sœurs (Aya, Nesrine)

*Merci pour votre présence rassurante, vos encouragements et votre
amour inconditionnel. Vous avez été ma force dans les moments de
doute.*

À mon petit frère (Mohamed),

Merci pour ton soutien, souvent silencieux mais toujours sincère.

À Aya,

*Mon binôme, mon amie, ma confidente.
Nous avons partagé les efforts, les rires, les moments de stress et les
petites victoires. Merci d'avoir été cette alliée fidèle tout au long du
chemin.*

À mes amis (Nour, Dina, Rahma, Aya)

*Merci pour votre écoute, vos encouragements, votre patience et votre
bienveillance.*

Votre présence a donné à ce parcours une saveur particulière.

Lamis

DEDICACE

*À celle qui a été ma plus grande source de motivation et de soutien à
chaque étape, dont les prières m'ont portée et guidée jusqu'ici,
Ma mère, sans qui je ne serais rien*

*À celui qui ne m'a jamais rien refusé, dont je porte le nom avec
fierté,
Mon cher père*

*À ceux qui ont toujours été mon pilier et ma force,
Mes sœurs*

*Mon binôme, ma meilleure amie "Lamis ", nous avons toujours
puisé notre force les uns chez les autres*

*A tous mes amis Merci pour votre soutien constant, votre amour et
votre présence à chaque étape de mon parcours*

Aya

Résumé

Aujourd'hui, la demande énergétique mondiale connaît une croissance rapide, tandis que les ressources naturelles s'amenuisent en raison de l'essor démographique et du développement industriel. Pour faire face à cette problématique, les chercheurs se tournent de plus en plus vers l'exploitation des énergies renouvelables. Parmi celles-ci, l'énergie solaire occupe une place importante, car elle est disponible dans la plupart des régions du globe.

Dans les systèmes photovoltaïques, la production d'énergie est fortement variable et dépend des conditions météorologiques, absence de soleil la nuit, baisse de production par temps nuageux, etc. Cette variabilité rend nécessaire le stockage de l'énergie produite.

Ce mémoire présente une étude d'un système photovoltaïque avec batterie de stockage. Afin de faciliter la compréhension de ce système, une présentation claire et structurée du convertisseur DC-DC, composant crucial pour leur optimisation, est proposée. Le document explore également en détail le rôle fondamental des batteries de stockage dans l'assurance d'une alimentation électrique stable et continue.

Pour évaluer rigoureusement le comportement dynamique et les performances du système étudié, une simulation complète a été développée et réalisée sous l'environnement MATLAB/Simulink. Cette simulation a été effectuée pour voir l'interaction entre les différents éléments constitutifs d'un système photovoltaïque hybride : le générateur solaire, le convertisseur DC-DC, le système de stockage par batterie, ainsi que la commande MPPT intégrée.

Mots Clés : Énergie solaire, stockage de l'énergie, système photovoltaïque, batterie de stockage, convertisseur DC-DC, MPPT, énergies renouvelables.

Abstract

Today, global energy demand is growing rapidly, while natural resources are decreasing due to demographic expansion and industrial development. To address this issue, researchers are increasingly turning to the use of renewable energy sources. Among them, solar energy plays a key role, as it is available in most regions of the world.

In photovoltaic systems, energy production is highly variable and depends on weather conditions, absence of sun at night, drop in production in cloudy weather, Other such fluctuations. etc. This variability makes it necessary to store the energy produced.

This master's thesis presents a study of a photovoltaic system with battery storage. To facilitate understanding of this system, a clear and structured presentation of the DC-DC converter an essential component for system optimization is provided. The document also explores in detail the crucial role of storage batteries in ensuring a stable and continuous power supply.

To rigorously assess the dynamic behavior and performance of the studied system, a complete simulation was developed and carried out using the MATLAB/Simulink environment. This simulation was designed to analyze the interaction between the various components of an hybrid photovoltaic system: the solar generator, the DC-DC converter, the battery storage system, and the integrated MPPT control.

Keywords: Solar energy, energy storage, photovoltaic system, battery storage, DC-DC converter, MPPT, renewable energy sources.

المخلص

في الوقت الحاضر، يشهد الطلب العالمي على الطاقة نمواً سريعاً، بينما تتناقص الموارد الطبيعية بسبب التوسع الديموغرافي والتطور الصناعي. ولمواجهة هذه الإشكالية، يتجه الباحثون بشكل متزايد نحو استغلال مصادر الطاقة المتجددة. وتعتبر الطاقة الشمسية من بين أهم هذه المصادر، نظراً لتوفرها في معظم مناطق العالم .

تُعدّ إنتاجية الطاقة في الأنظمة الكهروضوئية متغيرة بشكل كبير وتعتمد على الظروف المناخية. هذه التغيرات تجعل من الضروري تخزين الطاقة المنتجة، خاصة في غياب أشعة الشمس خلال الليل، أو انخفاض الإنتاج في الأجواء الغائمة، وما إلى ذلك

يقدم هذا البحث دراسة لنظام كهروضوئي مدمج ببطارية تخزين. ولتسهيل فهم هذا النظام، تم تقديم شرح واضح ومنظم للمحول المستمر-المستمر، والذي يُعدّ عنصراً أساسياً في تحسين أداء النظام. كما يتناول البحث دور البطاريات التخزينية في ضمان توفير طاقة كهربائية مستقرة ومستمرة

ومن أجل تقييم السلوك الديناميكي والأداء العام للنظام المدروس بدقة، تم تطوير محاكاة شاملة وتنفيذها بواسطة الماتلاب للنظام المقترح

الكلمات المفتاحية:

الطاقة الشمسية، تخزين الطاقة، النظام الكهروضوئي، بطارية التخزين، مصادر الطاقة المتجددة

Sommaire

Introduction générale	1
Chapitre1	Généralité sur les PV
I.1	Introduction
I.2	Fonctionnement d'un système photovoltaïque
I.3	La cellule photovoltaïque
I.4	Caractéristiques et modélisation de la cellule PV
I.4.1	Modèles électriques d'une cellule photovoltaïque
I.4.2	Caractéristiques électriques d'une cellule photovoltaïque
I.4.2.a	Courant de court-circuit (I_{cc})
I.4.2.b	Tension de circuit-ouvert (V_{co})
I.4.2.c	Puissance de la cellule PV.
I.4.2.d	Puissance maximale d'une cellule PV
I.5	Les différents types de cellules solaires photovoltaïques
I.5.1	Les cellules monocristallines
I.5.2	Les cellules poly cristallines
I.5.3	Les cellules qui sont amorphes
I.6	Architecture générale d'un système photovoltaïque avec stockage
I.6.1	Les batteries
I.6.2	Les régulateurs de charge
I.6.3	Les convertisseurs
I.6.3.A	Hacheur
	-Convertisseur vers le haut
	-Convertisseur vers le bas
I.6.3.B	Les onduleurs
I.6.4	Les panneaux solaires
I.6.5.	Système de gestion de l'énergie (EMS)
I.7	Les type d'Installation photovoltaïque
I.7.1	Installation photovoltaïque raccordée au réseau électrique
I.7.2	Installations solaires autonomes.
I.7.3	Systèmes photovoltaïques avec stockage

I.8	Les avantage et les inconvénients d'un système de photovoltaïque	16
I.8.1	Les avantage d'un système de photovoltaïque	16
I.8.2	Les inconvénients d'un système de photovoltaïque.	16
I.9	Conclusion	17
Chapiter2	convertisseur DC / DC	18
II.1	Introduction	19
II.2	Les convertisseurs	19
II.3	Les hacheurs	19
II.4	Domaines d'utilisation des hacheurs	20
II.5	Les différents types de convertisseur DC-DC	20
II.5.1	Hacheur abaisseur (Buck)	21
II.5.1.A	Principe de fonctionnement d'hacheur Buck	21
II.5.1.B	Applications d'hacheur Buck dans les systèmes PV	22
II.5.2	Hacheur élévateur (boost)	23
II.5.2.A	Principe de fonctionnement d'hacheur boost	23
II.5.2.B	Applications d'hacheur boost dans les systèmes PV	24
II.5.2.C	Avantage de convertisseur boost	24
II.5.3	Hacheur Buck-boost	25
II.5.3.A	Principe de fonctionnement du convertisseur Buck-Boost	25
II.5.3.B	Applications d'hacheur buck-boost dans les systèmes PV	26
II.6	La modalisation et simulation des hacheurs	27
II.6.1	convertisseurs buck	27
II.6.2	convertisseurs boost	29
II.7	Simulations hacheur boost connecte a un générateur photovoltaïque sans MPPT	30
II.8	Simulations hacheur boost connecte a un générateur photovoltaïque avec un MPPT	34
II.9	Conclusions	36
Chapitre3	Les Batteries de Stockage pour Systèmes Photovoltaïques	37
III.1	Introduction	38
III.2	Qu'est-ce qu'une batterie de stockage ?	38
III.3	Les batteries dans les installations photovoltaïques	39
III.4	Les différents types de batteries	40

III.4.1	les Batteries lithium-ion	40
III.4.2	La Batteries au plomb ouvert	40
III.4.3	Les Batteries au nickel-ion	41
III.4.4	Les Batteries au sodium-ion	41
III.5	Types de batteries solaires	42
III.6	Paramètres importants des batteries	43
III.6.1	Capacité de la batterie	43
III.6.2	État de charge (SOC)	44
III.6.3	Profondeur de décharge (DOD)	44
III.6.4	Cycles de charge/décharge	44
III.6.5	Auto-décharge des batteries	44
III.7	Dimensionnement des batteries solaires	45
III.7.1	Choix de la tension du système	45
III.7.2	Calcul de la capacité de stockage et du nombre de batteries	45
III.8	Conclusion	46
Chapitre4	Simulation d'un Système Photovoltaïque avec Batterie Stockage	47
IV.1	Introduction	48
IV.2	Simulation des régimes de fonctionnement de la batterie de stockage	48
Scénario1	Mode charge	48
Scénario2	Mode décharge	50
Scénario3	Passage automatique charge ou décharge	51
IV.3	Simulation de la chaîne de stockage photovoltaïque	52
Scénario1	Mode charge (Irradiation 1000 W/m ²)	53
Scénario2	Mode décharge (Irradiation 100 W/m ²)	54
Scénario3	Irradiation variable (cycle jour-nuit)	55
IV.4	Conclusion	56
Conclusion générale		57

Liste de figures

Figure I.1	Représentation en coupe d'une cellule photovoltaïque	5
Figure I.2	Fonctionnement de base d'une cellule photovoltaïque	6
Figure I.3	Schéma équivalent électrique de la cellule PV q une diode	6
Figure I.4	Puissance maximale idéale et pratique.	9
Figure I.5	Cellule photovoltaïque monocristalline	10
Figure I.6	Cellule PV polycrystalline	10
Figure I.7	Cellule en silicium amorpha	11
Figure I.8	Convertisseur DC/DC Boost	12
Figure I.9	Convertisseur DC/DC Buck.	13
Figure I.10	Installation PV en autoconsommation raccordée au réseau	14
Figure I.11	Schéma général des systèmes photovoltaïques connecté au réseau	14
Figure I.12	Installation photovoltaïque autonome	15
Figure I.13	Schéma d'une installation photovoltaïque autonome	15
Figure II.1	Symbole d'un convertisseur DC-DC	19
Figure II.2	Composition d'un circuit de convertisseur DC/DC	20
Figure II.3	Schéma de principe d'un convertisseur Buck	21
Figure II.4	Schémas équivalents de l'hacheur Buck : (a) K fermé, (b) K ouvert	21
Figure II.5	Schéma de principe d'un convertisseur Boost	23
Figure II.6	Schémas équivalents de l'hacheur Boost : (a) K fermé, (b) K ouvert	23
Figure II.7	Convertisseur Buck-Boost	25
Figure II.8	Schémas équivalents de l'hacheur Buck-Boost : (a) K fermé, (b) K ouvert	26
Figure II.9	Schéma de simulation de l'hacheur Buck avec $V_{inp} = 48v$.	28
Figure II.10	Tensions à l'entrée et la sortie de l'hacheur Buck.	28
Figure II.11	Courants à l'entrée et la sortie de l'hacheur Buck	28
Figure II.12	Schémas convertisseur boost avec $V_{inp} = 24$	29
Figure II.13	Tensions à l'entrée et la sortie de l'hacheur Boost	29
Figure II.14	Courants à l'entrée et la sortie de l'hacheur Boost	30
Figure II.15	Courbes (I-V) (P-V) pour différentes irradiances d'un module photovoltaïque	31
Figure II.16	Courbes (I-V) (P-V) pour différentes températures d'un module photovoltaïque	31
Figure II.17	Schéma de simulation d'un hacheur Boost connecté à un générateur photovoltaïque sans MPPT	32
Figure II.18	Puissances du panneau photovoltaïque et de la charge sans MPPT pour un rapport cyclique $D=0.5$	33
Figure II.19	Courants à l'entrée et la sortie de l'hacheur Boost sans MPPT pour un rapport cyclique $D=0.5$	33

Figure II.20	Tensions à l'entrée et la sortie de l'hacheur Boost sans MPPT pour un rapport cyclique. D=0.5	33
Figure II.21	Simulations panneau PV_Hacheur_Boost_charge résistive avec MPPT	34
Figure II.22	Puissance du panneau photovoltaïque et de la charge avec MPPT	35
Figure II.23	Tensions à l'entrée et la sortie de l'hacheur Boost avec MPPT	35
Figure II.24	Courants à l'entrée et la sortie de l'hacheur Boost avec MPPT	35
Figure III.1	Les batteries de stockage	39
Figure III.2	Une installation PV avec stockage,	39
Figure III.3	Les batteries lithium-ion.	40
Figure III.4	Batteries acid /plomb	41
Figure III.5	Les batteries au nickel-ion	41
Figure IV.1	Schéma de Simulation de la batterie en mode Charge-décharge	49
Figure IV.2	Les Caractéristiques de la batterie mode charge	50
Figure IV.3	Les Caractéristiques de la batterie en mode décharge.	51
Figure IV.4	Les caractéristiques de la batterie dans les deux régimes (Charge- décharge)	52
Figure IV.5	Schéma de simulation de la chaine de stockage photovoltaïque	53
Figure IV.6	Caractéristiques de la batterie en mode charge avec une irradiation de 1000 W/m ²	54
Figure IV.7	Caractéristiques de la batterie en mode décharge avec une irradiation de 100 W/m ²	55
Figure IV.8	Caractéristiques de la batterie dans une chaine de stockage photovoltaïque pour différentes irradiations.	56

Notations et Symboles

PV	photovoltaïque
I_{ph}	Photo courant produit.
I_{sat}	Courant de saturation de la diode.
R_s, R_{sh}	La résistance série et la résistance parallèle, respectivement.
V_t = $\frac{KT}{q}$	Tension thermique à la température T.
q	Charge de l'électron (1.602*10 ⁻¹⁹ C).
K	Constante de Boltzmann (1.381*10 ⁻²³ J/K).
K_i	Constante (1.2A/cm ² K ³).
n	Facteur de non idéalité de la jonction.
T Kelvin.	Température effective de la cellule en degré Kelvin.
E_g	Energie de gap (pour le silicium cristallin est égale à 1.12 eV.
G	L'ensoleillement en W/m ² .
I_{cc}	Courant de court-circuit
V_{co}	Tension de circuit-ouvert
P(w)	Puissance fournie par la cellule PV.
V(V)	Tension mesurée aux bornes de la cellule PV.
I(A)	Intensité débitée par la cellule PV
P_{max} (W)	La puissance maximale fournie par la cellule PV.
V_{co}(V)	La tension de circuit ouvert mesurée aux bornes de la cellule PV.
I_{cc} (A)	L'intensité de court-circuit débitée par la cellule PV.
DC/DC	Hacheur

DC/AC :	Les onduleurs
EMS :	Système de gestion de l'énergie
SAPV :	Système Photovoltaïque Autonome
MCC :	Moteur à courant continu
η :	le rendement
α :	Rapport cyclique
V_{in} :	Tension d'entrée de l'hacheur [V].
V_{out} :	Tension de sortie de l'hacheur [V].
MPPT :	Point de Puissance maximale
PI :	Un régulateur (Proportionnel-Intégral)
SOC:	état de charge
R_{ch}:	Resistance de charge
U_{ref}:	Tension de reference
I_{ref_dech} :	Référence de décharge
V_{dc} :	La source d'alimentation continue
I_B:	Courant de batterie.
I_{B-ref} :	Courant de référence pour la branche Buck, Boost ou Buck-Boost
P&O:	Perturbation & Observation
DOD :	Profondeur de décharge
C_t :	Capacité totale de stockage
E_c:	Energies journalière consommée
N_{ja} :	Nombre de jours d'autonomie

V : Tension nominale du système

Nbt : Le nombre des batteries total.

Us : La tension du système PV

Ub : La tension de la batterie

Ct : La capacité de stockage du système en (Ah)

Cb : La capacité d'une batterie en (Ah)

Introduction Générale

La croissance continue de la population mondiale entraîne une augmentation significative de la demande énergétique. Actuellement, les énergies fossiles assurent environ 75 % de cette demande. Cependant, en plus d'être non renouvelables, ces sources sont fortement polluantes en raison des gaz toxiques qu'elles émettent. Ainsi, pour faire face à cette croissance et son impact sur l'environnement, il est devenu nécessaire de s'orienter vers les énergies renouvelables pour réduire la dégradation des zones de production de l'énergie électrique classique et favoriser les autres sources d'énergies renouvelables pour faire face à la demande tout en préservant la nature. L'énergie solaire, en particulier, représente la ressource renouvelable la plus abondante, pouvant être exploitée sous forme thermique ou photovoltaïque.

L'utilisation de l'énergie photovoltaïque pour la production d'électricité présente un intérêt certain. En Algérie, comme dans de nombreux pays en développement, l'alimentation électrique des zones isolées et montagneuses constitue un véritable défi. Dans ce contexte, les systèmes photovoltaïques apparaissent comme une solution prometteuse, d'autant plus que le pays bénéficie d'une situation géographique particulièrement avantageuse, avec une durée d'ensoleillement élevée et une importante quantité d'énergie solaire incidente.

Dans le cadre de ce travail, nous nous intéressons à l'association d'une chaîne de production photovoltaïque avec un système de stockage, en utilisant un convertisseur statique DC-DC de type élévateur de tension (Boost), car il permet d'augmenter la tension de sortie du système, en intégrant la fonction de recherche du point de puissance maximale MPPT (Maximum Power Point Tracking) avec la technique Perturbation et Observation (P&O).

Ce mémoire est structuré en quatre principaux chapitres :

Dans le premier chapitre nous présentons des généralités sur les systèmes photovoltaïques, en abordant dans un premier temps les principes de fonctionnement des cellules solaires et leur architecture générale. Il s'intéresse ensuite aux différents types d'installations photovoltaïques autonomes, hybrides et connectées au réseau. Avant de présenter les principaux avantages et inconvénients de cette technologie, une attention particulière sera également portée à l'intégration des systèmes de stockage d'énergie, devenus essentiels pour optimiser l'utilisation de l'énergie solaire dans un contexte d'intermittence de la ressource.

Le deuxième chapitre sera consacré à l'étude et à la modélisation des convertisseurs DC-DC les plus couramment employés dans les systèmes photovoltaïques et à l'étude des différents types de convertisseur DC-DC avec ou sans contrôle MPPT (Maximum Power Point Tracking), en mettant en lumière leur rôle, leur fonctionnement, leur comportement dynamique et leur impact sur le rendement global du système.

Le troisième chapitre porte sur les batteries de stockage dans les installations photovoltaïques. Dans lequel on montre le rôle clé des accumulateurs face à l'intermittence de la production solaire, puis description de leur fonctionnement électrochimique. Nous examinerons ensuite les principales technologies disponibles (lithium-ion, plomb-acide, nickel-cadmium et sodium-ion) et leurs spécifications techniques et les paramètres de performance (capacité, état de charge, profondeur de décharge, cycles, Auto-décharge), essentiels pour un bon dimensionnement. Enfin, une méthode de dimensionnement des batteries solaires sera exposée, en tenant compte des besoins énergétiques, de la tension du système, de la capacité requise et du nombre de batteries nécessaires, afin d'optimiser la fiabilité et la durabilité de l'installation.

Le quatrième chapitre a fait l'objet de l'étude, la modélisation et la simulation de la chaîne de stockage photovoltaïque en utilisant le logiciel Matlab\Simulink. La première partie de ce chapitre est consacrée à l'analyse du comportement dynamique de la batterie lors de ses différents régimes de fonctionnement : charge, décharge et transition entre ces deux états avec une source d'alimentation continu. La deuxième partie une simulation de l'ensemble de la chaîne de conversion et de stockage alimentée par un panneau photovoltaïque sous divers scénarios d'irradiation solaire est effectuée dans le but d'évaluer la robustesse, la fiabilité et l'efficacité énergétique du système mis en œuvre.

Chapitre 1 : généralité sur les systèmes photovoltaïque



I.1 Introduction

Le soleil, source d'énergie inépuisable et omniprésente, offre un potentiel immense que nous devons exploiter. Sa lumière peut être directement convertie en électricité grâce au processus photovoltaïque, un phénomène physique découvert par A. Becquerel et dont ont ensuite été expliqués par Albert Einstein.". Le terme "photovoltaïque" décrit précisément cette transformation de l'énergie lumineuse en énergie électrique par le transfert d'énergie des photons aux électrons d'un matériau spécifique.

C'est sur cette synergie entre le rayonnement solaire et la conversion photovoltaïque que repose le système photovoltaïque, une technologie clé pour valoriser l'énergie solaire.

Ce chapitre explorera en premier lieu les notions fondamentales du photovoltaïque, de son principe de fonctionnement à la constitution et aux différents types de cellules solaires. Nous aborderons ensuite l'architecture générale d'un système photovoltaïque intégrant le stockage d'énergie, ainsi que les divers types d'installations existantes. Enfin, nous examinerons les convertisseurs, éléments essentiels de ces systèmes, avant de peser les avantages et les inconvénients de cette solution énergétique d'avenir.

I.2 Fonctionnement d'un système photovoltaïque

L'électricité produite par la conversion d'une part du rayonnement solaire grâce à une cellule photovoltaïque est appelée énergie photovoltaïque solaire. De manière simplifiée, un photon de lumière incident peut, dans certaines conditions, provoquer le déplacement d'un électron, générant ainsi un courant électrique.

Les cellules photovoltaïques sont fabriquées avec des matériaux semi-conducteurs principalement produits à partir de silicium (« Silicon » en anglais). Lorsqu'ils sont soumis à l'action de la lumière, des électrons sont éjectés de ces matériaux et ils circulent dans un circuit fermé, produisant alors de l'électricité.

L'effet photovoltaïque se manifeste quand un photon est absorbé dans un matériau composé de semi-conducteurs dopés p (positif) et n (négatif), dénommé comme jonction p-n (ou n-p). Sous l'effet de ce dopage, un champ électrique est présent dans le matériau de manière permanente (comme un aimant possède un champ magnétique permanent). Quand un photon incident (grain de lumière) interagit avec les électrons du matériau, il cède son énergie à l'électron qui se retrouve libéré de sa bande de valence et subit donc le champ électrique intrinsèque. Sous l'effet

de ce champ, l'électron migre vers la face supérieure laissant place à un trou qui migre en direction inverse. Des électrodes placées sur les faces supérieure et inférieure permettent de récolter les électrons et de leur faire réaliser un travail électrique pour rejoindre le trou de la face antérieure [1] [30]

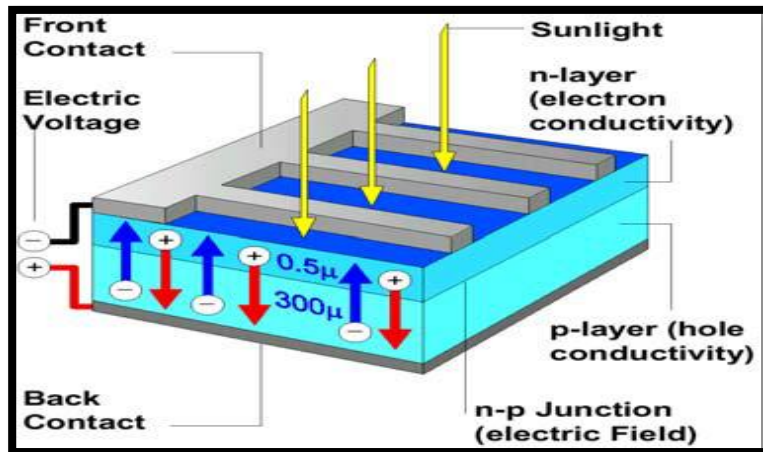


Figure I.1 Représentation en coupe d'une cellule photovoltaïque

I.3 La cellule photovoltaïque

Les cellules photovoltaïques, ces fines composantes électroniques (environ 200 μm d'épaisseur) qui transforment la lumière du soleil en électricité, sont les éléments constitutifs des panneaux solaires. Il faut une quantité étonnamment faible de matériau pour les fabriquer, et chaque panneau solaire en contient généralement entre 60 et 72.

Le silicium, matériau principal de la cellule, est composé d'atomes. Ces atomes sont eux-mêmes composés d'un noyau et d'électrons qui gravitent autour de celui-ci.

Lorsque les photons du soleil frappent les électrons du silicium, ils les excitent. Pour que ces électrons puissent circuler et former un courant électrique, il faut créer une différence de potentiel, un peu comme les pôles positif et négatif d'une pile. C'est pourquoi le silicium est dopé avec du bore pour créer un pôle positif et avec du phosphore pour créer un pôle négatif.

Ce déséquilibre de charges fait que les électrons se déplacent naturellement du pôle négatif vers le pôle positif, générant ainsi un courant électrique. [2]

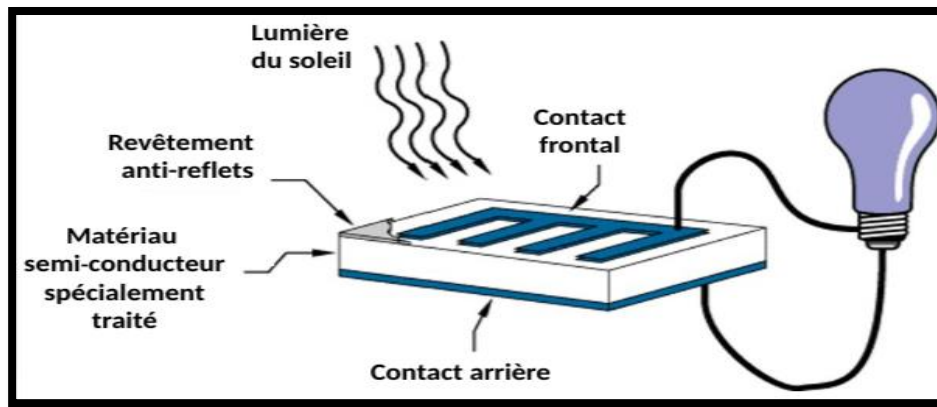


Figure I.2 fonctionnement de base d'une cellule photovoltaïque

I.4 Caractéristiques et modélisation de la cellule PV

I.4.1 Modèle électrique d'une cellule photovoltaïque

La figure I.3 présente le schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque éclairée, composé d'un générateur de courant en parallèle avec une diode, ainsi que deux résistances parasites : une résistance série et une résistance parallèle. [29]

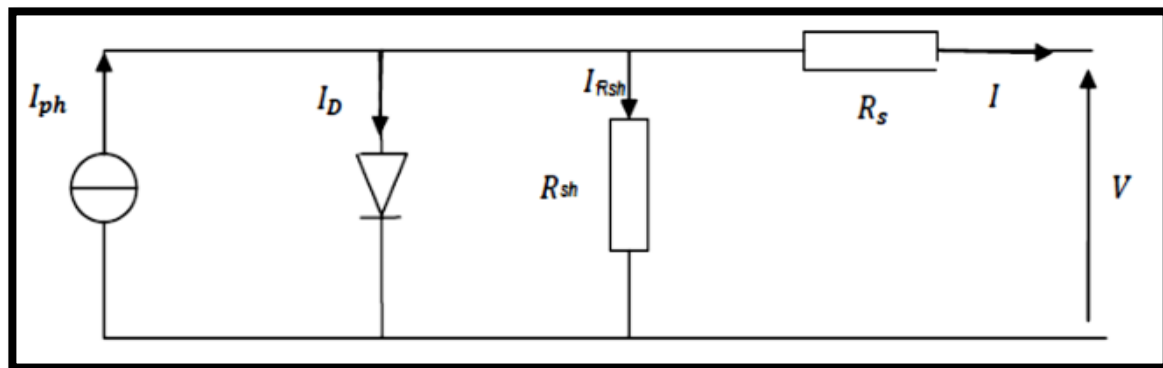


Figure I.3 Schéma équivalent électrique de la cellule PV à une diode

La loi de Kirchhoff nous permet d'écrire la relation suivante :

$$I_{ph} = I_D + I_{Rsh} + I \text{ Donc : } I = I_{ph} - I_D - I_{Rsh} \quad \text{I.1}$$

$$I = I_{ph} - I_{sat} \left[\exp \left(\frac{V + (I + R_s)}{n \cdot V_t} \right) - 1 \right] - \frac{V + (I + R_s)}{R_{sh}} \quad \text{I.2}$$

Les expressions de (I_{ph}) et de (I_{sat}) le courant de saturation de la diode sont donnés par :

$$I_{ph} = [I_{sc} + (K_i * (T - 298))] * \frac{G}{1000} \quad I.3$$

$$I_{sat} = \left(I_{sc} * \exp \left[\left(\frac{V_{co}}{n.V_t} \right) \right] - 1 \right) * \left(\frac{\tau}{298} \right)^3 * \exp \left[\frac{q + E_g + \left(\frac{1}{298\tau} \right)}{n.K} \right] \quad I.4$$

D’ou :

I_{ph} : Photo courant produit.

I_{sat} : courant de saturation de la diode.

R_s, R_{sh} : La résistance série et la résistance parallèle, respectivement.

$V_t = \frac{KT}{q}$: tension thermique à la température T.

q : charge de l’électron ($1.602 * 10^{-19} C$).

K : Constante de Boltzmann ($1.381 * 10^{-23} J/K$).

K_i : Constante ($1.2 A/cm^2 K^3$).

n : Facteur de non idéalité de la jonction.

T : Température effectif de la cellule en degré Kelvin.

E_g : Energie de gap (pour le silicium cristallin est égale à 1.12 eV).

G : l’ensoleillement en W/m^2 .

I.4.2 Caractéristiques électriques d’une cellule photovoltaïque

I.4.2.a Courant de court-circuit (I_{cc})

C’est le courant pour lequel la tension aux bornes de la cellule ou du générateur PV est nul.

Dans le cas idéal (R_s nulle et R_{sh} infinie), ce courant se confond avec le photo-courant I_{ph} dans le cas contraire, en annulant la tension V dans l’équation I.2 , on obtient :

$$I_{cc} = I_{ph} - I_{sat} \left[\exp \left(\frac{q * (I_{cc} + R_s)}{n.V_t} \right) - 1 \right] - \frac{(I_{cc} + R_s)}{R_{sh}} \quad I.5$$

Pour la plupart des cellules (dont la résistance série est faible), on peut négliger le terme

$I_{sat} \left[\exp \left(\frac{q * (I_{cc} + R_s)}{n.V_t} \right) - 1 \right]$ devant I_{ph} . L’expression approchée du courant de court-circuit et alors :

$$I_{cc} \cong \frac{I_{ph}}{\left(1 + \frac{R_s}{R_{sh}}\right)} \quad I.6$$

Quantitativement, il a la plus grande valeur du courant génère par la cellule pratiquement ($I_{cc}=I_{ph}$).

I.4.2.b. Tension de circuit-ouvert (V_{co})

C'est la tension V_{co} pour laquelle le courant débité par le générateur photovoltaïque est nul (c'est la tension maximale d'une photopile ou d'un générateur photovoltaïque).

$$0 = I_{cc} - I_{sat} \left[\exp \left(\frac{q * V}{n * Kt} \right) - 1 \right] - \frac{V}{R_{sh}} \quad I.7$$

Dans le cas idéal, sa valeur est légèrement inférieure à :

$$V_{co} = V_t \ln \left[\frac{I_{ph}}{I_{sat}} + 1 \right] \quad I.8$$

I.4.2.c. Puissance de la cellule PV

Dans des conditions ambiantes de fonctionnement fixes (éclairage, température, vitesse de circulation de l'air ambiant, etc...), la puissance électrique $P(W)$ disponible aux bornes d'une cellule PV est :

$$P=VI \quad I.9$$

P(w) : Puissance fournie par la cellule PV.

V(V) : Tension mesurée aux bornes de la cellule PV.

I(A) : Intensité débitée par la cellule PV.

I.4.2.d. Puissance maximale d'une cellule PV

Pour une cellule solaire idéale, la puissance maximale P_{max} correspondrait donc à la tension de circuit ouvert V_{co} multipliée par le courant de court-circuit I_{cc} :

$$P_{max} = V_{co} I_{cc} \quad I.10$$

P_{\max} (W) : La puissance fournie par la cellule PV.

V_{co} (V) : La tension de circuit ouvert mesurée aux bornes de la cellule PV.

I_{cc} (A) : L'intensité de court-circuit débitée par la cellule PV.

En pratique, la courbe caractéristique d'une cellule PV est plus "arrondie" (Figure I.3), et la tension au point de puissance maximale $V_{P_{\max}}$ est inférieure à la tension de circuit ouvert V_{co} , de même que le courant fourni $I_{P_{\max}}$ est inférieur, pour cette même tension, au courant de court-circuit. L'expression de la puissance en ce point est donnée par :

$$P_{\max} = V_{p \max} I_{p \max} \quad \text{I.11}$$

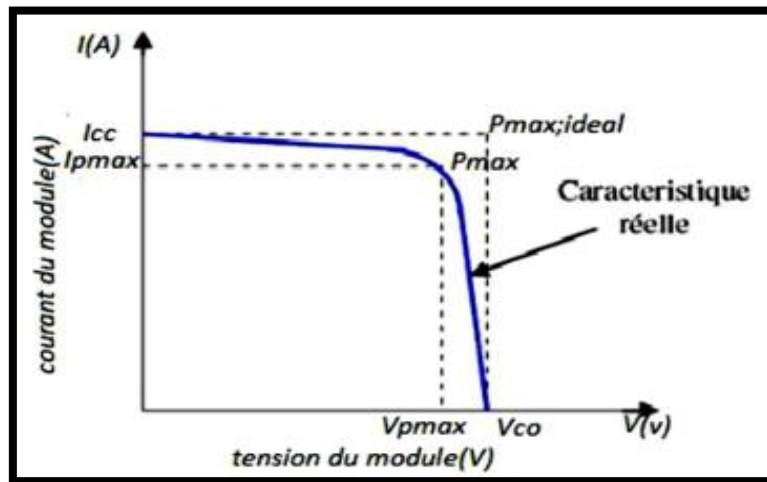


Figure I.4 Puissance maximale idéale et pratique

I.5 Les différents types de cellule solaires photovoltaïques

Les cellules photovoltaïques se déclinent en plusieurs types, chacun ayant ses propres caractéristiques et applications.

On distingue plusieurs types, mais le monocristallin et le polycristallin sont les plus fréquemment employés. [3]

I.5.1 Les cellules monocristallines

Elles sont constituées d'un cristal à double couche, habituellement fait de silicium. Toutefois, leur production engendre des coûts élevés mais il est cependant plus efficace que le silicium

poly-cristallin . Ces panneaux sont actuellement essentiels sur le marché du photovoltaïque, car ils produisent constamment de l'énergie. Le rendement moyen se situe entre 8 et 23 %.



Figure I.5 Cellule photovoltaïque (monocristalline)

I.5.2 Les cellules poly cristallines

Elles coûtent moins cher parce qu'elles sont composées de plusieurs cristaux partir d'un bloc de silicium cristallisé. Elles ont un rendement de 11 à 15%. Ces cellules, grâce à leur potentiel de gain de productivité, se sont aujourd'hui imposées .Durée de vie estimée : 30 ans.



Figure I.6 Cellule PV poly cristalline

I.5.3 Les cellules qui sont amorphes

Les panneaux solaires amorphes se caractérisent par un coût de fabrication nettement inférieur, mais leur efficacité actuelle ne dépasse pas 6 à 8%.

Ces panneaux ont un rendement inférieur à celui des technologies polycristallines ou monocristallines. Toutefois, le silicium amorphe facilite la fabrication de panneaux de grandes dimensions à faible coût en nécessitant peu de matière première.

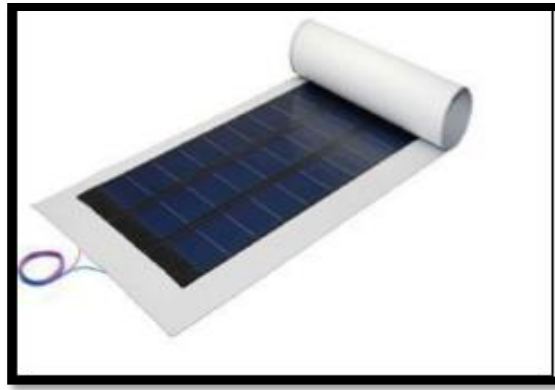


Figure I.7 Cellule en silicium amorphe

I.6 Architecture générale d'un système photovoltaïque avec stockage

L'architecture générale d'un système photovoltaïque avec stockage comprend plusieurs éléments clés qui travaillent ensemble pour convertir l'énergie solaire en électricité utilisable et la stocker pour une utilisation ultérieure. [4]

I.6.1 Les batteries

Le stockage d'énergie dans les systèmes photovoltaïques autonomes est en général assuré par les batteries. Celles-ci sont des éléments essentiels au bon fonctionnement des systèmes autonomes. Le stockage d'énergie représente 13 à 15% des investissements initiaux sur une durée d'exploitation de 20 ans.

Les batteries seront employées lorsque la demande en énergie ne coïncide pas avec la disponibilité du soleil. La sélection du type de batterie s'effectue en fonction d'une estimation de la puissance moyenne quotidienne et du temps de stockage requis. [4]

I.6.2 Les régulateurs de charge

Dans les installations photovoltaïques, divers types de régulateurs jouent un rôle crucial dans la gestion des flux d'énergie. Leur fonction principale est de protéger la batterie contre les surcharges provenant des panneaux solaires et les décharges excessives dues à l'utilisation. De plus, ils assurent la surveillance et la sécurité de l'ensemble du système.

On distingue principalement trois grandes catégories de régulateurs de charge : Les régulateurs série, Les régulateurs shunt, Les régulateurs à recherche de point de puissance maximum (MPPT ou Maximum Power Point Tracking). [4]

I.6.3 Les convertisseurs

On trouve des convertisseurs DC/DC ainsi que des convertisseurs DC/AC qui génèrent une tension alternative destinée aux charges appropriées. [4]

I.6.3.A Le Hacheur

Ces convertisseurs servent à convertir la tension des batteries en une autre tension DC.

Deux types de convertisseurs possèdent une efficacité élevée : le convertisseur élévateur et le convertisseur abaisseur.

- Convertisseur Boost

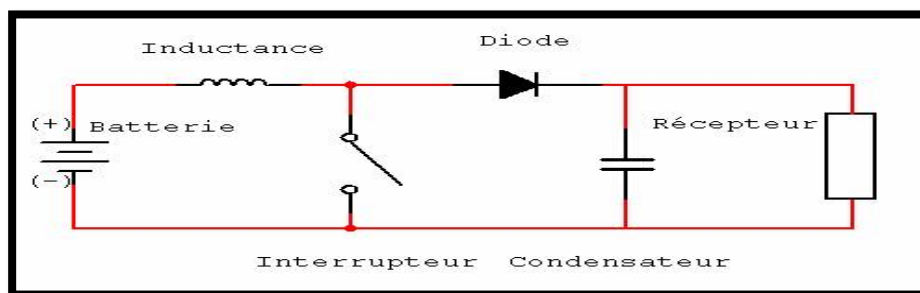


Figure I.8 convertisseur DC/DC Boost

Lorsque l'interrupteur est fermé l'inductance stocke le courant provenant de la batterie et lorsque l'interrupteur est ouvert l'inductance dérivée dans le condensateur et le récepteur.

- Convertisseur Buck

Quand l'interrupteur est en position fermée, le courant passe de la batterie vers le récepteur par l'intermédiaire de l'inductance.

Si l'interrupteur s'ouvre, la tension aux bornes de l'inductance change de polarité, et ainsi, la diode offre une protection à l'interrupteur.

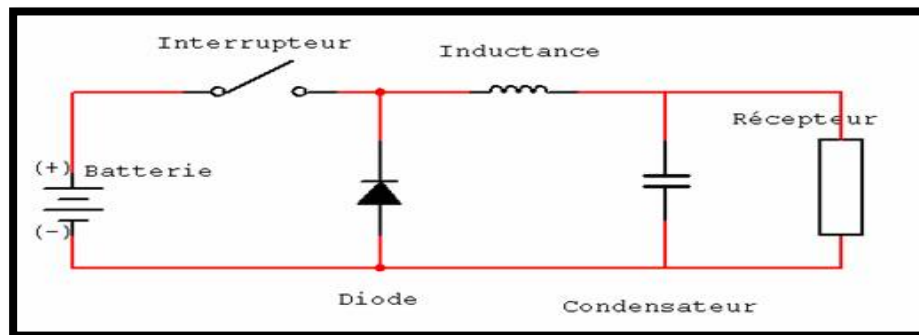


Figure I.9 Convertisseur DC/DC Buck

I.6.3.B Les onduleurs

Ces dispositifs, appelés onduleurs, ont une double utilité : ils peuvent alimenter des appareils isolés du réseau électrique classique, mais aussi connecter une installation photovoltaïque à ce même réseau. Il est important de noter que les commutations internes de l'onduleur peuvent parfois altérer la forme de l'onde électrique, ce qui peut potentiellement causer des perturbations pour les cellules photovoltaïques.

I.6.4 Les panneaux solaires

Élément fondamental d'un système photovoltaïque, le panneau solaire est un dispositif conçu pour capter le rayonnement du soleil et le convertir en électricité grâce au phénomène photovoltaïque. Il est constitué de petites unités appelées cellules solaires. [5]

I.6.5 Système de gestion de l'énergie (EMS)

L'EMS surveille et contrôle l'ensemble du système photovoltaïque avec stockage. Il optimise l'utilisation de l'énergie en fonction de la production solaire, de la consommation électrique et de l'état de charge des batteries.

Il peut également permettre l'intégration avec le réseau intelligent (smart grid) pour une gestion plus efficace de l'énergie. [5]

I.7 Les type d'Installation photovoltaïque

I.7.1 Installation photovoltaïque raccordée au réseau électrique

En général, les systèmes reliés au réseau électrique représentent une option idéale pour la génération d'électricité solaire, aussi bien en termes de production d'énergie que de dépenses financières. Dans ces installations, l'élément crucial le plus sensible pour intégrer l'énergie générée par le système photovoltaïque dans le réseau de distribution est l'inverseur.

Si ces équipements sont adaptés dans un bâtiment, une nouvelle installation électrique sera mise en place, et le bâtiment possèdera désormais deux systèmes électriques distincts. D'un côté, il y a la source d'alimentation électrique classique et de l'autre, l'implantation d'une installation solaire photovoltaïque. [5] [7]

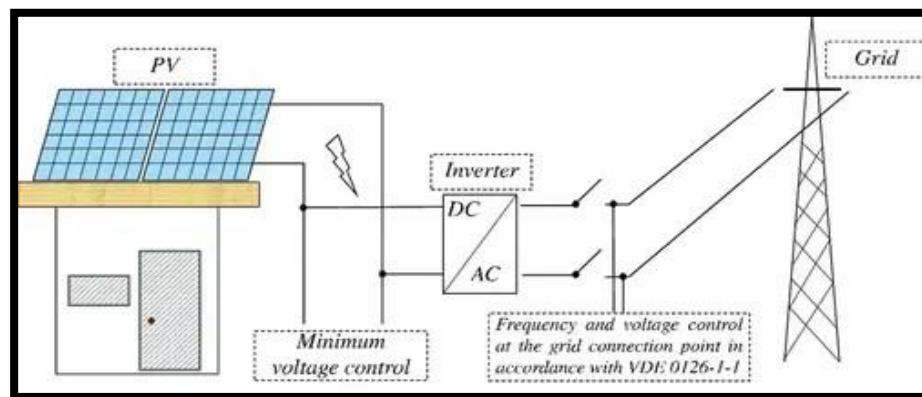


Figure I.10 Installation photovoltaïque en autoconsommation totale raccordée au réseau

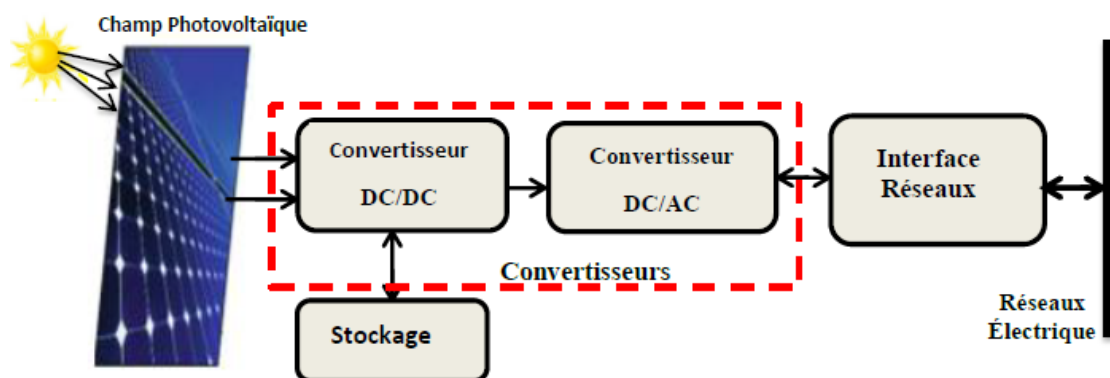


Figure I.11 Schéma général des systèmes photovoltaïques connectés au réseau

I.7.2 Installations solaires autonomes

Les systèmes photovoltaïques autonomes fonctionnent de manière totalement indépendante et ne se servent que de l'énergie qu'ils génèrent eux-mêmes. Dans ce contexte, on évoque un système autonome (Système Photovoltaïque Autonome : SAPV System). Ils sont généralement utilisés pour approvisionner en électricité les utilisateurs qui ne sont pas branchés au réseau, situation courante dans les zones rurales ou dans les habitations isolées. Cette configuration comprend un ou plusieurs panneaux solaires, un contrôleur de charge. [7]



Figure I.12 Installation photovoltaïque solaires autonomes

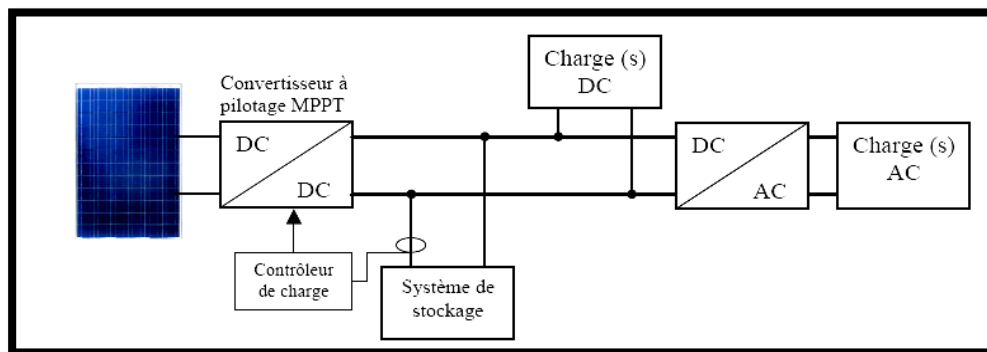


Figure I.13 Schéma d'une installation photovoltaïque autonome

I.7.3. Systèmes photovoltaïques avec stockage

Ce sont des systèmes reliés au réseau électrique public et équipés de batteries de stockage.

Ils permettent de stocker l'énergie produite pour l'utiliser ultérieurement, même pendant la nuit ou en cas de panne de courant.

Ils optimisent l'autoconsommation et offrent une plus grande indépendance énergétique.[5]

I.8 Les avantages et les inconvénients d'un système de photovoltaïque

I.8.1 Les avantages d'un système de photovoltaïque

Les systèmes photovoltaïques présentent plusieurs avantages notables, notamment :

- Énergie renouvelable : Ils utilisent l'énergie solaire, une ressource inépuisable, contribuant ainsi à la réduction de la dépendance aux combustibles fossiles.
- Réduction des coûts d'électricité : En produisant leur propre électricité, les utilisateurs peuvent diminuer leurs factures d'énergie, et dans certains cas, vendre l'excédent d'électricité au réseau.
- Faible impact environnemental : Les systèmes photovoltaïques génèrent de l'électricité sans émissions de gaz à effet de serre, ce qui aide à lutter contre le changement climatique.
- Autonomie énergétique : Ils permettent aux utilisateurs de devenir moins dépendants des fournisseurs d'énergie, surtout dans les zones éloignées.
- Durabilité : Les panneaux solaires ont une longue durée de vie, souvent de 20 à 30 ans, avec un entretien minimal.
- Création d'emplois : L'industrie des énergies renouvelables, y compris les systèmes photovoltaïques, crée des emplois dans la fabrication, l'installation et la maintenance.

Ces avantages font des systèmes photovoltaïques une option attrayante pour la production d'énergie durable. [6]

I.8.2 Les inconvénients d'un système de photovoltaïque

Les systèmes photovoltaïques présentent également certains inconvénients, notamment :

- Coût initial élevé : L'installation de panneaux solaires peut nécessiter un investissement initial important, ce qui peut être un obstacle pour certains utilisateurs.
- Dépendance aux conditions météorologiques : La production d'énergie dépend de l'ensoleillement, ce qui peut varier selon les saisons et les conditions climatiques, entraînant une production d'énergie intermittente.

- Espace requis : Les installations photovoltaïques nécessitent une surface suffisante pour l'installation des panneaux, ce qui peut être un problème dans les zones urbaines ou densément peuplées.
- Stockage de l'énergie : Pour une utilisation nocturne ou pendant les jours nuageux, un système de stockage (comme des batteries) est souvent nécessaire, ce qui peut augmenter les coûts et la complexité du système.
- Impact environnemental de la fabrication : La production de panneaux solaires peut avoir un impact environnemental, notamment en raison de l'utilisation de matériaux et de processus chimiques.
- Durée de vie des panneaux : Bien que les panneaux aient une longue durée de vie, leur efficacité peut diminuer avec le temps, et leur recyclage à la fin de leur cycle de vie peut poser des défis.

Ces inconvénients doivent être pris en compte lors de l'évaluation de l'adoption de systèmes photovoltaïques. [6]

I.9 Conclusion

Le système photovoltaïque représente aujourd'hui une solution fiable, propre et durable pour la production d'électricité. En exploitant l'effet photovoltaïque, les cellules solaires convertissent directement l'énergie lumineuse du soleil en électricité, grâce aux propriétés des matériaux semi-conducteurs comme le silicium. Différents types de cellules (monocristallines, polycristallines et amorphes) offrent des performances variées adaptées à différents besoins et budgets.

L'architecture d'un système photovoltaïque avec stockage repose sur une combinaison d'éléments techniques complémentaires : panneaux solaires, batteries, régulateurs de charge, convertisseurs, onduleurs et un système de gestion de l'énergie (EMS). Selon le contexte, ces systèmes peuvent être connectés au réseau, autonomes ou hybrides avec stockage.

Malgré certains inconvénients tels que le coût initial élevé et la dépendance à l'ensoleillement, les avantages des systèmes photovoltaïques notamment leur caractère renouvelable, leur faible impact environnemental et leur potentiel d'autonomie énergétique en font une composante clé de la transition énergétique. À l'avenir, les avancées technologiques et la baisse des coûts devraient renforcer encore davantage leur déploiement à grande échelle.

Chapitre 2 : les convertisseurs

II.1 Introduction

Au cœur de tout système photovoltaïque performant réside la gestion et l'adaptation efficace de l'énergie électrique produite par les panneaux solaires. C'est ici qu'interviennent les convertisseurs DC-DC, des éléments essentiels qui assurent la transformation du courant et de la tension pour répondre aux exigences des diverses applications. Ce chapitre se consacre à l'exploration de ces dispositifs cruciaux. En se concentrant particulièrement sur les hacheurs.

Nous examinerons leur principe de fonctionnement, leurs différents types (Buck, Boost, Buck-Boost) et leurs applications spécifiques dans le contexte des systèmes photovoltaïques. Une attention particulière sera accordée à la modélisation et à la simulation de ces convertisseurs, mettant en évidence l'impact de l'intégration d'un système de poursuite du point de puissance maximale (MPPT) sur l'optimisation de l'énergie solaire.

II.2 Les convertisseurs

Les convertisseurs jouent un rôle essentiel dans les systèmes photovoltaïques (PV), en adaptant le courant et la tension produits par les panneaux solaires pour diverses applications. Voici un aperçu des principaux types de convertisseurs utilisés avec les systèmes PV : [8]

II.3 Les hacheurs

Les hacheurs sont des convertisseurs statiques qui jouent un rôle crucial dans la transformation de l'énergie continue. Leur fonction principale est de générer une tension continue variable à partir d'une source de tension continue fixe. Ils y parviennent grâce à l'utilisation de composants passifs tels que des condensateurs et des inductances, ainsi que de commutateurs électroniques. [8]

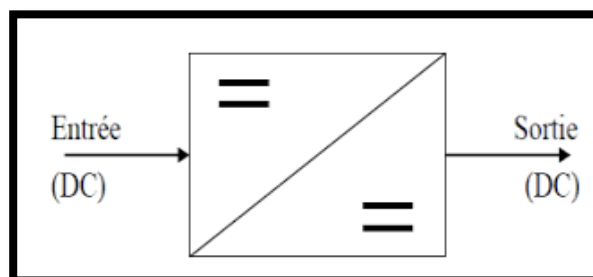


Figure II.1 Symbole d'un convertisseur DC-DC

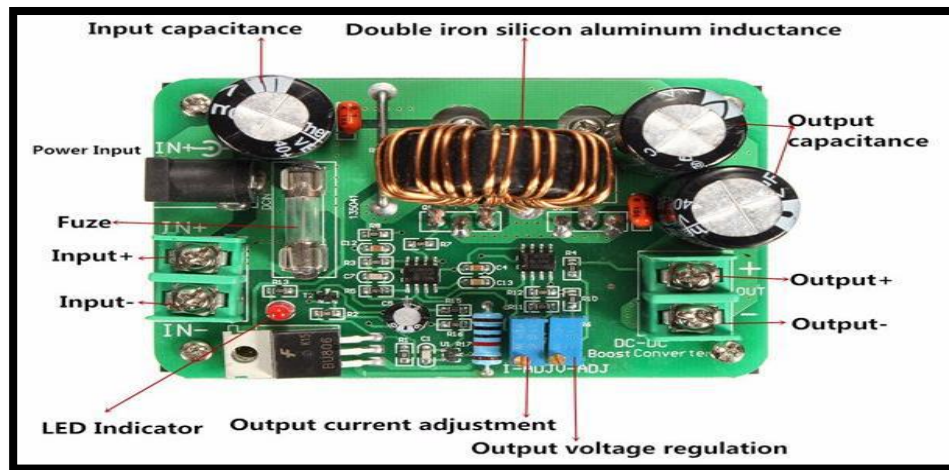


Figure II.2 La composition d'un circuit de convertisseur DC/DC

II.4 Domaines d'utilisation des hacheurs

L'un des principaux champs d'application des hacheurs est la régulation de la vitesse du moteur à courant continu (MCC). Ils sont, par exemple, présents sur la plupart des équipements de traction intermédiaire, comme ceux employés dans le métro. Ils permettent un contrôle précis de l'énergie électrique avec une grande flexibilité et une efficacité élevée.

On trouve également des hacheurs dans tous les dispositifs dédiés à l'exploitation de l'énergie éolienne ou solaire.

De plus, ils sont aussi employés dans l'alimentation des moteurs pas à pas, fournissant une maîtrise précise du mouvement. [9]

II.5 Les différents types de convertisseur DC-DC

Les hacheurs, ces convertisseurs DC-DC indispensables, se déclinent en une variété de types, chacun adapté à des applications spécifiques.

Dans les convertisseurs à stockage d'énergie, trois types des convertisseurs statiques sont distinguée.

- **Hacheurs abaisseurs (Buck)** : Réduisent la tension.
- **Hacheurs éleveurs (boost)** : Augmentent la tension.
- **Hacheurs Buck-boost** : Peuvent à la fois réduire et augmenter la tension

II.5.1 Hacheurs abaisseurs (Buck)

L'équipement appelé dévolteur, hacheur abaisseur ou hacheur série est un dispositif qui transforme une tension continue en une autre de valeur inférieure. L'entrée est caractérisée par une tension continue, tandis que la sortie est définie comme une source de courant continu. En d'autres termes, il réduit le niveau de tension. [10]

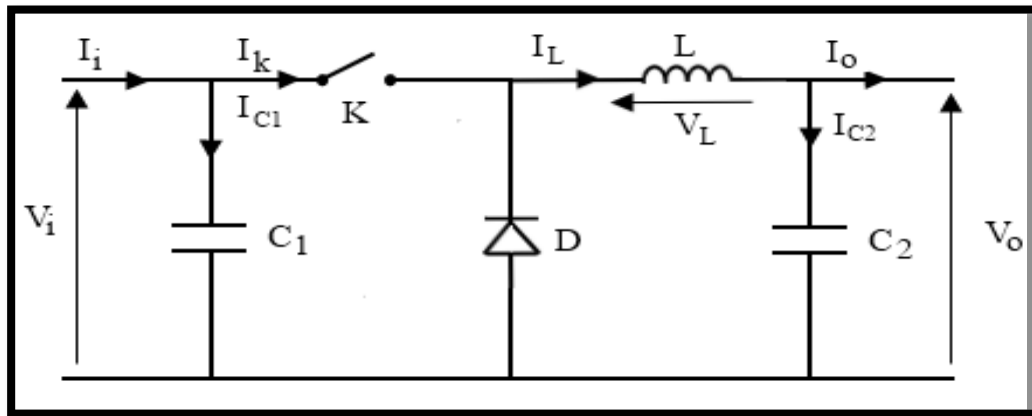


Figure II.3 Schéma de principe d'un convertisseur Buck

II.5.1.A Principe de fonctionnement d'hacheur Buck

L'hacheur Buck réduit une tension continue en commutant un interrupteur k. L'énergie est stockée dans une inductance lorsque l'interrupteur k est fermé, puis libérée à travers une diode vers la charge lorsque l'interrupteur k est ouvert. Le rapport cyclique de l'interrupteur k contrôle la tension de sortie, la stabilisant malgré les variations de tension d'entrée ou de la charge. [12]

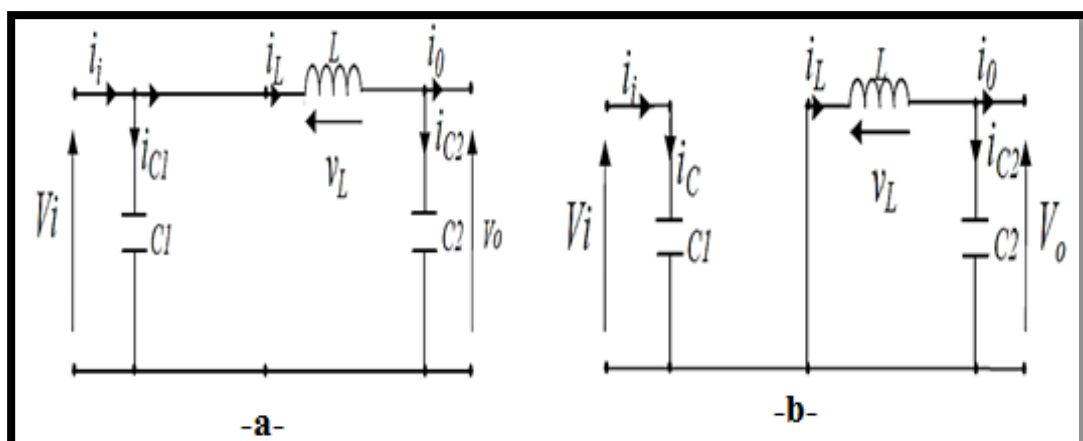


Figure II.4 Schéma équivalents de l'hacheur Buck (a) : K fermé, (b) : K ouvert

En appliquant les lois de Kirchhoff sur les deux circuits, on obtient les systèmes d'équations suivants [16]:

$$\begin{aligned} i_{c1}(t) &= c_1 \frac{dv_i(t)}{dt} = i_i(t) - i_L(t) \\ i_{c2}(t) &= c_2 \frac{dv_o(t)}{dt} = i_L(t) - i_o(t) \\ V_L &= L \frac{di_L}{dt} = V_i(t) - V_o(t) \end{aligned} \quad \text{II.1}$$

Pour la deuxième période (1-d) Ts :

$$\begin{aligned} i_{c1}(t) &= c_1 \frac{dv_i(t)}{dt} = i_i(t) \\ i_{c2}(t) &= L \frac{dv_L(t)}{dt} = i_L(t) - i_o(t) \\ V_L(t) &= L \frac{di_L}{dt} = -V_o(t) \end{aligned} \quad \text{II.2}$$

Le rapport de conversion M est défini comme étant le rapport entre la tension de sortie et la tension d'entrée comme suit :

$$M(\alpha) = \frac{V_o}{V_i} = \eta \times \alpha \quad \text{II.3}$$

Où η est le rendement du convertisseur défini comme étant le rapport entre la puissance de la sortie sur la puissance d'entre

$$\eta = \frac{P_o}{P_i} = \frac{V_o I_o}{V_i I_i} \quad \text{II.4}$$

II.5.1.B Applications d'hacheur Buck dans les systèmes PV

Les convertisseurs statiques de type dévolteurs sont principalement utilisés dans les systèmes à courant continu de haute performance pour l'entraînement, tels que la traction électrique, les véhicules électriques et les équipements de machines. Ils sont également présents dans les systèmes photovoltaïques, notamment pour une gestion optimale de l'énergie. Il est principalement employé pour ajuster la tension variable produite par les panneaux solaires à une tension plus basse et stable, indispensable pour recharger des batteries ou fournir de l'énergie à des appareils à faible tension.[11]

II.5.2 Hacheurs élévateurs (boost)

Hacheurs élévateurs (boost) un convertisseur DC-DC pour accroître la tension, également appelé convertisseur Boost, est un type de convertisseur statique continu-continu. Sa fonction principale est de transformer une tension continue d'entrée en une tension continue de sortie de valeur supérieure. En d'autres termes, il augmente le niveau de tension. [10]

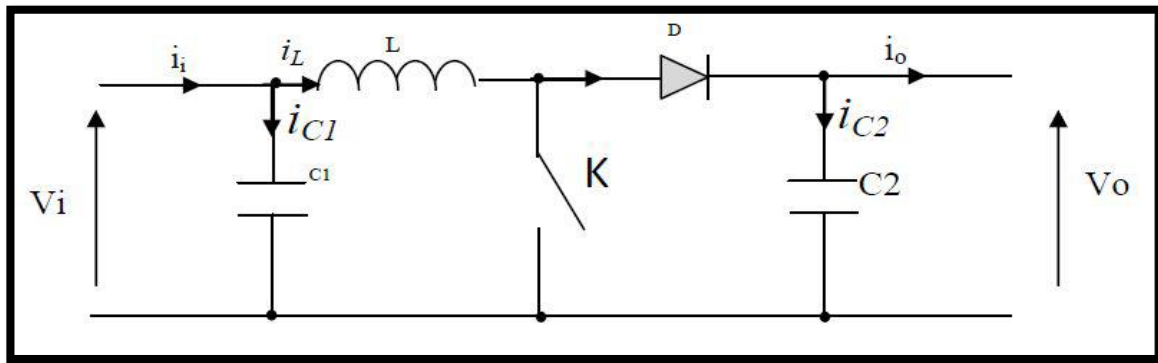


Figure II.5 Schéma de principe d'un convertisseur Boost

II.5.2.A Principe de fonctionnement d'hacheur boost

Le hacheur Boost augmente une tension continue grâce à un interrupteur et une inductance. L'interrupteur fermé stocke l'énergie dans l'inductance, puis ouvert, il la libère avec la tension d'entrée, chargeant un condensateur et alimentant la charge. Le rapport cyclique de l'interrupteur contrôle la tension de sortie, la stabilisant malgré les variations la tension d'entrée ou de la charge. [12]

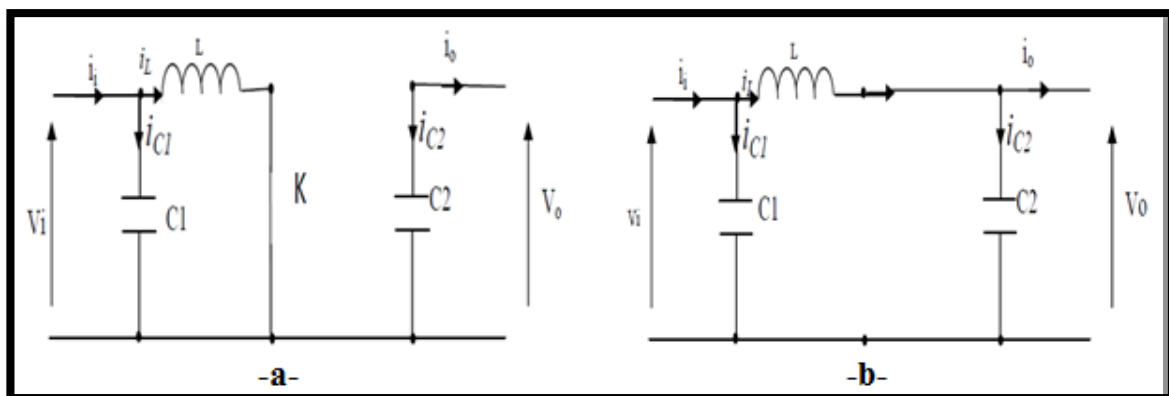


Figure II.6 Schéma équivalents de l'hacheur Boost (a) : K fermé, (b) : K ouvert

En appliquant les lois de Kirchhoff sur les deux circuits de la Figure II-5, on obtient les systèmes d'équations suivants

Pour la première période d.t.

$$i_{c1}(t) = c_1 \frac{dv_i(t)}{dt} = i_i(t) - i_L(t)$$

$$i_{c2}(t) = c_2 \frac{dv_o(t)}{dt} = -i_o(t) \quad \text{II.5}$$

$$V_L = L \frac{di_L}{dt} = -V_i(t)$$

Pour la deuxième période (1-d) Ts

$$i_{c1}(t) = c_1 \frac{dv_i(t)}{dt} = i_i(t) - i_L(t)$$

$$i_{c2}(t) = c_2 \frac{dv_o(t)}{dt} = i_L(t) - i_o(t) \quad \text{II.6}$$

$$V_L = L \frac{di_L}{dt} = V_i(t) - V_o(t)$$

On peut calculer le rapport de conversion $\frac{V_o}{V_i}$ par :

$$M(\alpha) = \frac{V_o}{V_i} = \frac{1}{1-\alpha} \quad \text{II.7}$$

II.5.2.B Applications d'hacheur boost dans les systèmes PV

On utilise principalement les convertisseurs survolteurs dans les radars et les systèmes d'allumage. Il est possible d'adapter les hacheurs pour une utilisation pour faire partie intégrante des systèmes autonomes d'approvisionnement en énergie, renfermant plusieurs batteries et sources d'énergie renouvelable à courant continu, comme les panneaux solaires, les piles à hydrogène ou les éoliennes. Ils optimisent la gestion énergétique en augmentant la tension des panneaux solaires pour alimenter efficacement les onduleurs et les charges opérationnelles à haute tension. Cette adaptation garantit une opération au point de puissance maximale (MPPT), optimisant l'efficacité même à faible tension. Incorporé dans les systèmes de chargement, il défend les batteries contre les décharges profondes, allongeant ainsi leur longévité [11]

II.5.2.C Avantage de convertisseur BOOST

Bien que le convertisseur Buck soit reconnu pour son rendement élevé dans les systèmes traditionnels, le convertisseur Boost se révèle souvent plus avantageux pour les installations

photovoltaïques équipées d'un suiveur de point de puissance maximale (MPPT). En effet, le fonctionnement en mode courant continu du convertisseur Boost permet d'extraire une quantité maximale de puissance des cellules solaires, optimisant ainsi le rendement énergétique global du système. Cette capacité à maximiser la puissance extraite des panneaux solaires confère au convertisseur Boost un avantage significatif en termes de rendement par rapport au convertisseur Buck dans les applications photovoltaïques. De manière générale, le convertisseur Boost est privilégié pour les applications nécessitant une tension de sortie supérieure à la tension d'entrée, tandis que le convertisseur Buck est utilisé pour abaisser la tension de sortie. [13]

II.5.3 Hacheur Buck-boost

L'hacheur abaisseur-élévateur est aussi appelé dévolteur-survolteur ou de type BuckBoost. Le convertisseur indirect DC-DC à stockage inductif se nomme également hacheur abaisseur-élévateur. L'entrée est alimentée par une tension continue et la sortie est alimentée par une source de tension continue. [10]

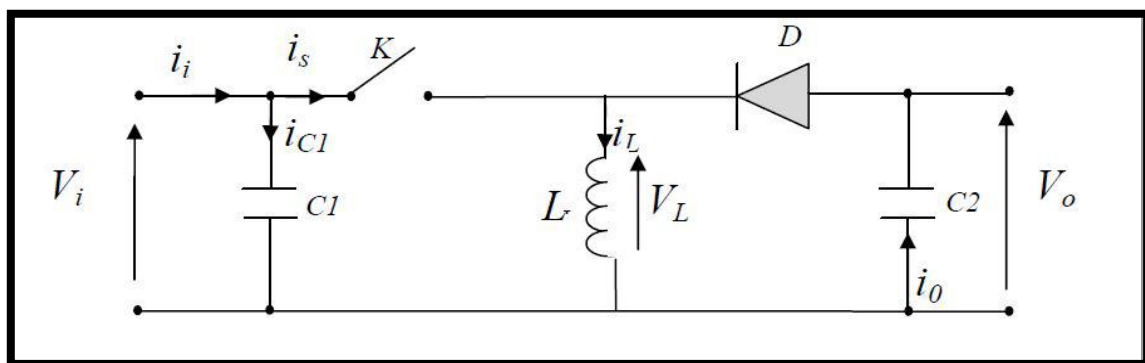


Figure II.7 Convertisseur Buck-Boost

II.5.3.A. Principe de fonctionnement du convertisseur Buck-Boost

Le convertisseur Buck-Boost, adaptable, ajuste une tension continue en stockant puis libérant l'énergie d'une inductance via un interrupteur k . Il inverse la polarité de sortie et régule la tension par le rapport cyclique de l'interrupteur k . [12]

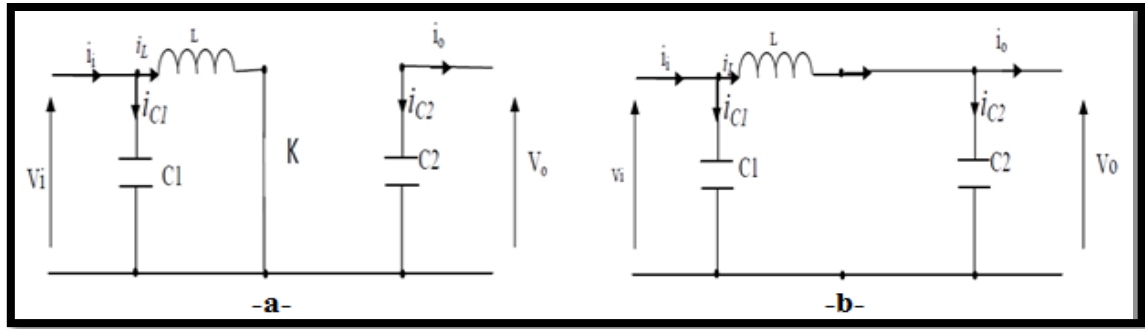


Figure II.8 Schéma équivalents du hacheur Buck-Boost (a) : K fermé, (b) : K ouvert

En appliquant les lois de Kirchhoff sur les deux circuits, on obtient les systèmes d'équations suivants

Pour la première période d.Ts

$$i_{c1}(t) = c_1 \frac{dv_i(t)}{dt} = i_i(t) - i_L(t)$$

$$i_{c2}(t) = c_2 \frac{dv_o(t)}{dt} = -i_o(t) \quad \text{II.8}$$

$$V_L = L \frac{di_L}{dt} = V_i(t)$$

Pour la deuxième période (1-d) Ts

$$i_{c1}(t) = c_1 \frac{dv_i(t)}{dt} = i_i(t) - i_L(t)$$

$$i_{c2}(t) = c_2 \frac{dv_o(t)}{dt} = i_L(t) - i_o(t) \quad \text{II.9}$$

$$V_L = L \frac{di_L}{dt} = V_o(t)$$

Le rapport de conversion se calcule comme suit :

$$M(\alpha) = \frac{V_o}{V_i} = \frac{\alpha}{1-\alpha} \quad \text{II.10}$$

II.5.3.B Applications d'hacheur buck-boost dans les systèmes PV

L'hacheur Buck-Boost trouve une utilité précieuse dans les systèmes photovoltaïques, offrant une flexibilité essentielle pour la gestion de l'énergie. Sa capacité à la fois à augmenter et à réduire la tension le rend idéal pour les applications où la tension des panneaux solaires varie

considérablement en fonction des conditions d'ensoleillement. Il permet d'assurer une tension stable et adaptée pour charger des batteries ou alimenter des charges spécifiques, optimisant ainsi l'efficacité globale du système. De plus, il peut être utilisé pour réguler la tension dans les systèmes d'éclairage LED alimentés par des panneaux solaires, garantissant une luminosité constante. Sa polyvalence en fait un choix judicieux pour les systèmes PV autonomes et hybrides, où la stabilité de la tension est cruciale pour le bon fonctionnement des équipements.

[11]

II.6 La Modélisation et simulation des hacheurs

Le tableau illustre les différentes équations utilisées pour le dimensionnement des convertisseurs DCDC

Tableau II.1 Dimensionnement des convertisseurs DC-DC

	HACHEUR BUCK	HACHEUR BOOST
V _s	24	48
V _o	48	24
L	$\frac{V_{in}(1-D)}{\Delta I_L \times f}$	$\frac{D(1-D)^2 \times R}{2f}$
C	$C \geq \frac{\Delta I_L}{\Delta V_o \times f}$	$C \geq \frac{D}{R \left(\frac{\Delta V_o}{V_o}\right) \times f}$
R	$\frac{V_o}{I_o}$	$\frac{V_o}{I_o}$

II.6.1 Convertisseur Buck

La figure (II.9) présente la modélisation d'un hacheur Buck, un convertisseur abaisseur de tension.

Les figures (II.10) et (II.11) présentent les résultats de simulation de la tension et du courant aux bornes d'entrée et de sortie du hacheur Buck. La tension de sortie de l'hacheur Buck se régule correctement autour de la valeur voulue. La tension diminue de 48 v à 24 v, avec une ondulation normale et maîtrisée. Ces perturbations sont caractéristiques des convertisseurs à découpage et peuvent être atténuées par condensateur de filtrage et une fréquence de commutation plus élevée

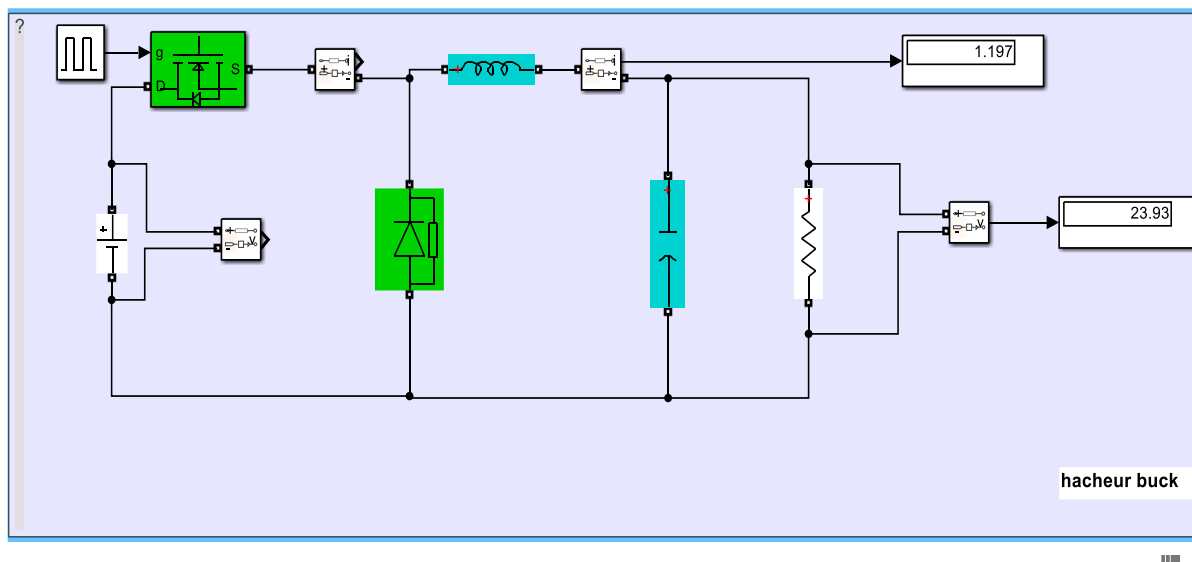


Figure II.9 Schéma de simulation de l'hacheur Buck avec $V_{in} = 48\text{V}$

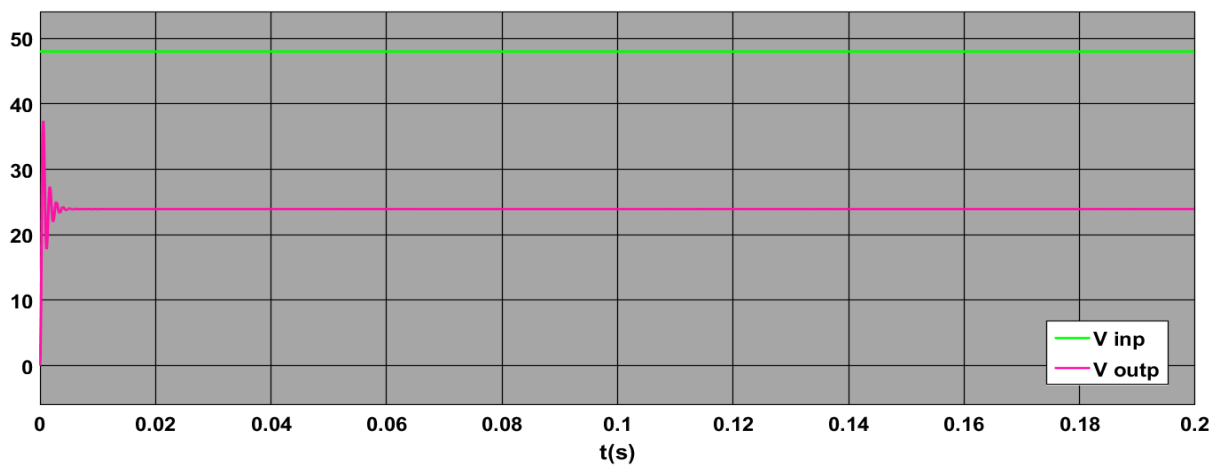


Figure. II.10 Tensions à l'entrée et la sortie de l'hacheur Buck

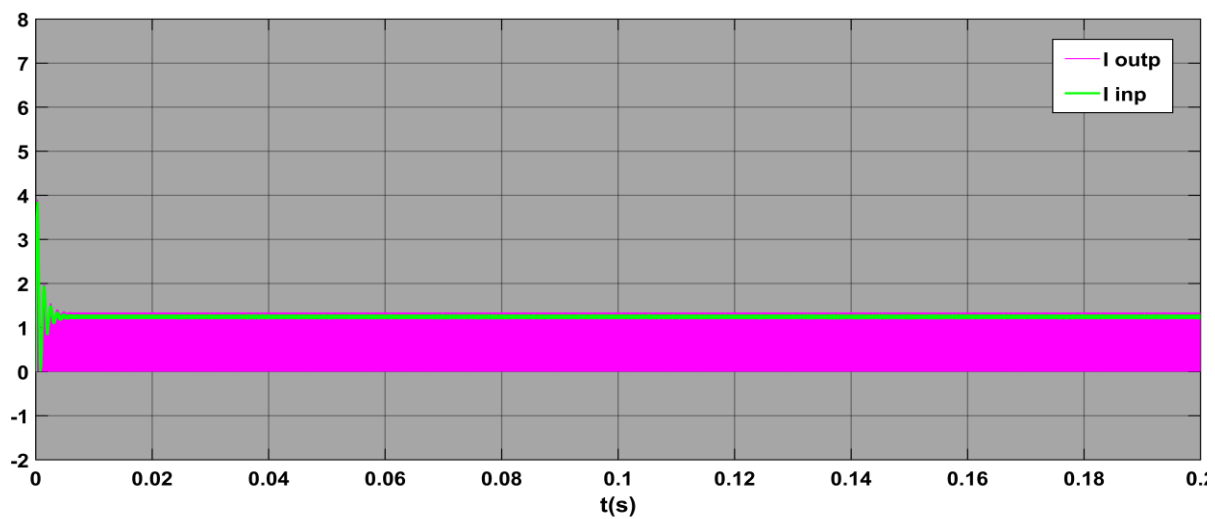


Figure II.11 Courants à l'entrée et la sortie de l'hacheur Buck

II.6.2 Convertisseur boost

La figure (II.12) représente la modélisation d'un hacheur Boost, utilisé pour élever la tension et les figures (II.13) et (II.14) présentent la tension et le courant aux bornes d'entrée et de sortie de l'hacheur boost

Cette simulation confirme que l'hacheur boost élève la tension de 24v a 48 v Comme le montre la figure (II.13), et le dépassement initial dans la réponse en tension de sortie provoque l'erreur statiques aussi le temps de réponse long, ce qui peut être réduit par un meilleur filtrage, une commande plus rapide, ou l'usage de techniques de régulation avancées (par exemple, un contrôle PID).

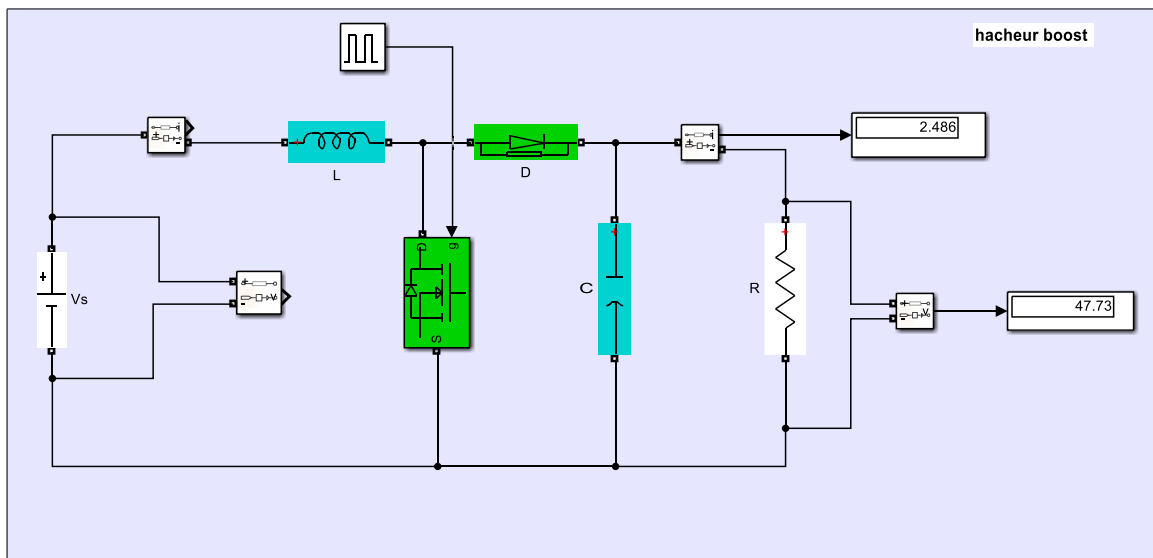


Figure II.12 Schéma convertisseur boost avec $V_{in} = 24$

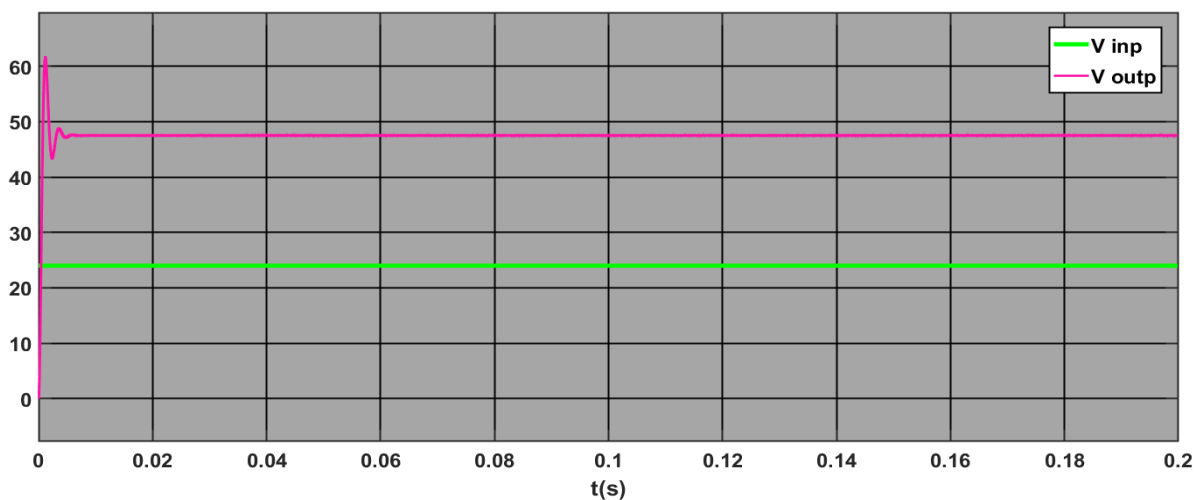


Figure II.13 Tensions à l'entrée et la sortie de l'hacheur Boost

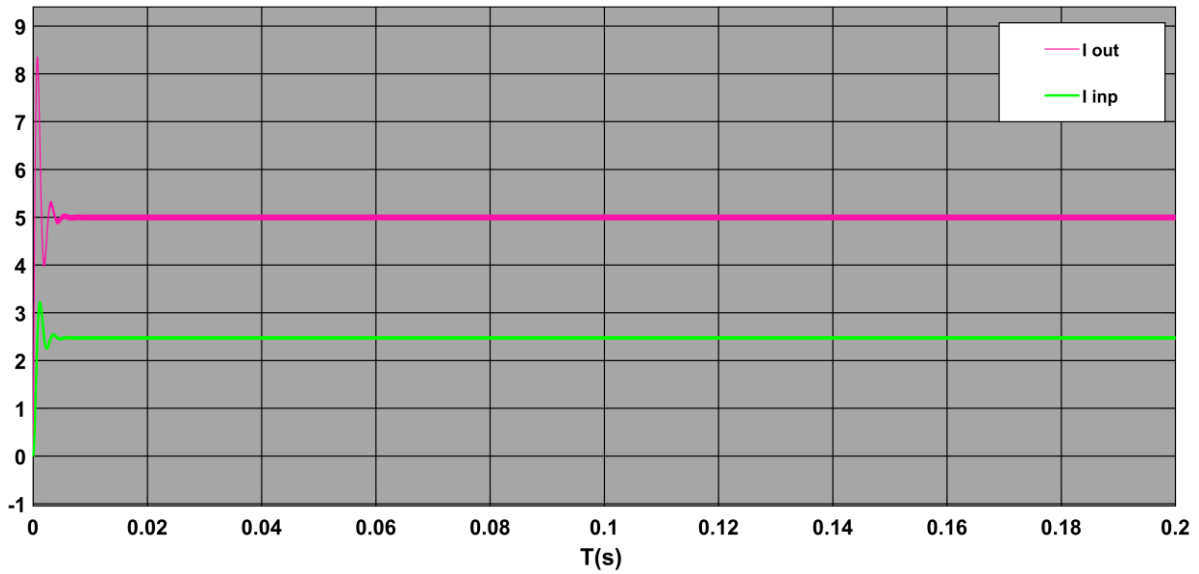


Figure II.14 Courants à l'entrée et la sortie de l'hacheur Boost

II.7 Simulations hacheur boost connecté à un générateur photovoltaïque sans MPPT

Dans le cadre de notre étude, le convertisseur Boost est utilisé comme adaptateur de charge. Il joue un rôle essentiel dans la poursuite du point de puissance maximale (MPPT), bien que l'algorithme MPPT ne soit pas encore implémenté dans ce cas spécifique. La figure (II.17) illustre le schéma de simulation d'un convertisseur Boost connecté à un générateur photovoltaïque (PV), sans intégration d'une commande MPPT.

La figure (II.15) et (II.16) représente les caractéristiques **P-V** et **I-V** du module photovoltaïque pour des conditions atmosphériques.

Lorsque l'irradiation varie pour une température donnée, le courant de court-circuit I_{cc} varie proportionnellement à l'irradiation alors que la tension de circuit ouvert V_{co} reste presque constante.

Si la température croît à irradiation constante, la tension à vide V_{co} décroît et le courant de court-circuit I_{cc} augmente.

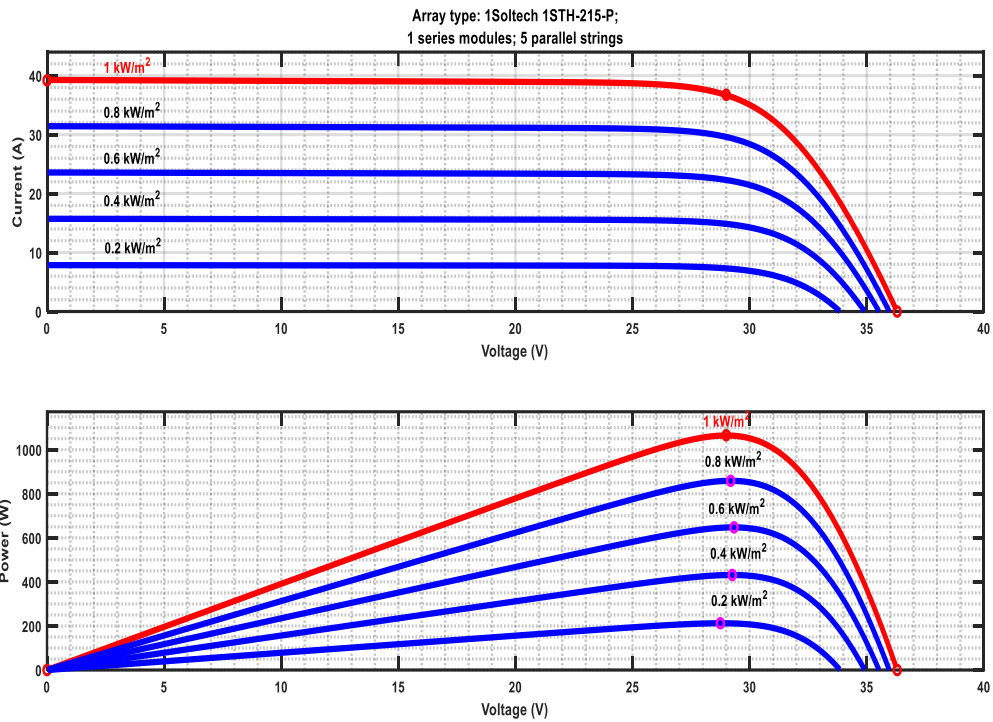


Figure II.15 Courbes (I-V) (P-V) pour irradiances variables d'un module photovoltaïque

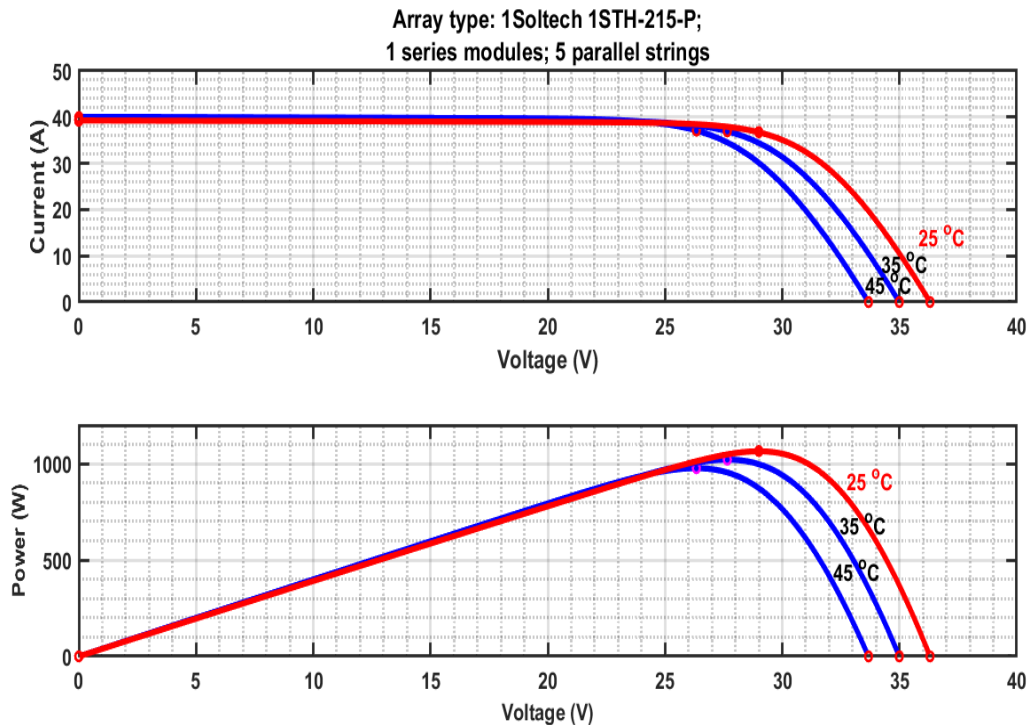


Figure II.16 Courbes (I-V) (P-V) pour températures variables d'un module photovoltaïque

Les figures (II.18), (II.19) et (II.20) présentent les puissances, tensions et courants délivrés par le panneau photovoltaïque en l'absence de la commande MPPT. On observe que le convertisseur Boost fonctionne correctement : la tension de sortie (V_{ch}) est supérieure à la tension d'entrée (V_{pv}), confirmant son rôle d'élévateur de tension.

Cependant, l'analyse des puissances révèle que la puissance extraite du panneau (P_{pv}) reste inférieure à sa valeur maximale théorique, et se stabilise autour de 700 W. Cette limitation est due à l'absence d'un algorithme de poursuite du point de puissance maximale, empêchant le système d'exploiter pleinement le potentiel du générateur. Par ailleurs, la puissance transmise à la charge (P_{ch}) est encore plus faible ($P_{ch} < P_{pv}$), en raison des pertes inhérentes au convertisseur.

Ce comportement met en évidence les performances limitées d'un système non régulé, et souligne l'importance cruciale d'intégrer une commande MPPT afin d'optimiser la conversion et l'utilisation de l'énergie photovoltaïque disponible.

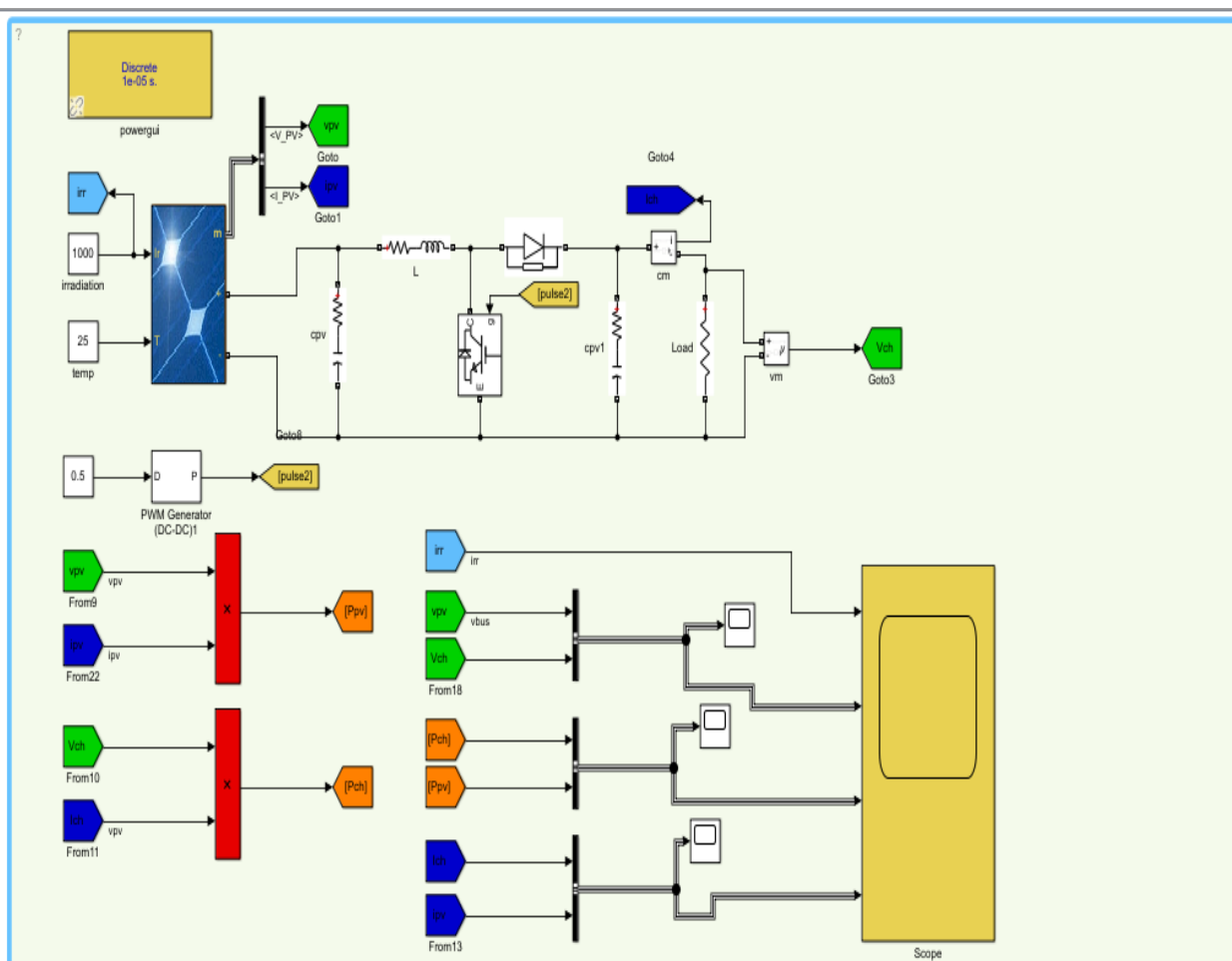


Figure II.17 Schéma de simulation d'un hacheur Boost connecté à un générateur photovoltaïque sans MPPT

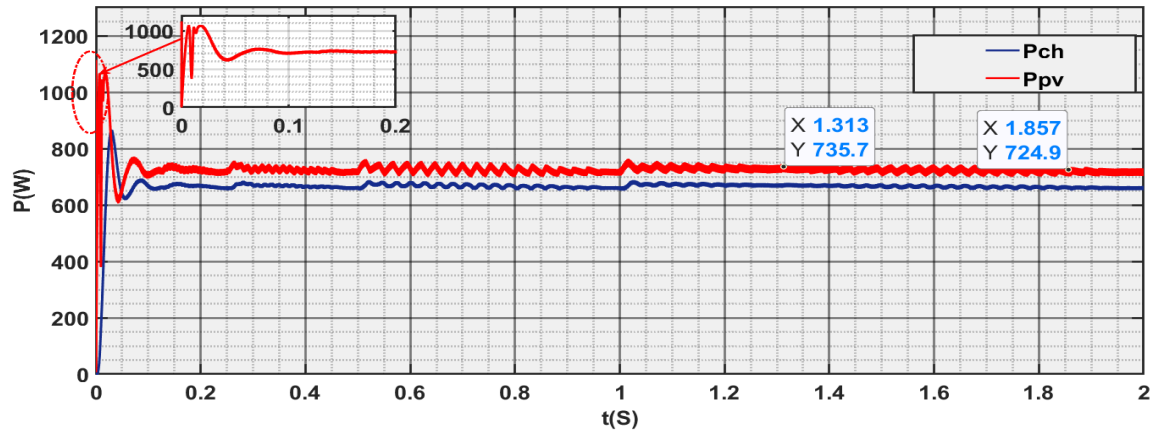


Figure II.18 Puissances du panneau photovoltaïque et de la charge sans MPPT pour un rapport cyclique $D=0.5$

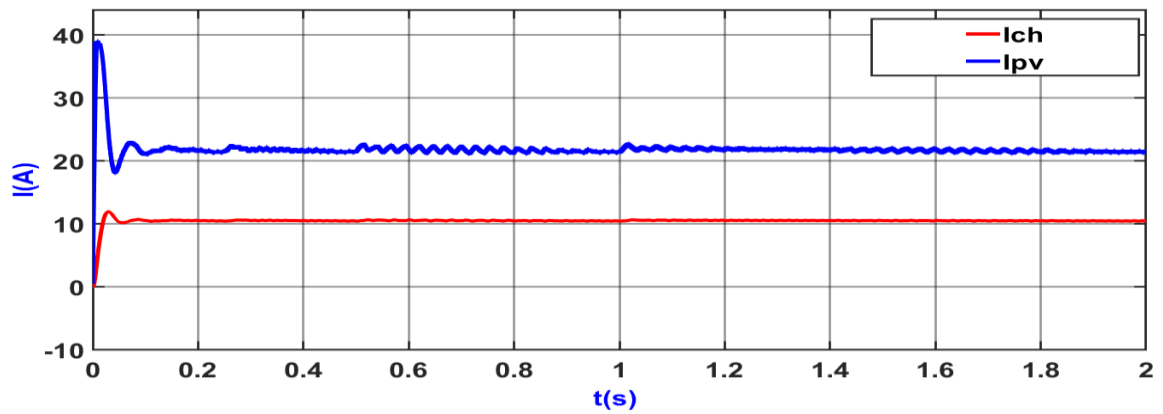


Figure II.19 Courants à l'entrée et la sortie de l'hacheur Boost sans MPPT pour un rapport cyclique $D=0.5$

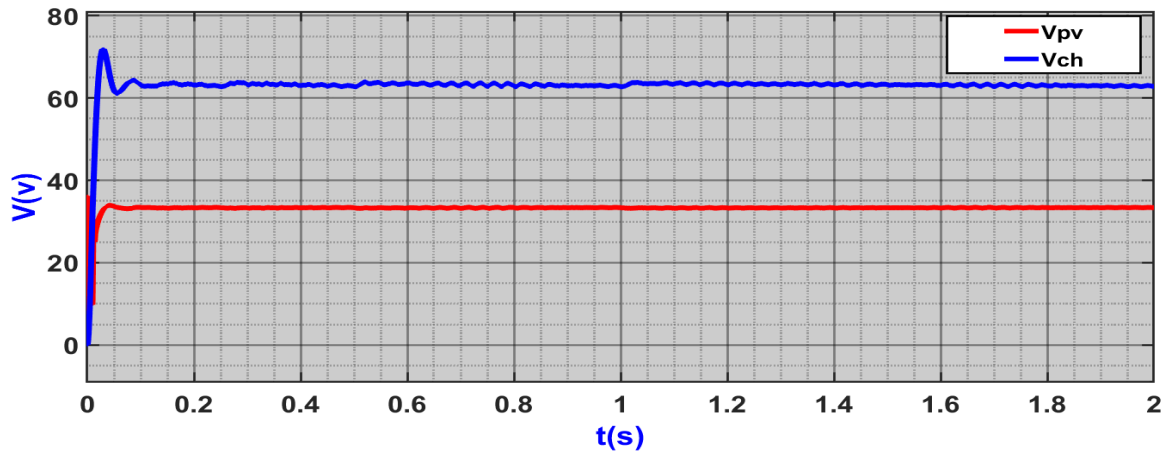


Figure II.20 Tensions à l'entrée et la sortie de l'hacheur Boost sans MPPT pour un rapport cyclique. $D=0.5$

II.8 Simulation hacheur boost connecté à un générateur photovoltaïque avec MPPT

La commande MPPT signifie (Maximum Power Point Tracking), ou suivi du point de puissance maximale en français. C'est une technique utilisée principalement dans les systèmes photovoltaïques (solaires) pour optimiser la puissance extraite des panneaux solaires. Les panneaux solaires présentent une caractéristique non linéaire entre la tension V_{pv} et le courant I_{pv} , ce qui signifie que leur puissance de sortie varie en fonction des conditions de fonctionnement. Pour chaque condition météorologique donnée, il existe un unique point de fonctionnement, appelé point de puissance maximale (MPPT).

La technique de contrôle communément utilisée consiste à agir sur le rapport cyclique de manière automatique pour amener le générateur à sa valeur optimale de fonctionnement quelque soit les instabilités météorologiques ou variations brutales de charges qui peuvent survenir à tout moment.[28]. Plusieurs méthodes de MPPT ont été développées, chacune présentant des avantages et des limitations. Parmi les plus courantes, on trouve les algorithmes Perturb and Observe (P&O), Incremental Conductance (InCond), Hill Climbing, ainsi que des approches plus avancées utilisant l'intelligence artificielle ou la logique floue.

Dans cette étude, nous avons choisi d'utiliser l'algorithme Perturb and Observe (**P&O**) pour assurer le suivi du point de puissance maximale (MPPT) dans le système photovoltaïque. La figure II-21 représente le schéma de simulation panneau PV_Hacheur_Boost avec MPPT.

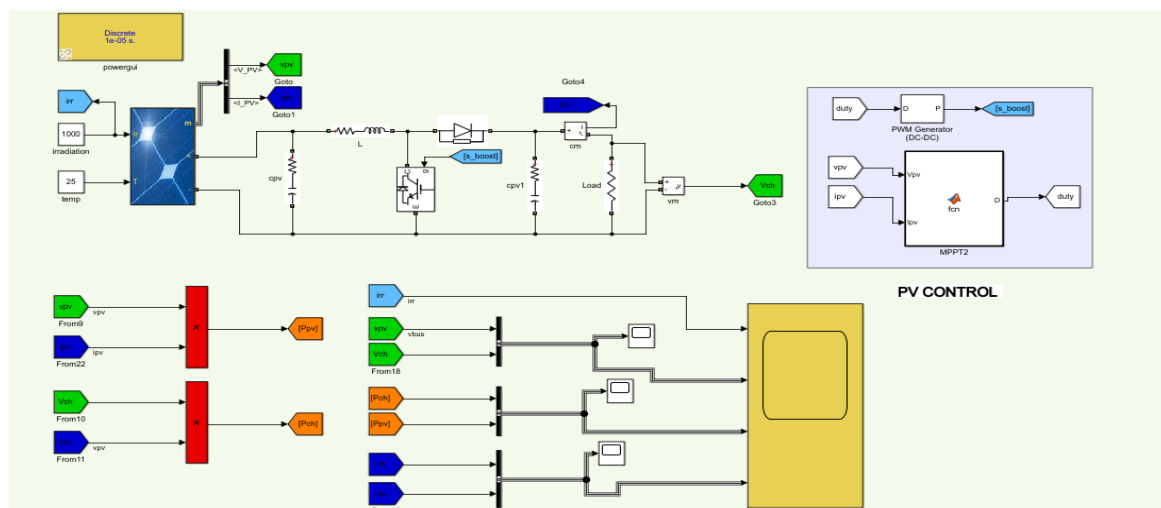


Figure II.21 Schéma de simulations système PV_Hacheur_Boost_charge résistive avec MPPT

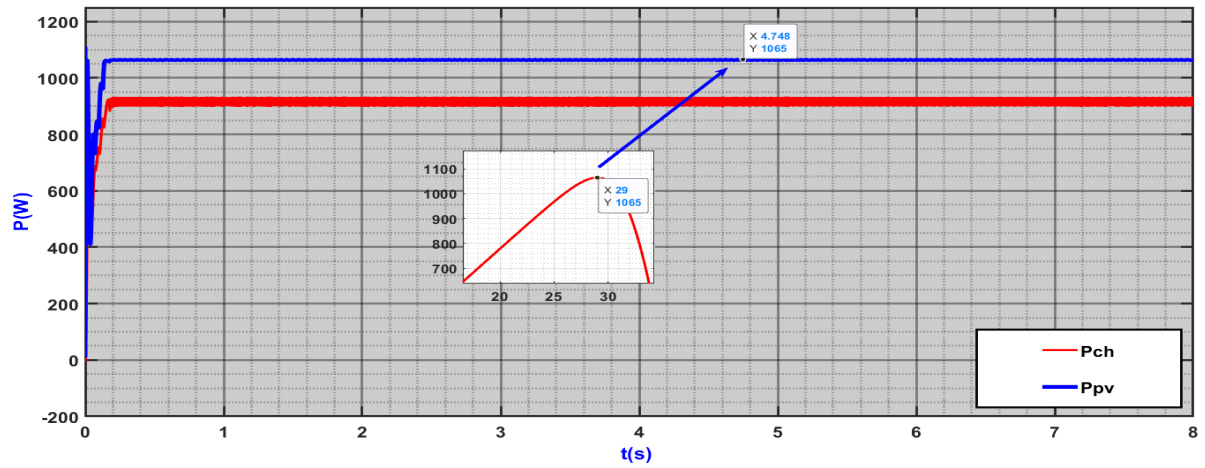


Figure II.22 Puissance du panneau photovoltaïque et de la charge avec MPPT

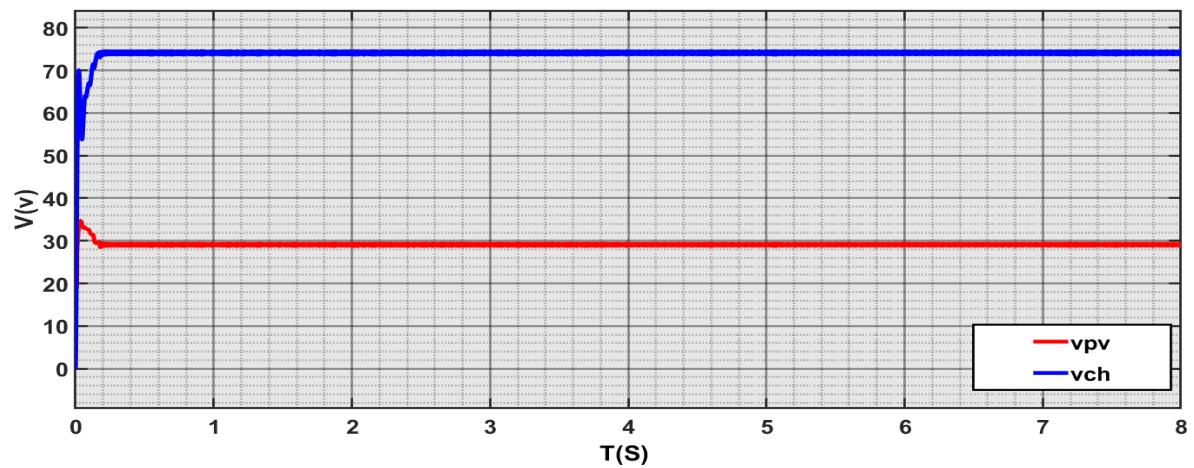


Figure II.23 Tensions à l'entrée et la sortie de l'hacheur Boost avec MPPT

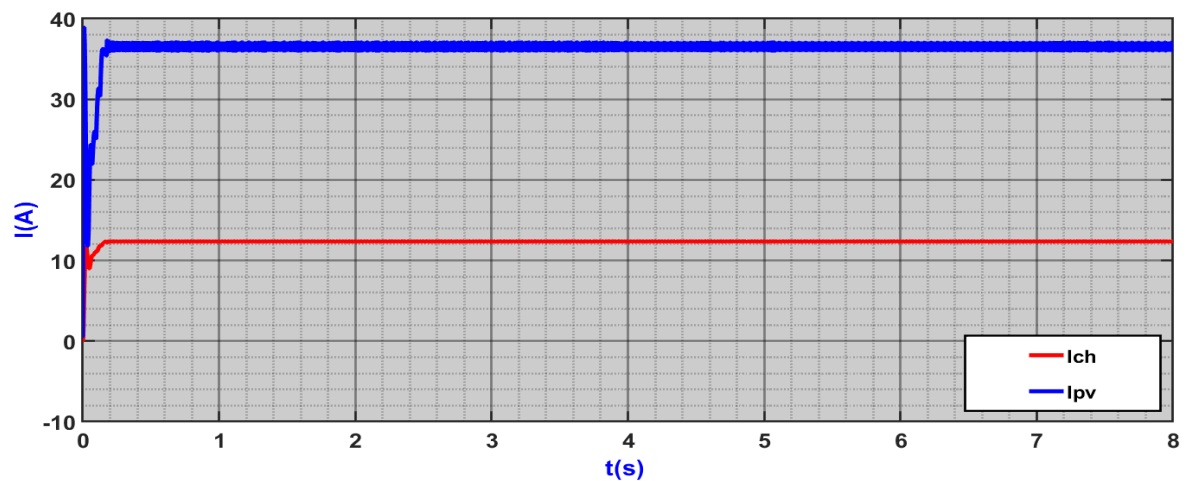


Figure II.24 Courants à l'entrée et la sortie de l'hacheur Boost avec MPPT

Les figures (II.22), (II.23) et (II.24) présentent respectivement l'évolution des tensions, puissances et courants dans le système photovoltaïque équipé d'un algorithme MPPT. Les résultats montrent que la tension du panneau photovoltaïque (V_{pv}) se stabilise rapidement autour de 30 V, indiquant que le système atteint efficacement le point de puissance maximale. En sortie du convertisseur boost, la tension (V_{ch}) atteint environ 75 V, confirmant le bon fonctionnement en mode élévateur de tension.

La puissance maximale extraite du générateur photovoltaïque est d'environ 1066 W, tandis que la puissance transmise à la charge résistive est d'environ 890 W, révélant des pertes dues principalement à la conversion DC-DC. Concernant les courants, le courant côté charge est naturellement plus faible que celui côté PV, en cohérence avec le principe de conservation de la puissance dans un convertisseur boost : une augmentation de tension entraîne une diminution du courant.

Ces résultats valident l'efficacité de la commande MPPT et la bonne adaptation énergétique entre le générateur solaire, le convertisseur et la charge.

II.9 Conclusion

Ce chapitre a démontré l'importance des convertisseurs DC-DC, notamment les hacheurs Buck, Boost et Buck-Boost, dans l'optimisation des systèmes photovoltaïques

Le convertisseur Buck s'est révélé efficace pour réduire la tension d'entrée. À l'inverse, le convertisseur Boost permet de relever la tension d'entrée, jouant un rôle clé dans les systèmes nécessitant un niveau de tension élevé à partir de sources à faible tension, comme les panneaux photovoltaïques en faible ensoleillement. Le Buck-Boost, quant à lui, combine les avantages des deux premiers en offrant une flexibilité d'adaptation lorsque la tension d'entrée fluctue fortement. Les modélisations et simulations réalisées ont permis de valider les principes théoriques de fonctionnement de chaque convertisseur. Elles ont également mis en évidence l'impact significatif de l'intégration d'un algorithme MPPT sur la performance énergétique d'un système photovoltaïque. En effet, l'ajout d'un MPPT permet de maximiser la puissance extraite du panneau solaire, assurant ainsi une utilisation optimale de l'énergie disponible, en adaptant dynamiquement le point de fonctionnement du système. Le choix du type d'hacheur, couplé à une stratégie de commande intelligente telle que le MPPT, est essentiel pour améliorer l'efficacité globale d'un système photovoltaïque, en assurant une adaptation précise de la tension et une exploitation maximale de l'énergie solaire.

Chapitre 3 : Les batteries de stockage

III.1 Introduction

Dans un cadre de transition énergétique et d'expansion des énergies renouvelables, les systèmes photovoltaïques (PV) prennent une position de plus en plus prépondérante dans la génération d'électricité. Toutefois, un inconvénient majeur de l'énergie solaire est sa production fluctuante, qui dépend de l'ensoleillement. C'est dans ce cadre que s'insèrent les batteries.

Les batteries ont pour fonction de conserver l'énergie électrique générée par les panneaux solaires, pour la restituer en période de production insuffisante (nuit, mauvais temps, forte consommation). Elles jouent donc un rôle essentiel dans les systèmes photovoltaïques autonomes ou hybrides. [25]

Ce chapitre s'intéresse donc au fonctionnement des batteries de stockage dans les installations photovoltaïques, aux différentes technologies existantes et à leurs caractéristiques techniques. Il aborde également les paramètres essentiels pour un dimensionnement adéquat, garantissant ainsi la pérennité et l'efficacité du système. Grâce à cette approche, nous mettons en évidence l'importance stratégique des batteries dans le développement d'installations solaires performantes, durables et adaptées aux besoins énergétiques actuels.

III.2 Qu'est-ce qu'une batterie de stockage ?

Un pack de batteries rechargeables, également appelé batterie d'accumulateurs, est un mécanisme qui stocke l'énergie électrique sous sa forme chimique.

Les accumulateurs électriques contiennent une ou plusieurs cellules électrochimiques, chacune composée d'électrodes positives et négatives immergées dans un électrolyte. Quand une batterie est en charge, un flux de courant électrique la traverse, déclenchant des réactions chimiques qui transforment l'énergie électrique en énergie chimique et l'accumulent au sein de la cellule. Quand la batterie est déchargée, l'énergie chimique est reconvertie en énergie électrique, qui peut être utilisée pour alimenter un appareil ou un véhicule. Ce processus peut être répété plusieurs fois, faisant des batteries d'accumulateurs électriques une source fiable d'énergie portable. [17]

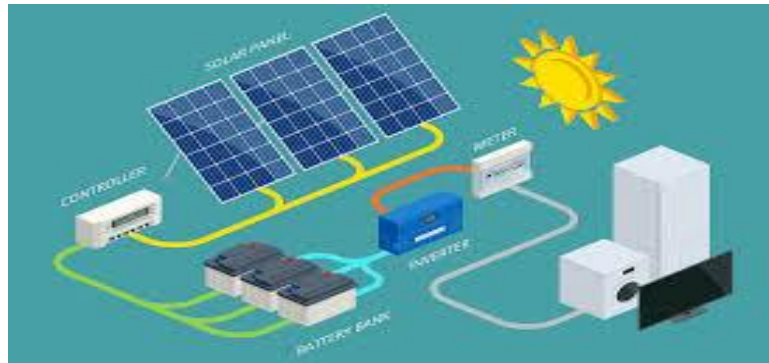


Figure III.1 Les batteries de stockage

III.3 Les batteries dans les installations photovoltaïques

Dans les systèmes photovoltaïques, les batteries ont une importance cruciale, notamment pour garantir l'indépendance énergétique sur plusieurs jours. Elles sont actuellement le choix le plus approprié, car d'autres technologies telles que les piles à combustible demeurent trop onéreuses, alors que les volants d'inertie posent des problèmes de sécurité dans ce cadre.

Le principal avantage des batteries est leur capacité à stocker l'électricité produite en surplus lorsque la production photovoltaïque dépasse la consommation (souvent en milieu de journée), puis à la restituer lorsque la demande devient supérieure à la production (en fin de journée ou la nuit). Ce mécanisme permet d'augmenter considérablement le taux d'autoconsommation d'un système photovoltaïque.

Cependant, malgré ces avantages, les batteries présentent une faible puissance spécifique, c'est-à-dire qu'elles ne peuvent pas délivrer une grande puissance instantanément comparée à d'autres systèmes. Par ailleurs, même avec un dispositif de stockage en place, il est peu courant d'atteindre une autosuffisance énergétique complète avec l'énergie produite. [18]

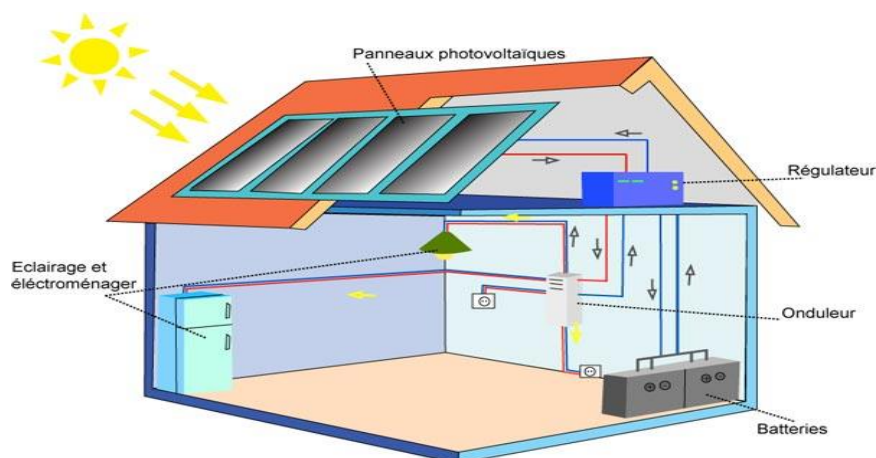


Figure III.2 Une installation PV avec stockage

III.4 Les différents types de batteries

Il existe différents types de batterie pour stocker l'énergie solaire. Les différentes technologies se distinguent par leurs capacités, leur entretien, leur autonomie et leur impact environnemental.

III.4.1 Les batteries lithium-ion

Les batteries de stockage solaire reposent sur la même technologie, à savoir le lithium. Les batteries lithium-ion sont des batteries qui se rechargent et qui ont le lithium comme composant principal actif. Elles sont particulièrement performantes pour le stockage de l'énergie solaire, surtout dans les installations photovoltaïques à usage résidentiel et commercial. se caractérise par une longévité élevée (10-15 ans) et des performances supérieures. Généralement, elle est utilisée dans les applications à basse puissance (l'ordinateur portable, tablettes, les téléphones portables) . [19]



Figure III.3 Les batteries lithium-ion

III.4.2 Batterie au plomb ouvert

Aussi connue sous le nom de batterie à électrolyte ou batterie plomb-acide traditionnelle. Batterie au plomb ouvert est l'un des modèles de batteries les plus anciens. Elle est très populaire sur le marché grâce à son coût abordable qui en fait une solution idéale pour les productions solaires de petite taille. La batterie pour panneau solaire à plomb ouvert présente une bonne tolérance aux décharges profondes, pouvant atteindre jusqu'à 50% de sa capacité nominale. Elle est facilement recyclable grâce à la récupération des matériaux comme l'électrolyte et le plomb. Les batteries au plomb possèdent un rendement allant de 70 à 85%, ce qui est légèrement inférieur aux batteries plus récentes. Elles sont simples à installer et nécessitent un entretien régulier, tous les 6 mois. Ces dernières ne sont pas imperméables,

nécessitent un entretien constant, possèdent une longévité restreinte et ne sont pas recyclables. [20]



Figure III.4 Les batteries acide/plomb

III.4.3 Les batteries au nickel-ion

Est une batterie rechargeable utilisant l'hydroxyde de nickel comme cathode et le cadmium comme anode. Les batteries au nickel-cadmium ont été couramment utilisées pendant de nombreuses années. Toutefois, elles sont progressivement remplacées par des technologies plus avancées à cause de l'impact négatif du cadmium sur l'environnement, un métal nuisible. [19]



Figure III.5 Les batteries au nickel-ion

III.4.4 Les batteries au sodium-ion

Les batteries sodium-ion fonctionnent de manière similaire aux batteries lithium-ion, mais utilisent du sodium (Na) à la place du lithium comme ion actif. Le sodium, comme le lithium, est un métal alcalin et, comme le lithium, se trouve dans la première colonne du tableau périodique. Du fait de la plus grande disponibilité du sodium, ces batteries représentent une option plus pérenne et moins coûteuse. [21]






Le Tableau III.2 Les caractéristiques de type des batteries [27]

Type de batterie	Tension nominale	Durée de vie	Coût	Rendement
Les batteries lithium-ion	3.6V Par cellule	(10-15 ans)	Elevé	90-95 %
La batterie au plomb ouvert	2V Par cellule	(5-7 ans)	Abordable	80 %
Les batteries au nickel-ion	1.2V Par cellule	(12-15 ans)	Modéré	70-90 %
Les batteries au sodium-ion	3.6V Par cellule	15ans	Moyen	97 %

III.5 Type de batterie solaire

Le stockage de l'énergie solaire est devenu une préoccupation majeure pour les propriétaires de panneaux solaires. Les batteries de stockage d'énergie photovoltaïque sont une solution efficace pour stocker l'énergie solaire et l'utiliser lorsque la production est faible. [22]

Tableau III.3 Tableau comparatif des technologies de batteries adaptées à l'énergie solaire

Technologie de batterie solaire	Avantages	Applications
 <p>Batterie solaire étanche AGM > La batterie étanche AGM est l'entrée de gamme. Son coût est avantageux mais sa durée de vie est plus courte. Elle supporte bien les pointes de courant liés à un démarrage moteur ou pompe.</p>	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Sans entretien ✓ Prix avantageux ✓ Résistance aux chocs et vibrations ✓ Très faible dégagement d'hydrogène 	<ul style="list-style-type: none"> • Démarrage moteur • loisir • Application non sensible
 <p>Batterie solaire étanche au GEL > La batterie étanche à électrolyte gélifié (GEL) est le "haut de gamme" des batteries au plomb. Elle ne nécessite pas d'entretien et ses performances en cyclage sont très bonnes.</p>	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Sans entretien ✓ Résistance aux chocs et vibrations ✓ Performance excellente en cyclage ✓ Meilleure résistance aux températures extrêmes 	<ul style="list-style-type: none"> • Habitat isolé • Signalisation • Télécommunication • Hydraulique • Télémessure
 <p>Batterie solaire Plomb-Carbone > La batterie étanche plomb-carbone est une nouvelle génération se situant entre la batterie plomb classique et celle au lithium. Grâce à son alliage plomb et carbone, elle est plus performante en cyclage partiel.</p>	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Sans entretien ✓ Moins de sulfatation en charge partiel ✓ Moins de corrosion de la plaque positive ✓ Nombre de cycles supérieur 	<ul style="list-style-type: none"> • Véhicule, camping-car • Bateau • Habitat isolé • Application pro
 <p>Batterie solaire OPzV / OPzS > La batterie stationnaire à plaque tubulaire est robuste et possède la plus grande durée de vie des batteries au plomb. L'OPzS est composée d'électrolyte liquide et nécessite un entretien régulier alors que l'OPzV est composée d'électrolyte gélifiée, elle est donc étanche et ne nécessite pas d'entretien.</p>	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Longue durée de vie : > 10 ans ✓ Très bonne résistance aux températures extrêmes 	<ul style="list-style-type: none"> • Habitat isolé • Télécommunication • Application pro
 <p>Batterie solaire Lithium > La batterie au lithium est légère et peu encombrante. Sans entretien elle résiste bien aux décharges profondes et à la durée de vie la plus élevée.</p>	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Sans entretien ✓ Durée de vie > 2500 cycles à 80% décharge ✓ Plus légère que les batteries au plomb ✓ Résiste mieux aux décharges profondes ✓ Capacité utile 2 fois supérieure ✓ Plus sensible à la température 	<ul style="list-style-type: none"> • Véhicule • Bateau • Application spécifique

III.6 Paramètres importants des batteries

III.6.1 Capacité de la batterie

La capacité de la batterie est un critère essentiel pour évaluer ses performances. Définie comme la capacité nominale et la capacité réelle, elle indique la quantité d'électricité qu'une batterie peut décharger dans des conditions spécifiques telles que le taux de décharge, la température ou la tension aux bornes. Ces paramètres permettent de dimensionner correctement un système de stockage en fonction des besoins énergétiques. Les unités couramment utilisées sont mAh ou Ah et se traduit par l'énergie stockée en Wh ou kWh.

Par exemple, une batterie de 48V, 50Ah contient 2400 Wh ou 2,4 kWh d'énergie. [23]

III.6.2Etat de charge (SOC)

L'état de charge « State of Charge » en anglaise. Est le rapport de la charge disponible en Le terme « State of Charge » en anglais fait référence au ratio de la charge disponible en ampères-heures (Ah) par rapport à la capacité totale de la batterie. [22]

$$SoC = \frac{\text{charge disponible en Ah}}{\text{Capacité de la batterie}} \quad \text{III.1}$$

III.6.3 Profondeur de décharge (DOD)

Le degré de décharge (DOD) est un indicateur crucial qui définit l'ampleur de la décharge d'une batterie. Cela est exprimé en pourcentage (%), par rapport à la capacité maximale que cette batterie peut fournir [22]. Par exemple, si une batterie possède une capacité totale de 100Ah et qu'elle a consommé 50Ah, son DOD est de 50%. (Plus la DOD est grande, plus la batterie est mise à l'épreuve) [24]

$$DOD\% = \left(\frac{\text{la capacité retiré d'une batterie chargé (Ah)}}{CX(Ah)} \right) \quad \text{III.2}$$

$$DOD = 1 - Soc \quad \text{III.3}$$

III.6.4 Cycles de charge/décharge

Un cycle complet de charge/décharge correspond à une décharge complète de la batterie, suivie d'une recharge complète. Le nombre de cycles spécifié par le fabricant est généralement donné pour des conditions de fonctionnement spécifiques (température, taux de charge/décharge, DOD). Plus une batterie est conçue pour avoir une longue durée de vie, plus elle est capable de supporter un grand nombre de cycles. [26]

III.6.5 Auto-décharge des batteries

L'autodécharge est la perte progressive de charge d'une batterie, même lorsqu'elle n'est pas connectée à un circuit. Et son taux dépend du type de batterie et de la température ambiante (NiMH : Taux d'Auto-décharge élevé (jusqu'à 30 %/mois), **Li-ion** : Taux plus faible (~2–5

%/mois), **Plomb-acide** : Environ 3–10 %/mois selon le type). L'Auto-décharge augmente avec la température à plus de 55 °C, elle devient significativement plus rapide. [22]

III.7 Dimensionnement des batteries solaires

Le dimensionnement correct des batteries dans un système solaire photovoltaïque est crucial pour assurer l'autonomie, la durabilité et le bon fonctionnement de l'installation. Ce dimensionnement permet de garantir que l'énergie produite soit stockée en quantité suffisante pour alimenter les charges même en l'absence de soleil (nuit, mauvais temps, etc.).

III 7.1 Choix de la tension du système

Le choix de la tension nominale d'un système dépend de la disponibilité de matériels (modules et récepteurs), aussi, il dépend des niveaux de puissance et d'énergie nécessaire selon le type d'application. [26]

Le tableau III.4 Tensions adaptée pour les différentes puissances du champ PV

Puissance crête	Tension du système
$P_c < 500 W_c$	12V
$500 < P_c < 2000 W_c$	24V
$2000 < P_c < 10000 W_c$	48V
$P_c < 10000 W_c$	<48V

III.7.2 Calcul de la capacité de stockage et détermination du nombre de batteries

Le dimensionnement des batteries solaires consiste à déterminer la capacité nécessaire pour répondre aux besoins énergétiques d'un site autonome ou en autoconsommation, tout en tenant compte de la production photovoltaïque, des périodes sans soleil et des caractéristiques techniques des batteries et les nombre de batteries.

Figure III.5 Représente un Tableau des équations pour calculer la capacité et nombre de batterie en série et parallèle. [18]

Tableau III.5 Formules pour le dimensionnement des batteries

Grandeur	Formule
Capacité de stockage de la batterie (Ct)	$Ct = \frac{Ec \times Nja}{V \times DOD}$
Nombre total de batteries (en Ah)	$Nbt = \frac{Us}{Ub} \times \frac{Ct}{Cb}$
Nombre des Batteries en série	$Nbs = \frac{Us}{Ub}$
Nombre de batteries en parallèle	$Nbq = \frac{Nbt}{Nbs}$

III.8 Conclusion

Ce chapitre a mis en évidence l'importance des batteries de stockage dans les systèmes photovoltaïques, en raison notamment de l'intermittence inhérente à la production solaire. Nous avons d'abord décrit le fonctionnement électrochimique des accumulateurs, puis détaillé leur intégration dans les installations photovoltaïques. Les différents types de batteries (lithium-ion, plomb ouvert, nickel-cadmium et sodium-ion) ont été présentés, chacun avec ses avantages et ses limites en termes de coût, de rendement, de durée de vie et d'impact environnemental.

Des paramètres techniques clés capacité, SOC, DOD et nombre de cycles de charge/décharge ont été explicités pour mieux comprendre leur influence sur le choix et le dimensionnement d'un système de stockage. Enfin, une méthodologie rigoureuse de dimensionnement a été proposée, incluant le calcul de la capacité requise, le choix de la tension nominale du système et la détermination du nombre de batteries à installer.

Chapitre 4 : Simulation d'un Système Photovoltaïque avec Batterie de Stockage

IV.1 Introduction

Ce chapitre présente l'étude d'une chaîne de stockage photovoltaïque. Le système étudié comprend un générateur photovoltaïque, un convertisseur DC/DC de type Boost, une batterie de stockage, une charge, ainsi qu'un dispositif de poursuite du point de puissance maximale (MPPT) à l'aide du logiciel MATLAB/Simulink.

La première partie a été consacrée à la simulation du comportement de la batterie dans ses différents régimes de fonctionnement : charge, décharge, et transition charge-décharge.

La seconde partie a été consacrée à la simulation complète de la chaîne de stockage photovoltaïque pour divers scénarios d'irradiation solaire.

IV.2 Simulation des régimes de fonctionnement de la batterie de stockage

Dans le cadre de l'étude de la chaîne de stockage photovoltaïque, nous avons commencé par la simulation des différents modes de fonctionnement de la batterie.

La figure (IV.1) illustre le schéma de simulation pour le mode charge et le mode décharge d'une batterie Lithium-Ion utilisée comme élément de stockage. Les caractéristiques électriques de cette dernière sont données par le tableau (IV.1).

Tableau IV.1 Les caractéristiques de la batterie Lithium ion

Les paramètres	Les Valeurs
Tension nominale	24 V
Capacité	50 V
Courants nominale	27.9357 A
tension complètement chargée	21.7391 V

Sénario 1 : Mode charge

Dans cette configuration, la source photovoltaïque alimente simultanément une charge résistive et une batterie. Un régulateur PI de courant est mis en œuvre pour générer les signaux

de commande des deux transistors. Selon la convention adoptée, un courant de batterie négatif correspond à une phase de charge, indiquant que la batterie absorbe de l'énergie et se recharge.

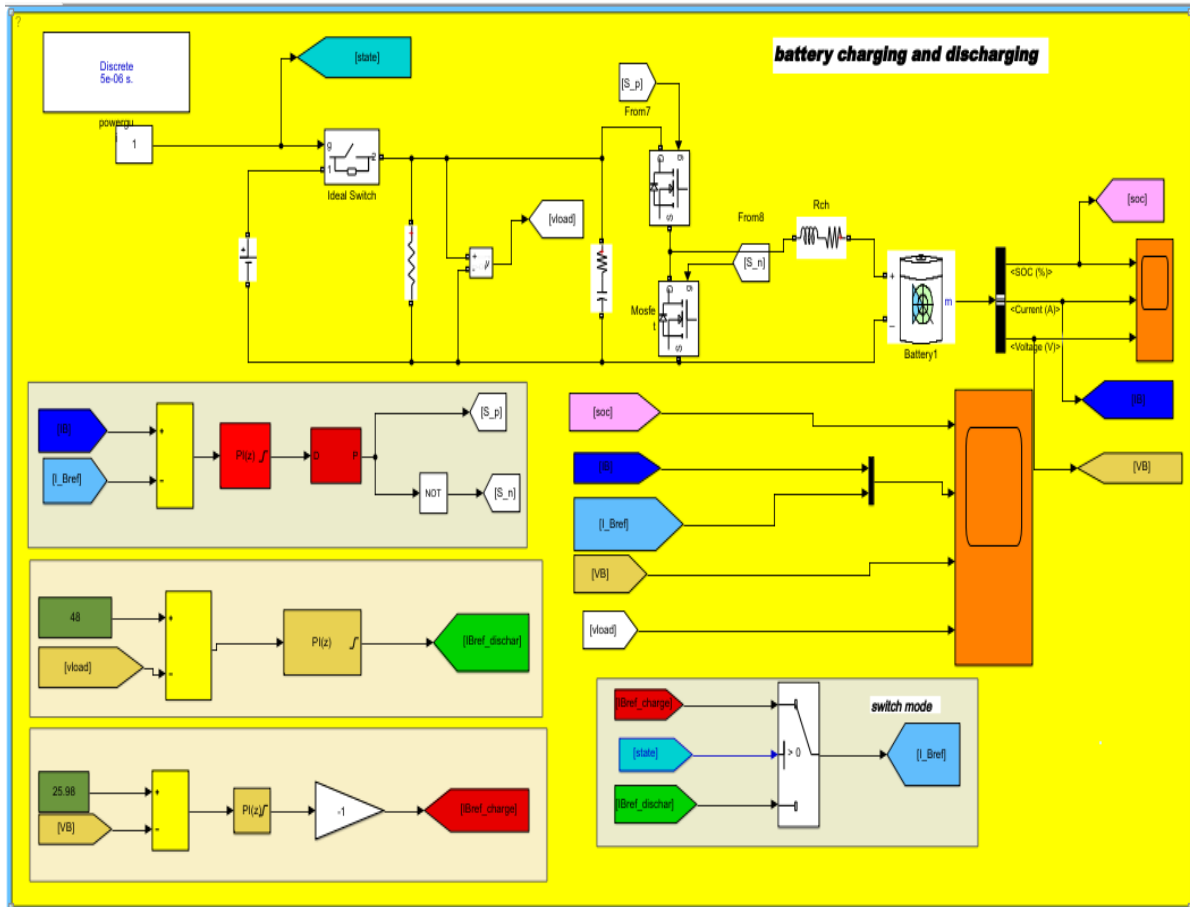


Figure IV.1 Simulation de batterie en mode Charge-décharge

La figure (IV.2) montre les caractéristiques de la batterie dans en mode Charge.

Le SOC (état de charge) de la batterie augmente, Le système fonctionne en mode charge, avec un courant de charge régulé à -26 A suit la référence et converge vers une valeur négative, et la tension de la batterie reste stable 48V, preuve d'un bon contrôle.

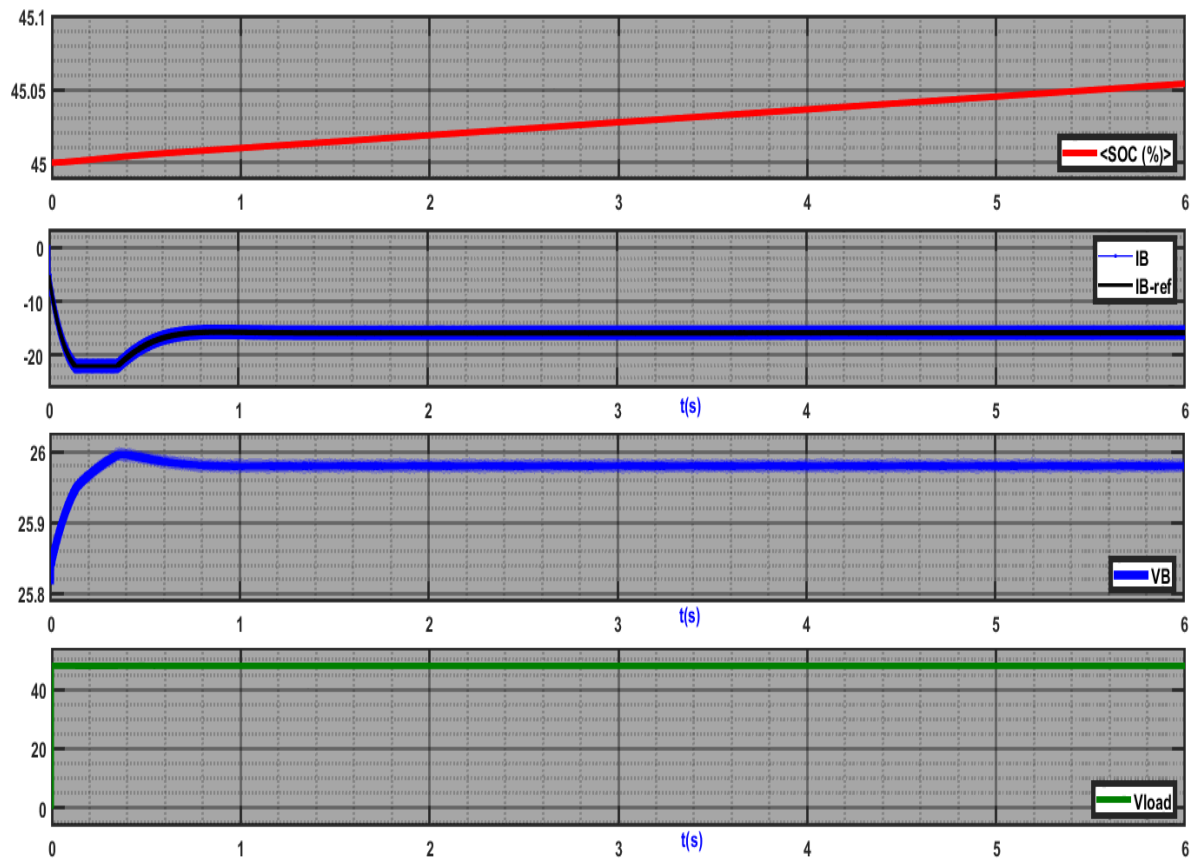


Figure IV.2 Les Caractéristiques de la batterie mode charge

Scénario 2 : Mode décharge

Dans ce cas, la résistance R est alimentée par une tension $U_{ch}=48V$. Un régulateur de tension de type PI est donc utilisé, avec une tension de référence $U_{ref}=48V$, à comparer avec la tension réelle U_{ch} mesurée aux bornes de la résistance. La sortie du régulateur fournit alors le courant de référence de décharge I_{ref_dech}

La figure (IV.3) montre les caractéristiques de la batterie pour le régime décharge.

Le Soc diminue progressivement, confirmant que la batterie délivre de l'énergie et le courant I de la batterie est positif (courant sortant = positif). La tension de la charge reste stable à 48 V, preuve que le système maintient une alimentation correcte.

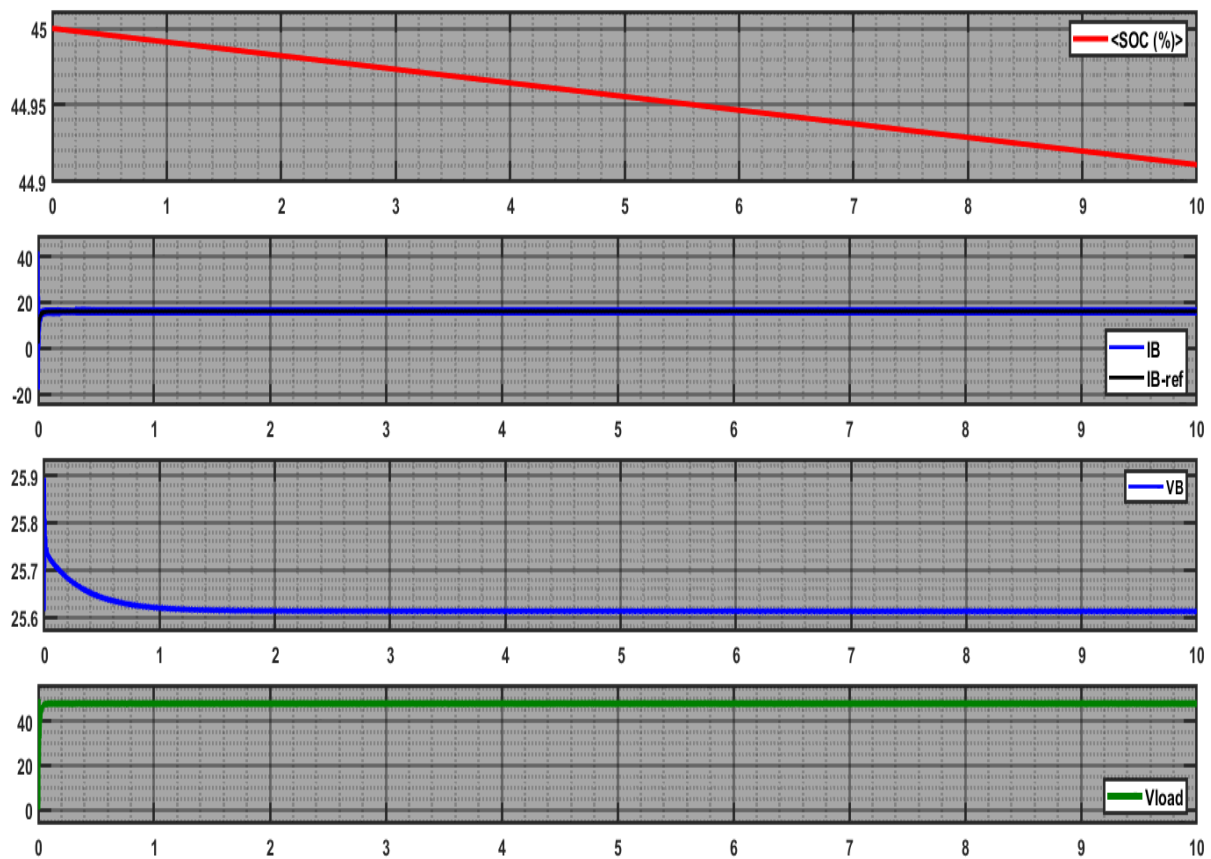


Figure IV.3 Les Caractéristiques de la batterie en mode décharge

Scénario 3 : Mode charge/décharge

Switch Etat « 0 puis 1 » :

Simulation combinée des deux modes (charge et décharge) objectif est de tester le comportement global du système lorsqu'il passe automatiquement d'un mode à l'autre en fonction des conditions de fonctionnement, notamment la tension délivrée par la source.

La figure Fig. IV.4 représente les caractéristiques de la batterie en mode Charge-décharge.

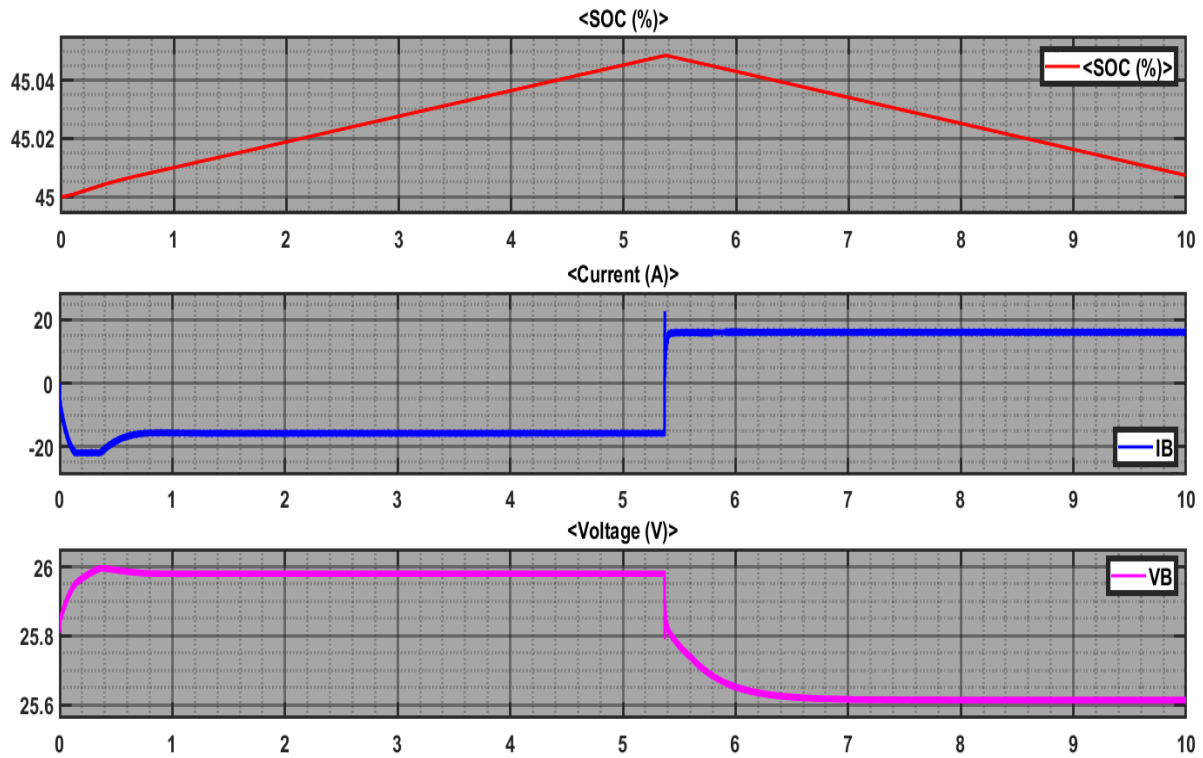


Figure IV.4 Les caractéristiques de la batterie dans les deux régimes (Charge- décharge)

IV.3 Simulation de la chaine de stockage photovoltaïque PV

La figure (IV.5) montre le modèle Simulink du système hybride Photovoltaïque (PV) – Batterie. Dans ce cas la source d'alimentation continue (V_{dc}) a été remplacée par un générateur photovoltaïque.

Le modèle Simulink du panneau solaire utilisé est le **1Soltech 1STH-215-P**, un modèle standard souvent utilisé dans les simulations d'énergies renouvelables. Ce module reçoit deux entrées principales : l'irradiation solaire (W/m^2), et la température des cellules. Ces deux paramètres influencent directement la production d'énergie du panneau. La configuration adoptée ici comporte 5 chaînes de modules connectées en parallèle, avec un seul module par chaîne, ce qui permet d'augmenter le courant total de sortie tout en maintenant la tension identique à celle d'un module unique. Chaque module a une puissance maximale de 213,15 W, ce qui donne une puissance totale disponible de plus de 1 kW dans des conditions optimales d'ensoleillement et de température. Ce sous-système constitue la source d'énergie principale du modèle, avant traitement par le convertisseur DC-DC.

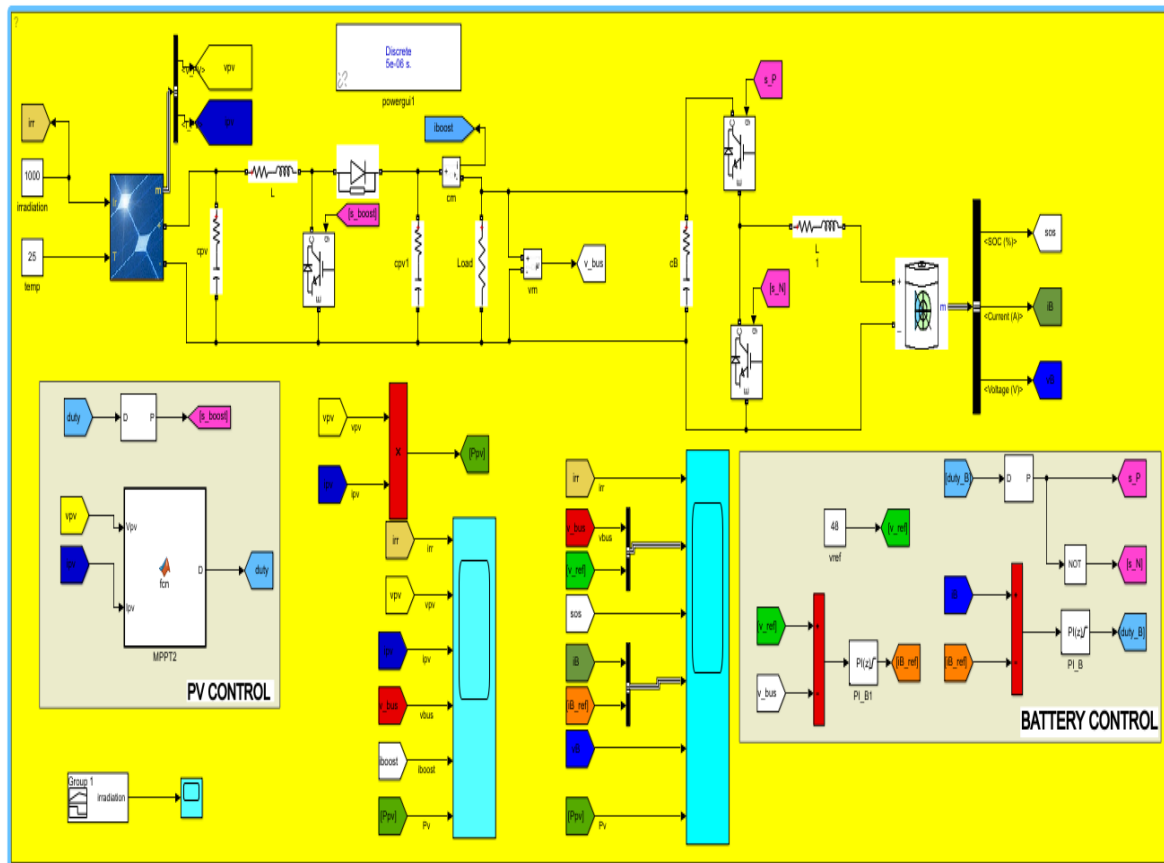


Figure IV.5 Schéma de simulation de la chaine de stockage photovoltaïque

Scénario 1 : Mode charge - Irradiation forte $I_r = 1000 \text{ W/m}^2$

Dans ce scénario, le système fonctionne en mode charge, c'est-à-dire que l'énergie produite par le générateur photovoltaïque est utilisée à la fois pour alimenter la charge et charger la batterie. L'irradiation est fixée à 1000 W/m^2 .

La figure (IV.6) illustre les résultats de simulation du système de stockage photovoltaïque en Mode charge.

Le panneau photovoltaïque devient la principale source d'énergie, assurant à la fois l'alimentation de la charge résistive R_{ch} et la recharge de la batterie. Dans ce cas, le SOC augmente et la tension du bus et de la batterie est bien régulée, et le courant I_B devient rapidement négatif et suit la consigne I_{B-ref} , ce qui indique une phase de charge (courant entrant dans la batterie).

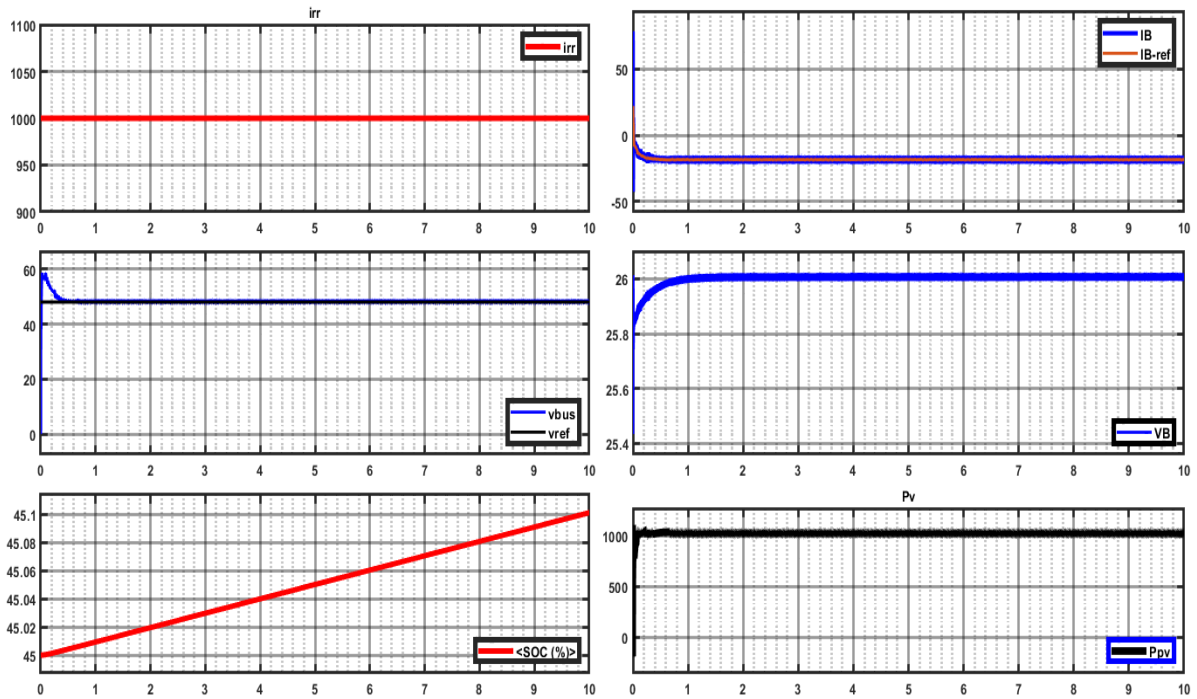


Figure IV.6 Caractéristiques de la batterie en mode charge avec une irradiation
 $I_r=1000 \text{ W/m}^2$

Scénario 2 : Mode décharge - Irradiation faible $I_r=100 \text{ W/m}^2$

Dans ce scénario, le système fonctionne en mode décharge, ce qui signifie que la batterie prend en charge l'alimentation de la charge lorsque la production photovoltaïque est insuffisante. L'irradiation est fixée à 100 W/m^2 .

À cette situation, le contrôleur MPPT continue de chercher le point de puissance maximale (MPPT), mais la puissance disponible reste très faible.

La figure (IV.7) illustre les résultats de simulation du système de stockage photovoltaïque en mode décharge.

La puissance produite reste stable autour de 100 W , Cette puissance est insuffisante pour charger la batterie. Dans ce cas, on obtient une diminution de l'état de charge (SOC) et un courant de batterie I_B positif, indiquant une phase de décharge.

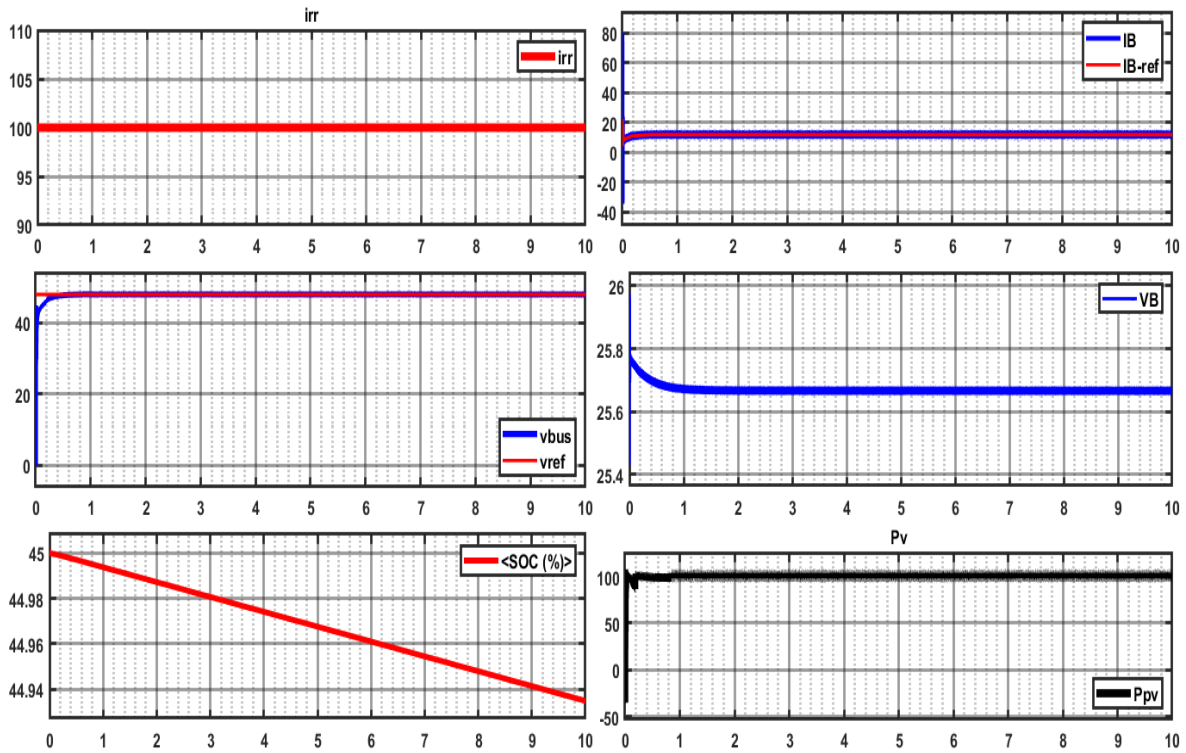


Figure IV.7 Caractéristiques de la batterie en mode décharge avec une irradiation de 100 W/m²

Scénario 3 : Mode charge/décharge irradiation variable (cycle jour-nuit)

Dans ce scénario, l'irradiation solaire est variable, simulant une journée réelle avec des conditions changeantes (matin, midi, après-midi, soir). Le système passe successivement par des phases de charge et de décharge selon la puissance photovoltaïque disponible.

La figure (IV.8) illustre les résultats de simulation du système de stockage photovoltaïque sous différentes valeurs d'irradiation.

On observe que durant la nuit (irradiation 0), La batterie alimente la charge en l'absence ou en cas de faible ensoleillement, entraînant une baisse du SOC et un courant de décharge. Lorsque l'irradiation augmente, le panneau photovoltaïque prend le relais, recharge la batterie (SOC en hausse, courant de charge négatif) et alimente la charge. Ce fonctionnement illustre le rôle crucial du contrôleur de charge dans la gestion et la protection du système.

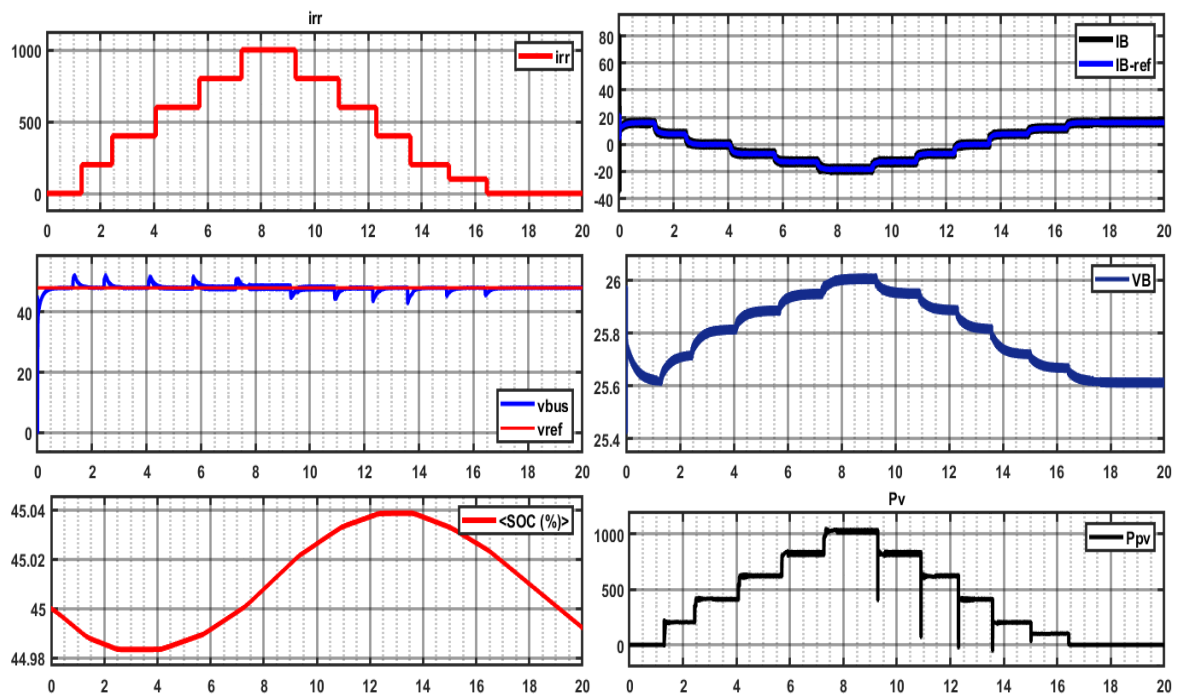


Figure IV.8 Caractéristiques de la batterie dans une chaîne de stockage photovoltaïque pour différentes irradiances

IV.4 Conclusion

Au terme de cette étude, une chaîne de stockage photovoltaïque complète a été développée et validée, associant un générateur PV, un convertisseur boost DC–DC, un algorithme MPPT « Perturbation & Observation » et une batterie lithium-ion régulée par une commande PI. Les simulations sous MATLAB/Simulink ont mis en évidence la fiabilité de la gestion charge/décharge de la batterie, la régulation PI assurant en phase de charge une tension stable et un courant optimal, et en phase de décharge une alimentation continue de la charge résistive. Par ailleurs, l'efficacité du MPPT a été confirmée : sous forte irradiation (1000 W/m^2), le système extrait et exploite la puissance maximale du panneau tout en rechargeant efficacement la batterie, comme en témoignent l'augmentation du SOC et le courant de charge négatif. Enfin, la robustesse du dispositif face à des conditions variables a été démontrée, puisque, en faible irradiation (100 W/m^2) ou lors de scénarios jour-nuit, le système bascule automatiquement entre charge et décharge, garantissant ainsi la continuité d'alimentation de la charge tout en protégeant la batterie contre les extrêmes de fonctionnement.

Conclusion Générale

Ce travail a porté sur la conception, la modélisation, la simulation et l'optimisation d'un système photovoltaïque avec stockage, intégrant des convertisseurs DC–DC, un algorithme MPPT, ainsi qu'une batterie lithium-ion. L'objectif principal était de développer une architecture capable de valoriser efficacement l'énergie solaire tout en assurant une alimentation électrique stable, continue et autonome.

Le premier chapitre a été consacré à l'étude des systèmes photovoltaïques, avec une présentation générale de leur architecture, et les différents types de cellules solaires, ainsi que leurs avantages et limites.

Le deuxième chapitre a porté sur l'analyse des convertisseurs DC–DC (Buck, Boost et Buck–Boost), dont les performances ont été évaluées à travers des modélisations et des simulations confirmant leurs principes de fonctionnement avec l'intégration d'un algorithme MPPT. La méthode de Perturbation et Observation, s'est révélée essentielle pour l'extraction de la puissance maximale pour différentes conditions atmosphériques.

Le troisième chapitre a été consacré à l'étude des batteries de stockage ce qui a permis de préciser leur fonctionnement, d'analyser leurs caractéristiques techniques et d'identifier les principaux critères de dimensionnement (capacité, état de charge, profondeur de décharge, nombre de cycles). À partir de ces éléments, une méthodologie rigoureuse a été élaborée pour ajuster la taille et les paramètres du système aux besoins énergétiques spécifiques.

Le dernier chapitre porte sur l'étude de la chaîne de stockage photovoltaïque global, convertisseur DC–DC, algorithme MPPT et batterie pilotée par une commande PI qui ont été intégrés au sein d'un modèle MATLAB/Simulink. Les simulations ont validé la fiabilité et la robustesse de cette chaîne énergétique, aussi bien en conditions stables qu'en présence de variations climatiques.

En conclusion, l'intégration d'une batterie de stockage et d'un convertisseur DC/DC, combinée à un algorithme MPPT, optimise les performances d'un système photovoltaïque en garantissant une meilleure stabilité, un rendement énergétique amélioré et une adaptation efficace aux fluctuations de l'ensoleillement.

Bibliographie

[1]-F-Énergie, Fonctionnement et technologies photovoltaïques (Mod3),

[fr.scribd.com/document/465166880/IF-ENERGIE-Mod3-Fonctionnement technologies-PV-FR](https://fr.scribd.com/document/465166880/IF-ENERGIE-Mod3-Fonctionnement_technologies-PV-FR)

[2]-<https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/solaire-photovoltaique>

[3]-BILLEL, Ferrah. Etude d'un système Hybride (photovoltaïque-éolien), mémoire de Master. Université Badji Mokhtar Annaba, 2015. UCLouvain, Composants d'un panneau photovoltaïque.

[4]-<https://sites.uclouvain.be/ele/FR/realisations/EnergiesRenouvelables/FiliereSolaire/PanneauxPhotov>

[5]-<https://lenergie-solaire.net/energie-solaire-photovoltaique/installations-solaires-autonomes>

[6]- BOUDEHOUCHE, M. et OUENNOUGH, M. Gestion d'un système photovoltaïque avec stockage. mémoire de master, UNIVERSITE ABDERAHMANE MIRA DE BEJAÏA, 2016.

[7]-KACIMI, Nora. Contribution à la Commande et la Supervision des Systèmes à Energie Renouvelables. Thèse de doctorat. Ecole Nationale Polytechnique.

[8]- HADJ ZOUBIR, Noria Sana Afef et SI DJILANI, Fatima. Etude et réalisation d'un hacheur Boost destiné à la conversion photovoltaïque. 2018. Thèse de doctorat. Université Ibn Khaldoun-Tiaret.

[9]-DRAIDI, Djazira. Réalisation d'un chargeur de Batterie Basé sur La commande MPPT photovoltaïque. 2022.

[10]- BENSAOUDI, Mohamed Samir et ARAR, Salah Eddine. Etude d'un convertisseur boost pour système photovoltaïque. 2020. Thèse de doctorat. Dr Bousmaha Imen Souhila.

[11]- Développement d'une topologie à haut rendement pour un convertis

[12]- ABDELMOUMENE, HABIB et BELOUFA, YAGOUB. Étude d'un système photovoltaïque en mode fonctionnement autonome. 2020.

- [13]- AZIZ, Toulait et RACHID, Aili. Modélisation et simulation sous MATLAB/SIMULINK d'un système photovoltaïque adapté par une commande MPPT. 2014. Thèse de doctorat. Université Mouloud Mammeri.
- [14]- Belkacemi, M et Sifi, R. Etude et réalisation d'un convertisseur DC-DC avec contrôleur MPPT destiné au pompage photovoltaïque 2014. Ecole Nationale Polytechnique Département d'Automatique
- [15]- Calculeo.fr, L'onduleur solaire : rôle, fonctionnement, prix,
- [16]- <https://www.basengreen.com/fr/what-is-an-electric-storage-battery>
- [17]- Mémoire master 2 Mémoire master 2 Contribution à la gestion d'énergie d'un système renouvelable : panneau photovoltaïque / batterie
- [18]- Ferdji, A., Kadri, N.E.H., *Étude d'une installation hybride (photovoltaïque-réseau) : Application à l'aire de repos Les Zianides*, Mémoire Master, 2022, Université non précisée.
- [19]- <https://batconnect.fr/les-differents-types-de-batteries/>
- [20]- <https://www.flashbattery.tech/fr/blog/batteries-au-sodium/>
- [21]- <https://allo.solar/base-de-connaissances/type-batterie.html>
- [22]- https://www.univ-usto.dz/images/coursenligne/DR_Thesis_Aboutte_ed2_vr02_finale.pdf
- [23]- <https://pknergypower.com/fr/what-is-depth-of-discharge/>
- [24]- <https://www.photovoltaique.info/fr/realiser-une-installation/choix-du-materiel/batteries-stockage->
- [25]- Mémoire master 2 Préparé par : BOUKHIRA Mohammed Lamine MAROUF Youcef Thème: Étude et Réalisation d'un Circuit de Recharge de la Batterie au Lithium Suivant les Deux Étapes « Mode Courant Constant et Voltage Constant »
- [26]- Mémoire master 2 Présenté par :MECHEHAT Tamader ASSAL Merouane Contribution à la gestion d'énergie d'un système renouvelable : panneau photovoltaïque / batterie
- [27]- : file:///C:/Users/HP/Downloads/2.pdf
- [28]- (Non inclus – doublon de la source 4)
- [29]- Document local non accessible : file:///C:/Users/HP/Downloads/2.pdf. Veuillez fournir le fichier ou son titre.

- [30]- Bounour, A., & Bouti, Y. (2021). *Étude par simulation d'un système photovoltaïque avec stockage* (Mémoire de Master). Université Badji Mokhtar - Annaba, Faculté des Sciences de l'Ingénieur, Département de Génie Électrique
- [31]- DERDAR, Abderrahim, BENSIALI, Nadia, ADJABI, Mohamed, et al. Photovoltaic energy generation systems monitoring and performance optimization using wireless sensors network and metaheuristics. *Sustainable Computing : Informatics and Systems*, 2022, vol. 35, p. 100684.