

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université A. MIRA – Bejaia

Faculté de Technologie

Département de Génie électrique

Spécialité Commande électrique



Mémoire de fin d'étude

En vue de l'obtention du diplôme de master en Electrotechnique

Option : Commande Électrique

Thème

Etude d'un système photovoltaïque/Batterie

Réalisé par :

OUKACHBI Yacine

MAZOUZ Sofia

Encadré par :

Mr BERBOUCHA Ali

Co-encadré par : Mr AMIROUCHE Elyazid

Année universitaire : 2024/2025

Remerciements

AVANT TOUT, NOUS REMERCIONS ALLAH, LE TOUT-PUISANT, DE NOUS AVOIR ACCORDÉ LA SANTÉ, LA PATIENCE ET LA FORCE NÉCESSAIRES À L'ACCOMPLISSEMENT DE CE MÉMOIRE.

SANS SA VOLONTÉ, RIEN N'AURAIT ÉTÉ POSSIBLE.

NOUS TENONS À EXPRIMER NOTRE PROFONDE GRATITUDE À NOTRE ENCADRANT, BERBOUCHA ALI, POUR SON ACCOMPAGNEMENT, SA BIENVEILLANCE ET SES CONSEILS PRÉCIEUX TOUT AU LONG DE CE TRAVAIL.

NOUS REMERCIONS ÉGALEMENT MONSIEUR AMIROUCHE ELYAZID POUR SON AIDE ET SES CONSEILS.

NOUS ADRESSONS AUSSI NOS REMERCIEMENTS AUX MEMBRES DU JURY POUR AVOIR ACCEPTÉ D'ÉVALUER CE TRAVAIL.

NOUS REMERCIONS ENFIN TOUS CEUX QUI, DE PRÈS OU DE LOIN, NOUS ONT SOUTENUS DURANT CETTE AVENTURE : NOTRE FAMILLE, NOS AMIS.

LEUR PRÉSENCE ET LEURS ENCOURAGEMENTS NOUS ONT ÉTÉ D'UN GRAND RÉCONFORT

REMERCIEMENTS,

Dédicaces

JE DÉDIE CE MODESTE TRAVAILLE À MON PÈRE, MON MODÈLE ET MON EXEMPLE DANS LA VIE, TON COURAGE, TA SAGESSE ET TA PERSÉVÉRANCE M'INSPIRENT CHAQUE JOUR.

MERCI POUR TON SOUTIEN, TES SACRIFICES ET TES PRÉCIEUX CONSEILS QUI M'ONT GUIDÉ TOUT AU LONG DE CE PARCOURS.

À MA MÈRE, MERCI POUR TA PATIENCE, TES ENCOURAGEMENTS ET TA FOI EN MOI, MÊME DANS LES MOMENTS LES PLUS DIFFICILES.

À MES SOEURS, MERCI POUR VOTRE PRÉSENCE, VOS ENCOURAGEMENTS ET VOTRE COMPLICITÉ, QUI ONT ÉTÉ POUR MOI UN VÉRITABLE APPUI.

À MON BINÔME, MERCI POUR TON SÉRIEUX, TA COLLABORATION. CE TRAVAIL EST AUSSI LE FRUIT DE NOS EFFORTS PARTAGÉS.

À MES AMIS R, W, ET H, QUI SONT POUR MOI COMME DES FRÈRES.

MERCI POUR VOTRE Amitié FIDÈLE ET VOTRE SOUTIEN.

YACINE

Dédicaces

À MES PARENTS,

POUR VOTRE AMOUR INCONDITIONNEL, VOTRE SOUTIEN CONSTANT ET
VOS INNOMBRABLES SACRIFICES.

CE MÉMOIRE EST LE FRUIT DE VOTRE CONFIANCE EN MOI ET DE VOS
ENCOURAGEMENTS, MÊME DANS LES MOMENTS LES PLUS DIFFICILES.

MERCI D'AVOIR TOUJOURS CRU EN MOI.

JE VOUS LE DÉDIE DE TOUT CŒUR.

SOFLA

SOMMAIRE

Remerciements

Dédicace

Dédicace

Sommaire

Liste des figures

Liste des tableaux

Nomenclature et abréviation

Introduction générale

CHAPITRE I

I.1 Introduction.....	1
I.2 Historique des systèmes de panneaux photovoltaïques.....	1
I.3 L'énergie solaire.....	3
I.3.1 Rayonnement solaire	3
I.3.1.1 Composants du rayonnement solaire	3
I.3.1.2 Spectre du rayonnement solaire	4
I.3.2 L'énergie solaire photovoltaïque.....	5
I.3.2.1 L'effet photovoltaïque	5
I.3.2.2 La cellule photovoltaïque.....	6
I.3.2.3 Constitution d'une cellule photovoltaïque	6
I.3.2.4 Principe de fonctionnement	8
I.3.3 Le module photovoltaïque	9
I.3.3.1 Les fonctions des modules photovoltaïques.....	9
I.3.4 Le panneau photovoltaïque	10
I.3.5 Système photovoltaïque	11
I.3.6 Générateur photovoltaïque.....	11
I.4 Batteries solaires	12
I.5 Les régulateurs	12
I.5.1 Le rôle d'un régulateur dans un système photovoltaïque	12
I.5.2 Les types des régulateurs de charge	12
I.5.3 Choix d'un régulateur solaire.....	12

I.6 Système de conversion	13
I.6.1 Le convertisseur continu-continu	13
I.7 Les types d'installations photovoltaïques	14
I.7.1 Les installations sur site isolé.....	14
I.7.2 Les installations raccordées au réseau de distribution public	15
I.7.2.1 Solution avec injection de surplus	16
I.8 Conclusion	17

CHAPITRE II

II.1 Introduction	19
II.2 Modélisation du système photovoltaïque	19
II.2.1 Modélisation d'une cellule photovoltaïque	19
II.2.2Modélisation d'un panneau photovoltaïque	20
II.2.3 Simulation du Panneau Photovoltaïque.....	20
II.3 Les convertisseurs DC/DC	23
II.3.1 Types des convertisseurs DC/DC	24
II.4 La Batterie	30
II.5 Commande MPPT	32
II.6 Conclusion	33

CHAPITRE III

III. 1 Introduction	36
III.2 Système globale.....	36
III.3 PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT.....	37
III.3.1 Mode 01	38
III.3.2 Mode 02	38
III .4 Simulations et Résultats	38
III.4.1 Panneau Photovoltaïque	39
III.4.2 Batterie.....	40
III.4.3 La charge.....	42
III.5 Conclusion	43
Conclusion générale	43
Références Bibliographiques	45

Liste des figures

CHAPITRE I

Figure I. 1 Source d'énergie solaire.	3
Figure I. 2 Composants du rayonnement solaire	4
Figure I. 3 Spectre du rayonnement solaire	5
Figure I. 4 Cellule solaire.	6
Figure I. 5 Description d'une cellule.	8
Figure I. 6 Le principe de fonctionnement d'une cellule solaire	9
Figure I. 7 Représentation d'un module photovoltaïque	9
Figure I. 8 les différents types de module photovoltaïque	10
Figure I. 9 Boite de dérivation	10
Figure I. 10 Les constitutions d'un système PV	11
Figure I. 11 Installation sur site isolé.....	14
Figure I. 12 Exemple des installations photovoltaïques.	15
Figure I. 13 L'injection d'énergie dans les réseaux.....	16
Figure I. 14 Injection d'énergie	16
Figure I. 15 Injection d'énergie supplément dans le réseau.....	17

CHAPITRE II

Figure II. 1 Schéma d'une cellule photovoltaïque a une diode.	19
Figure II. 2 Les caractéristiques Courant-Tension I-V avec variation d'ensoleillement	21
Figure II. 3 Les caractéristiques courant/tension I-V pour différentes températures.	21
Figure II. 4 Différentes allures de puissance/tension pour température constante et ensoleilements variables.	22
Figure II. 5 Différentes allures de puissance/tension pour ensoleillement constant et températures variables.	22
Figure II. 6 Rôle d'un convertisseur DC/DC dans un système photovoltaïque.	23
Figure II. 7 Schéma électrique d'un convertisseur BOOST.	25
Figure II. 8 Schéma équivalent du hacheur boost pendant la phase active.	25
Figure II. 9 Schéma équivalent du hacheur boost pendant la phase de roue libre.	26
Figure II. 10 Signal de commande de l'interrupteur	27
Figure II. 11 Structure du hacheur série réversible en courant.	29
Figure II. 12 Principe de fonctionnement du hacheur réversible en courant (Phase 1).....	29
Figure II. 13 Principe de fonctionnement du hacheur réversible en courant (Phase 2).....	30
Figure II. 14 -A: Tension de décharge d'une batterie	31
Figure II. 15 -B: Tension de charge d'une batterie	32
Figure II. 16 Organigramme de la MPPT P&O	33

CHAPITRE III

Figure III. 1 Schéma synoptique du système global	37
Figure III. 2 Profil d'irradiation solaire (W/m ²) en fonction du temps	39
Figure III. 3 Puissance générée par le panneau photovoltaïque (W) en fonction du temps (s)	40
Figure III. 4 Puissance de la batterie (W) en fonction du temps(s).....	40
Figure III. 5 Etat de charge de la batterie (%) en fonction du temps (s)	41
Figure III. 6 Puissance de la charge(W) en fonction du temps(s).....	42

Liste des tableaux

Tableau I. 1: Les évènements marquant Injection d'énergie supplément dans le réseau.....	2
Tableau II. 1: Les caractéristiques du panneau photovoltaïque de la marque Suntech, modèle « STP080S-12/Bb »	20
Tableau III. 1: Les modes de fonctionnement de notre système	37

Nomenclature et abréviation

I_{pv} : Courant généré par la cellule photovoltaïque, en ampères (A).

I_{ph} : Courant photo-généré, en ampères (A).

I_D : Courant de la diode, en ampères (A).

IR_p : Courant de fuite dans la résistance parallèle, en ampères (A).

V_{pv} : Tension aux bornes de la cellule photovoltaïque, en volts (V).

R_s : Résistance série de la cellule PV, en ohms (Ω).

I_s : Courant de saturation, en ampères (A).

T_j : Température de jonction, en kelvins (K).

T_{ref} : Température de référence (STC), en kelvins (K).

E_s : Irradiation solaire, en watts par mètre carré (W/m^2).

E_{ref} : Irradiation de référence (STC), en watts par mètre carré (W/m^2).

q : Charge élémentaire, en coulombs (C).

k : Constante de Boltzmann, en joules par kelvin (J/K).

A : Facteur d'idéalité de la diode, sans unité (-).

N_s : Nombre de cellules en série, sans unité (-).

E_G : Énergie de gap du semi-conducteur, en électronvolts ou joules (eV ou J).

P_{max} : Puissance maximale du panneau, en watts (W).

V_{max} : Tension à puissance maximale, en volts (V).

I_{max} : Courant à puissance maximale, en ampères (A).

I_{cc} : Courant de court-circuit, en ampères (A).

V_{co} : Tension de circuit ouvert, en volts (V).

α : Coefficient de température de la tension, en pourcentage par degré Celsius ($%/^{\circ}C$).

β : Coefficient de la température de la puissance, en pourcentage par degré Celsius ($%/^{\circ}C$)

T : Période de découpage, en secondes (s).

T_{on} : Durée de conduction de l'interrupteur, en secondes (s).

T_{off} : Durée de blocage de l'interrupteur, en secondes (s).

L : Inductance du convertisseur, en henrys (H).

C : Capacité de filtrage, en farads (F).

R : Résistance de charge, en ohms (Ω).

U_c : Tension de sortie du convertisseur, en volts (V).

P_{batt} : Puissance fournie ou absorbée par la batterie, en watts (W).

P_{ch} : Puissance demandée par la charge, en watts (W).

SOC : État de charge de la batterie, en pourcentage (%).

t : Temps, en secondes (s).

UT ; Tension au niveau de l'interrupteur, en volts (V).

PE : Puissance électrique au convertisseur, en watts (W).

PC : Puissance consommée par la charge, en watts (W).

η_{batt} : Rendement énergétique de la batterie, en pourcentage (%).

Ppv : Puissance produite par le panneau photovoltaïque, en watts (W).

Vbus : Tension du bus DC, en volts (V).

Introduction générale

INTRODUCTION GENERALE

Face à la crise énergétique mondiale, aux préoccupations environnementales croissantes et à la raréfaction des ressources fossiles, la transition vers des sources d'énergie renouvelables s'impose comme une nécessité. Parmi elles, l'énergie solaire photovoltaïque occupe une place de plus en plus stratégique grâce à son caractère inépuisable, propre et silencieux. En effet, la technologie photovoltaïque permet de convertir directement la lumière du soleil en électricité, ouvrant ainsi la voie à des solutions énergétiques durables pour un large éventail d'applications, tant en site isolé que raccordé au réseau.

Ce mémoire s'inscrit dans cette dynamique et vise à étudier, modéliser et simuler un système photovoltaïque complet, intégrant la production, la conversion et le stockage d'énergie. L'objectif est d'optimiser le rendement global du système et de garantir une alimentation fiable et continue, malgré les variations d'ensoleillement. Pour ce faire, différentes approches théoriques, outils de simulation (tels que MATLAB/Simulink), et technologies de conversion (convertisseurs DC/DC, commande MPPT) sont mobilisés. Ce travail apporte ainsi une contribution concrète à la conception et à l'analyse de systèmes photovoltaïques performants, adaptés aux exigences actuelles en matière d'efficacité énergétique et de durabilité.

CHAPITRE I

(Etat de l'art sur les systèmes PV)

I.1 Introduction

On distingue plusieurs types de sources d'énergies renouvelables comme : l'énergie hydroélectrique, l'énergie géothermique, l'énergie éolienne et l'énergie solaire photovoltaïque. L'énergie solaire photovoltaïque provient de la transformation d'une partie du rayonnement solaire en électricité, la conversion de cette énergie peut se faire grâce aux cellules photovoltaïques. Cela est basé sur un phénomène appelé effet photovoltaïque.

Dans ce chapitre nous exposons l'énergie solaire et plus précisément l'énergie solaire photovoltaïque, le phénomène de l'effet photovoltaïque, le principe et la constitution des cellules photovoltaïques ainsi le module photovoltaïque et le panneau photovoltaïque. Nous avons également expliqué les différents composants du système photovoltaïque aussi les types d'installations photovoltaïques.

I.2 Historique des systèmes de panneaux photovoltaïques

Les débuts scientifiques (1839 – début XXe siècle)

- En 1839, le physicien français Alexandre Edmond Becquerel découvre l'effet photovoltaïque, constatant qu'un courant électrique peut être généré lorsque certains matériaux sont exposés à la lumière [1].
- En 1877, W. G. Adams et R. E. Day observent l'effet photovoltaïque sur le sélénium, et Charles Fritts crée en 1883 la première cellule solaire fonctionnelle à base de sélénium et d'une fine couche d'or, avec un rendement d'environ 1% [2].
- Albert Einstein explique l'effet photoélectrique en 1905, ce qui lui vaut le prix Nobel en 1921[3].

L'ère moderne : la cellule au silicium et l'essor spatial (années 1950-1970)

- En 1954, les laboratoires Bell aux États-Unis mettent au point la première cellule photovoltaïque moderne en silicium, atteignant un rendement de 6%. Cette innovation marque le début de l'électricité photovoltaïque exploitable [4].
- Dès 1958, le satellite Vanguard I devient le premier satellite alimenté par des cellules photovoltaïques, démontrant la fiabilité de cette technologie dans des conditions extrêmes [5].

- Dans les années 1960, l'utilisation des panneaux photovoltaïques se généralise dans le secteur spatial, puis s'étend à des applications terrestres isolées (balises maritimes, relais de télécommunication) [6].

Déploiement terrestre et diversification des usages (années 1970-2000)

- Les chocs pétroliers des années 1970 stimulent l'intérêt pour l'énergie solaire, entraînant une augmentation des investissements et des recherches [7].
- En 1974, le premier bâtiment alimenté uniquement par l'énergie solaire est construit à Albuquerque, au Nouveau-Mexique [8].
- La production industrielle de modules photovoltaïques destinés à des usages terrestres débute en France dès 1960 avec la société Radiotechnique Compelec [9].
- Les applications se diversifient : agriculture (pompage d'eau), signalisation routière, parcmètres, balises, sites isolés [10].

L'industrialisation et la démocratisation (XXI^e siècle à aujourd'hui)

- Les progrès techniques et la baisse des coûts rendent les panneaux photovoltaïques de plus en plus accessibles, avec des rendements moyens actuels compris entre 15% et 22% selon les technologies [11].
- Entre 2010 et 2016, la puissance installée mondiale est multipliée par six, passant de 50 GW à 305 GW [12].
- En 2024, la production d'électricité solaire dans l'Union européenne dépasse pour la première fois celle issue du charbon [13].

Année	Événement marquant
1839	Découverte de l'effet photovoltaïque par edmond becquerel
1883	Première cellule solaire fonctionnelle (Charles Fritts)
1954	Première cellule au silicium moderne (Bell Labs, 6% rendement)
1958	Premier satellite alimenté par panneaux solaires (Vanguard I)
1974	Premier bâtiment entièrement solaire (Albuquerque, USA)
2010-16	Multiplication par 6 de la puissance photovoltaïque mondiale
2024	Solaire > charbon dans le mix électrique de l'UE

Tableau I.1: Les événements marquant Injection d'énergie supplément dans le réseau

I.3 L'énergie solaire

L'énergie solaire repose entièrement sur la lumière du soleil, ce qui en fait une source d'énergie renouvelable considérée comme inépuisable. Elle est qualifiée d'énergie 100% verte puisqu'elle ne génère pas directement d'émissions de CO₂ lors de sa production. Grâce à cette ressource naturelle, il est possible de produire de l'électricité à l'aide de panneaux solaires ou de centrales thermiques. Ces installations captent les rayons solaires et les transforment en énergie électrique, offrant ainsi une solution durable et respectueuse de l'environnement. [14].



Figure I.1 : Source d'énergie solaire [15].

I.3.1 Rayonnement solaire

Le rayonnement solaire est composé d'ondes électromagnétiques émises par le soleil sous forme de faisceaux lumineux. Ces faisceaux contiennent des ondes perceptibles à l'œil humain, ainsi que d'autres invisibles. Le spectre visible de cette lumière s'étend du rouge au violet, englobant ainsi une gamme de couleurs que nous pouvons observer naturellement. [16].

I.3.1.1 Composants du rayonnement solaire

Les rayons solaires traversant l'atmosphère terrestre sont répartis en [17] :

- Rayonnement direct : Ce sont des rayons qui tombent directement sans avoir aucune barrière (nuages, bâtiments ...).
- Rayonnement diffus : ce sont les rayons du soleil réfractés par les nuages.
- Rayonnement réfléchi : ce sont les rayons résultant de la réflexion de la lumière de solaire par les différents sols.

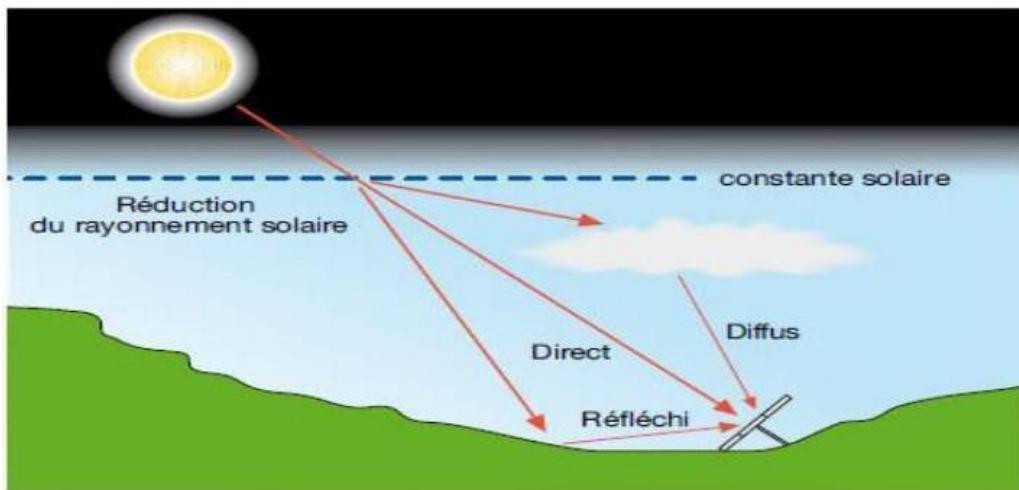


Figure I. 2 : Composants du rayonnement solaire [17].

I.3.1.2 Spectre du rayonnement solaire

Le spectre solaire désigne la répartition du rayonnement électromagnétique émis par le soleil en fonction de sa longueur d'onde lorsqu'il atteint la surface externe de l'atmosphère terrestre. Ce rayonnement, une fois arrivé sur Terre, couvre une gamme de longueurs d'onde allant d'environ 250 nm à 400 nm. (Figure I.3) [18]. Une fraction du rayonnement solaire est renvoyée par l'atmosphère terrestre, tandis que le reste est absorbé par la surface de la planète, contribuant ainsi au réchauffement et aux divers processus climatiques.

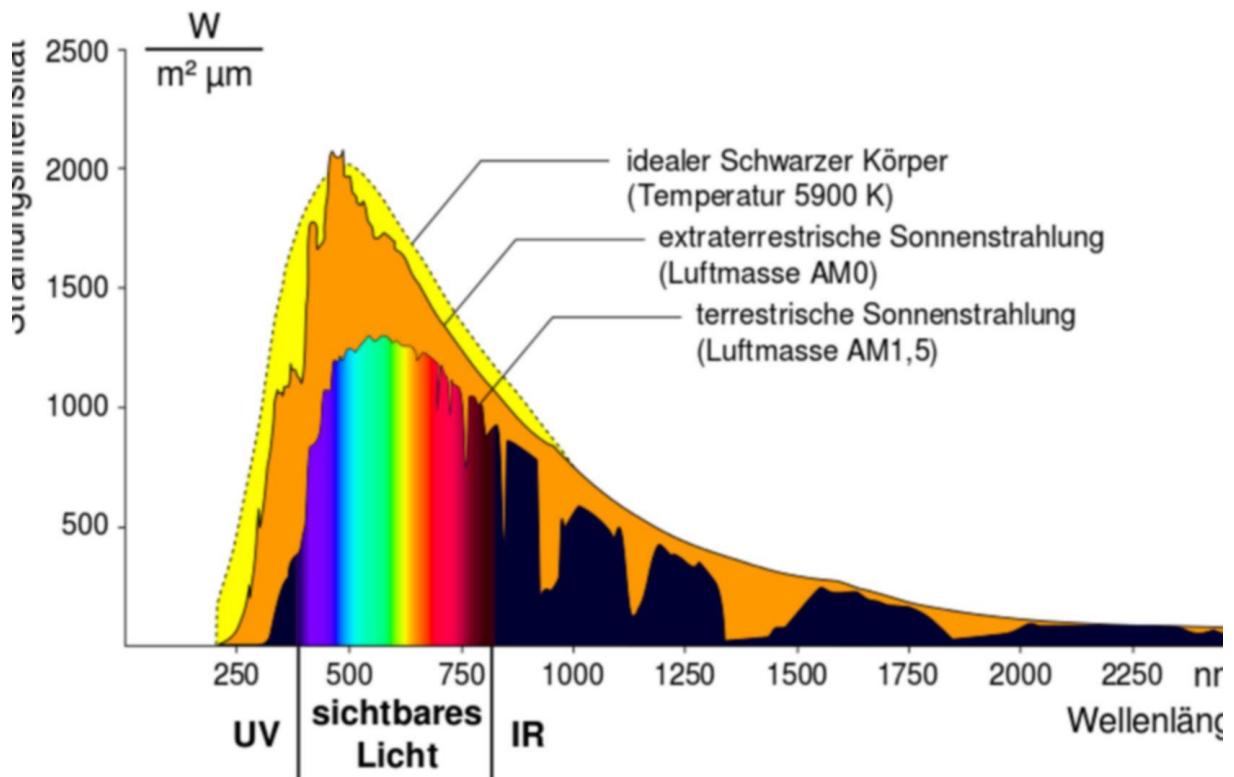


Figure I. 3 : Spectre du rayonnement solaire [19].

I.3.2 L'énergie solaire photovoltaïque

L'énergie solaire photovoltaïque permet de produire de l'électricité à partir du rayonnement solaire. Son exploitation repose sur des cellules photovoltaïques capables de convertir l'énergie lumineuse en électricité. Plus précisément, ce processus utilise l'énergie des photons présents dans la lumière pour générer un courant électrique continu. Lorsqu'une cellule photovoltaïque est exposée à la lumière, elle absorbe cette énergie et transforme les photons en électricité. Pour renforcer cette production, plusieurs cellules sont assemblées pour former un module solaire photovoltaïque, et plusieurs modules regroupés constituent une installation solaire complète. [20]

I.3.2.1 L'effet photovoltaïque

Le terme « photovoltaïque » trouve son origine dans le grec « photos », signifiant lumière, et dans le nom du physicien italien Alessandro Volta, célèbre pour l'invention de la pile électrique en 1800 et pour avoir donné son nom à l'unité de mesure de la tension électrique, le volt.[21]

L'effet photovoltaïque, faisant partie des effets photoélectriques, est utilisé dans les cellules photovoltaïques pour produire de l'électricité à partir du rayonnement solaire. Ce phénomène

réulte de l'impact des photons lumineux sur un matériau semi-conducteur, qui transmet alors leur énergie aux électrons, générant ainsi une tension électrique [21]. Lorsqu'un photon est absorbé par un semi-conducteur, il entraîne la formation de paires électrons-trous, provoquant l'excitation d'un électron de la bande de valence vers la bande de conduction et créant ainsi un courant ou une tension électrique.

Ce principe permet la conception de divers composants électroniques, tels que les photodiodes, les phototransistors et les photopiles, qui exploitent l'énergie lumineuse de différentes manières.

I.3.2.2 La cellule photovoltaïque

À ce jour, la seule technologie permettant de convertir directement la lumière en électricité est la cellule photovoltaïque. Élément fondamental des panneaux solaires, elle est constituée d'un matériau semi-conducteur, généralement du silicium, et génère une tension électrique comprise entre 0,5 et 0,6 V lorsqu'elle est exposée au rayonnement solaire. (Voir figure I.4). [22]



Figure I.4 : Cellule solaire.

I.3.2.3 Constitution d'une cellule photovoltaïque

La cellule photovoltaïque est l'élément fondamental permettant la conversion directe de la lumière solaire en électricité. Par l'assemblage de plusieurs cellules, il est possible d'atteindre

la puissance souhaitée. Ces cellules, aussi appelées photopiles, sont des composants optoélectroniques conçus à partir de matériaux semi-conducteurs possédant des propriétés intermédiaires entre les conducteurs et les isolants. Le silicium est le matériau le plus couramment utilisé, bien que d'autres matériaux comme l'arséniure de gallium (AsGa) et le tellurure de cadmium (CdTe)[23]. puissent aussi être exploités.

Une cellule solaire repose sur une jonction PN, qui résulte de l'association de deux zones de type opposé. Au voisinage de cette jonction, un champ électrique se forme, entraîné par le déséquilibre de charges, facilitant ainsi la circulation des électrons libérés par les photons de la lumière incidente.

Concrètement, une cellule photovoltaïque est constituée de plusieurs couches minces Figure (I.5):

- Une couche antireflet sur la face avant, optimisant la pénétration des photons et réduisant les pertes par réflexion.
- Une grille conductrice avant, collectrice des électrons, qui doit être liée au silicium et résistante à la corrosion.
- Une couche dopée N, contenant des porteurs de charge négatifs (électrons).
- Une couche dopée P, avec des porteurs de charge positifs (trous).
- Une surface de contact conductrice en métal, chargée de collecter les électrons et assurant une bonne conductivité ainsi qu'une adhérence optimale au silicium.

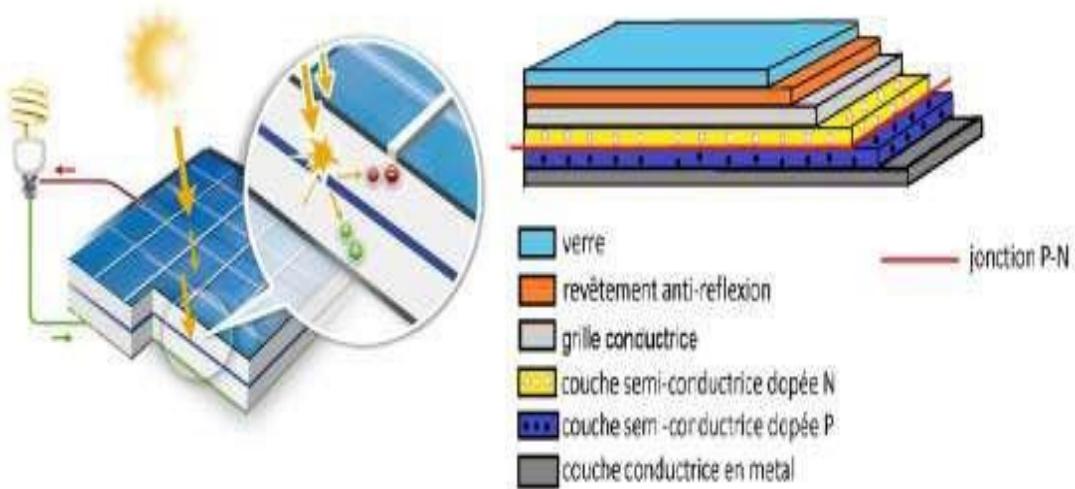


Figure I.5 : Description d'une cellule.

I.3.2.4 Principe de fonctionnement

Le fonctionnement d'une cellule photovoltaïque repose sur l'interaction des photons issus du rayonnement solaire avec le matériau semi-conducteur qui la compose. Lorsque ces photons, d'énergie $E_{PH}=hv$, pénètrent dans la cellule, ils transfèrent leur énergie aux atomes présents dans la jonction. Si cette énergie est suffisamment élevée, elle permet aux électrons de la bande de valence de passer dans la bande de conduction, entraînant ainsi la formation de paires électron-trou.

Les électrons (porteurs de charge négatifs) et les trous (porteurs de charge positifs) sont alors séparés par un champ électrique naturel, formant une barrière de potentiel. Lorsqu'une charge est connectée aux bornes de la cellule, les électrons de la zone N migrent vers les trous situés dans la zone P via le circuit externe. Cette circulation des électrons génère une différence de potentiel et permet l'établissement d'un courant électrique continu. C'est ce principe qui est exploité pour produire de l'énergie solaire photovoltaïque. Figure (I -6) [24].

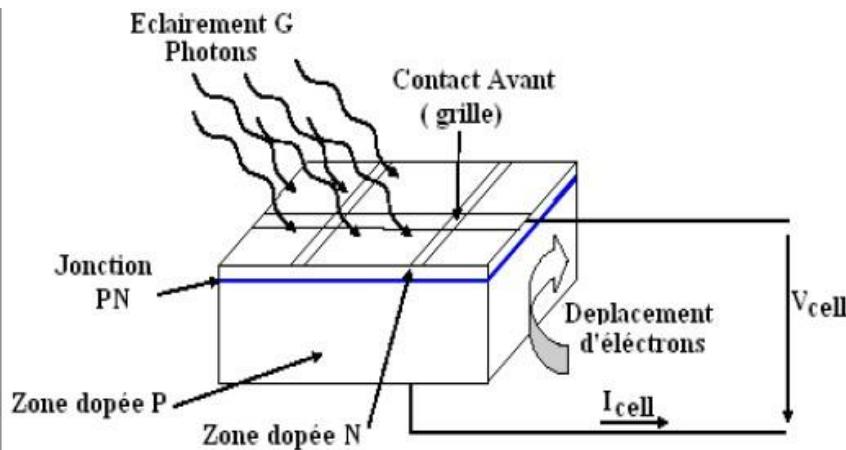


Figure I.6 : Le principe de fonctionnement d'une cellule solaire [25].

I.3.3 Le module photovoltaïque

Pour accroître la tension d'utilisation, les cellules photovoltaïques sont connectées en série. La tension nominale du module est généralement ajustée en fonction de la charge, avec des modules comportant habituellement 36 cellules. Étant donné leur sensibilité aux dommages et à la corrosion, ces cellules nécessitent une protection efficace contre l'environnement. Elles sont donc encapsulées sous une couche de verre ou un composé plastique. L'ensemble ainsi formé constitue ce que l'on appelle un module photovoltaïque [26].

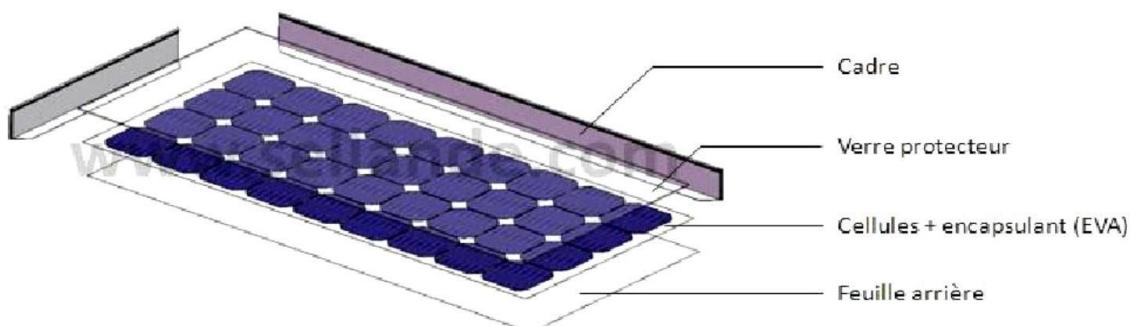


Figure I.7 : Représentation d'un module photovoltaïque [27].

Les modules peuvent également être connectés en série et en parallèle afin d'augmenter la tension et l'intensité d'utilisation. Toutefois, il importe de prendre quelques précautions car l'existence de cellules moins efficaces ou l'occlusion d'une ou plusieurs cellules (dues à de l'ombrage, de la poussière, etc.) peuvent endommager les cellules de façon permanente [28].

I.3.3.1 Les fonctions des modules photovoltaïques

- Protection des cellules contre les agents atmosphériques.

- Protection mécanique et support.
- connexion électrique entre cellules et avec l'extérieur. [29]



Figure I. 8 : les différents types de module photovoltaïque [30].

I.3.4 Le panneau photovoltaïque

Un panneau solaire, aussi appelé champ solaire, est constitué de modules photovoltaïques connectés en série ou en parallèle afin d'atteindre la puissance nécessaire. Ces modules sont installés sur une armature métallique qui assure leur maintien et leur inclinaison optimale pour capter le rayonnement solaire.[31]

Chaque panneau peut comporter plusieurs sorties correspondant au nombre de modules, ce qui rend indispensable l'utilisation d'une boîte de dérivation figure (I.9). Cette boîte, fixée à la structure du montage, permet d'établir les connexions entre les modules et d'optimiser la puissance en sortie, garantissant ainsi un fonctionnement efficace du système photovoltaïque. [32]



Figure I. 9 : Boîte de dérivation [33].

I.3.5 Système photovoltaïque

Un système PV est un ensemble complet d'équipement PV pour transformer la lumière du soleil en électricité, généralement il se compose de cinq éléments principaux :

le générateur PV, la batterie, le régulateur, le convertisseur et la charge [34].

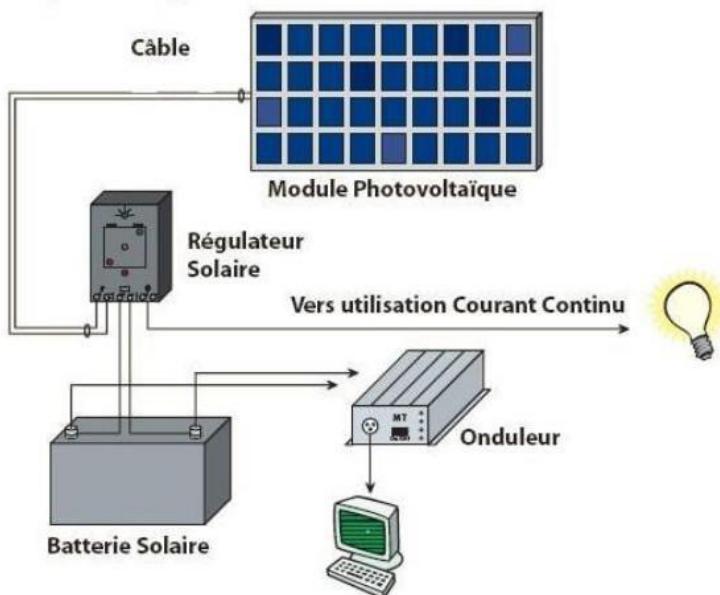


Figure I. 10 : Les constitutions d'un système PV [34].

Grâce au principe photovoltaïque, les panneaux solaires convertissent l'énergie solaire en courant continu (CC), utilisable directement ou transformé en courant alternatif (CA) via un onduleur. Lorsque la production dépasse la consommation, l'excédent d'énergie est stocké dans des accumulateurs (batteries). Le régulateur joue un rôle essentiel en contrôlant la charge et la décharge des batteries, assurant ainsi un équilibre optimal entre la production, la consommation et le stockage de l'électricité [34].

I.3.6 Générateur photovoltaïque

Les cellules solaires sont généralement connectées en série et en parallèle, puis encapsulées sous une couche de verre pour former un module photovoltaïque. Un générateur photovoltaïque (PV) est composé de plusieurs modules interconnectés, constituant une unité capable de produire une puissance continue élevée adaptée aux équipements électriques courants.

Les modules photovoltaïques sont habituellement assemblés en série-parallèle afin d'optimiser la tension et l'intensité du courant en sortie. Ces modules sont ensuite fixés sur des structures métalliques et orientés selon un angle spécifique, déterminé en fonction de

l'emplacement géographique, afin de maximiser l'exposition au rayonnement solaire. L'ensemble de ces modules interconnectés est souvent appelé champ de modules [35].

I.4 Batteries solaires

Les batteries solaires sont conçues pour stocker l'énergie produite par les panneaux photovoltaïques, garantissant ainsi une alimentation électrique continue, quelles que soient les conditions (jour, nuit, ciel dégagé ou couvert). Elles fonctionnent selon le principe de la décharge lente et sont spécifiquement adaptées aux systèmes solaires et éoliens.

Comme toutes les batteries, elles stockent l'énergie sous forme chimique grâce à des réactions internes qui permettent d'accumuler et de restituer l'électricité au moment opportun. Toutefois, leur usage diffère des batteries classiques, impliquant des technologies adaptées à leur cycle de charge et décharge. Par exemple, contrairement aux batteries de voiture qui sont sollicitées principalement au démarrage et se rechargent rapidement, les batteries solaires libèrent leur énergie progressivement sur de longues périodes et peuvent parfois être rechargées plusieurs jours après leur utilisation.[36]

I.5 Les régulateurs

I.5.1 Le rôle d'un régulateur dans un système photovoltaïque

Le régulateur de charge, aussi appelé contrôleur, joue un rôle essentiel dans la gestion de la batterie en régulant sa charge et en limitant sa décharge. Il applique plusieurs seuils de protection, adaptés à différents risques tels que la surcharge, la décharge profonde, les variations de température, les courts-circuits et les inversions de polarité. Ces fonctions sont cruciales, car elles influencent directement la durée de vie et la performance de la batterie.[37].

I.5.2 Les types des régulateurs de charge

Deux types de régulateurs de charge sont disponibles :

- Le régulateur de charge solaire avec technologie PWM.
- Le régulateur de charge solaire avec technologie

I.5.3 Choix d'un régulateur solaire

Le choix d'un régulateur solaire repose sur deux critères essentiels :

- L'intensité maximale supportée : Le courant admissible par les circuits d'entrée et de sortie du régulateur doit être supérieur à l'intensité générée par les panneaux solaires.[38]
- La tension nominale : Elle doit correspondre à la tension entre les panneaux et la batterie photovoltaïque, généralement fixée à 12 V, 24 V ou 48 V selon l'installation.

Ces paramètres garantissent un fonctionnement efficace et une meilleure gestion de l'énergie produite.

I.6 Système de conversion

Un convertisseur d'énergie est un dispositif placé soit entre le champ photovoltaïque (PV) et la charge pour un fonctionnement en continu sans stockage, où il est appelé convertisseur continu-continu, soit entre la batterie et la charge, auquel cas il prend le nom d'onduleur ou convertisseur continu-alternatif.

L'onduleur est généralement associé à un redresseur, chargé de transformer le courant alternatif en courant continu. Ce redresseur joue un rôle essentiel, car il permet de recharger les batteries et d'alimenter le circuit continu de l'installation lors de périodes prolongées sans ensoleillement [39].

I.6.1 Le convertisseur continu-continu

Un convertisseur DC-DC, aussi appelé hacheur, est un dispositif électrique conçu pour transformer une tension continue fixe en une tension continue ajustable. Il est composé d'un condensateur, d'une inductance et d'un interrupteur, qui peut être un transistor pour les faibles puissances ou un thyristor pour les puissances élevées.

Son rôle principal est d'optimiser le fonctionnement des modules en les maintenant à leur point de puissance maximale, indépendamment des variations d'éclairement et de température, afin de fournir une énergie optimale à l'utilisateur. Ce convertisseur permet ainsi de gérer efficacement la puissance électrique dans les circuits fonctionnant en courant continu, offrant une grande flexibilité et un rendement élevé [40].

I.7 Les types d'installations photovoltaïques

I.7.1 Les installations sur site isolé

Ce type d'installation convient aux systèmes autonomes, ne pouvant être connectés au réseau électrique. L'énergie produite doit être utilisée immédiatement ou stockée dans des accumulateurs afin de couvrir l'ensemble des besoins. Les panneaux photovoltaïques génèrent de l'électricité sous forme de courant continu, qui peut être consommé directement ou transformé en courant alternatif selon les exigences de l'installation (voir figure I.11) [41].

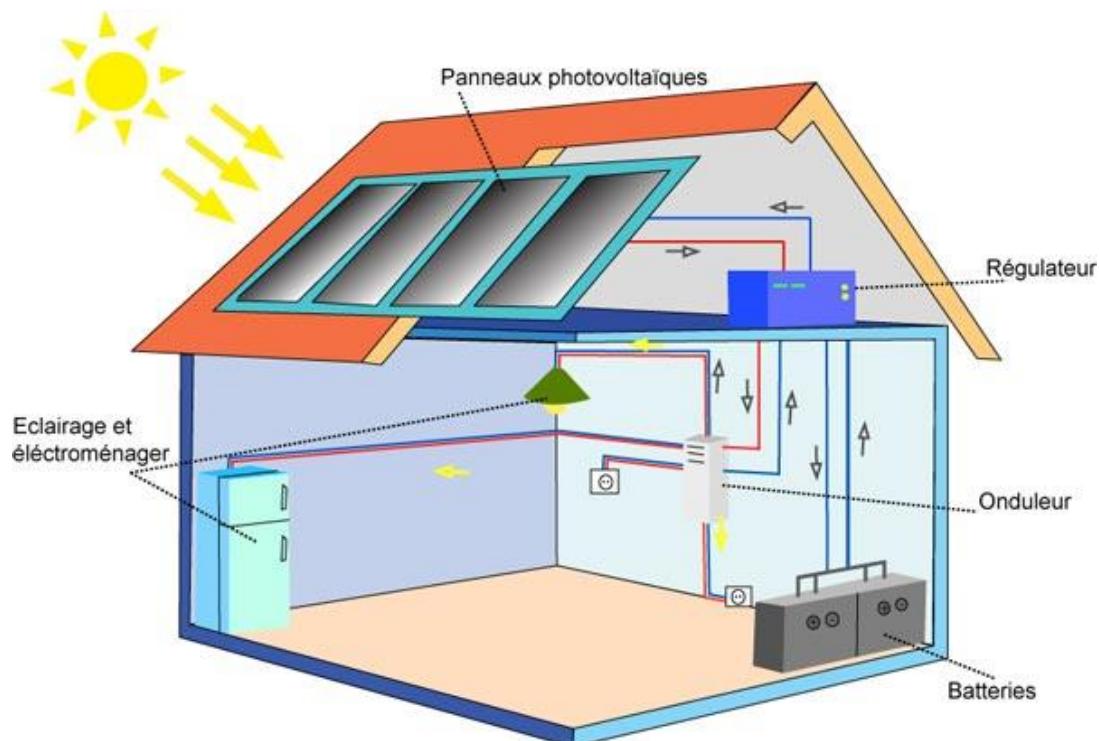


Figure I.11: Installation sur site isolé.

Le régulateur ajuste la charge et la décharge de la batterie en fonction de sa capacité, garantissant ainsi sa protection et son efficacité. L'onduleur convertit le courant continu en courant alternatif, permettant d'alimenter les appareils fonctionnant en AC. Les batteries emmagasinent l'énergie produite durant la journée afin d'assurer l'alimentation électrique pendant la nuit ou en cas de conditions météorologiques défavorables. Par ailleurs, certains récepteurs spécifiquement conçus pour fonctionner en courant continu (DC) sont disponibles, offrant une consommation optimisée et une meilleure efficacité énergétique (voir figure I.12) [42].

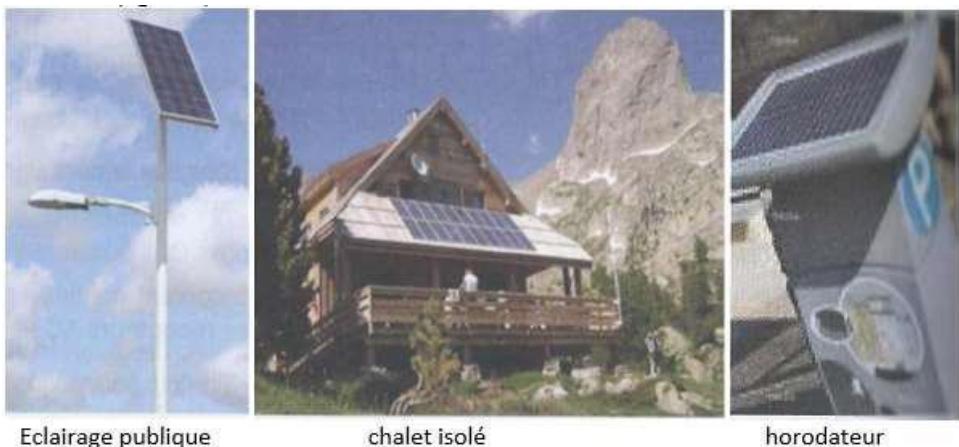


Figure I.12 : Exemple des installations photovoltaïques.

I.7.2 Les installations raccordées au réseau de distribution public

- Dans une solution à injection totale, l'intégralité de l'énergie produite par les panneaux photovoltaïques est revendue au réseau de distribution. Ce dispositif repose sur deux points de raccordement :
 - Raccordement du consommateur : Il reste inchangé avec un compteur classique, empêchant toute autoconsommation.
 - Nouveau branchement dédié à l'injection : Il permet d'acheminer toute la production vers le réseau et comprend deux compteurs distincts :
 - Un compteur mesurant la production totale.
 - Un compteur vérifiant l'absence de consommation frauduleuse.(Voir figure I.13) [43].



Figure I. 13: L'injection d'énergie dans les réseaux.

En bleu : énergie électrique continue (DC).

En rouge : énergie électrique alternative (AC)



Figure I.14: Injection d'énergie.

I.7.2.1 Solution avec injection de surplus

Dans cette solution, le système photovoltaïque est directement relié au réseau public en un seul point. L'utilisateur utilise en priorité l'énergie qu'il produit, et l'excédent est injecté dans le réseau. En cas de production insuffisante, le réseau compense le déficit en fournissant l'énergie nécessaire. Cette configuration nécessite l'ajout d'un seul compteur supplémentaire au compteur existant, permettant de mesurer l'énergie injectée et soutirée, assurant ainsi une gestion optimisée de la consommation et de la production (voir figure I.15) [44].



Figure I.15 : Injection d'énergie supplément dans le réseau.

En bleu : énergie électrique continue (DC).

En rouge : énergie électrique alternative (AC).

I.8 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons fait des descriptions générales sur l'énergie photovoltaïque, tous les éléments ont été introduit (cellule, module, panneau, champ PV), ainsi une présentation des constituons du système photovoltaïque afin de permettre une bonne compréhension du fonctionnement des systèmes PV.

CHAPITRE II

(Modélisation du système global)

II.1 Introduction

Face à la croissance des besoins énergétiques et aux enjeux environnementaux, les systèmes photovoltaïques s'imposent comme une solution durable pour la production d'électricité. Cependant, la nature intermittente et variable de l'énergie solaire exige une gestion intelligente de la conversion, du stockage et de la distribution de l'énergie. Dans cette optique, l'intégration de convertisseurs DC/DC et de systèmes de stockage, notamment par batteries, permet d'optimiser le rendement global et d'assurer une alimentation stable.

Ce chapitre s'inscrit dans cette démarche en présentant les fondements nécessaires à la compréhension d'un système photovoltaïque complet, il s'appuie sur des outils de simulation avancés comme MATLAB/Simulink pour modéliser les différentes composantes, et analyser leurs interactions dans des conditions réalistes.

II.2 Modélisation du système photovoltaïque

II.2.1 Modélisation d'une cellule photovoltaïque

Le modèle à une diode inclut une source de courant représentant la conversion de la lumière en électricité, une résistance série modélisant la résistance de contact des grilles collectrices ainsi que la résistivité du matériau, et une résistance parallèle qui traduit les courants de fuite à travers la jonction.

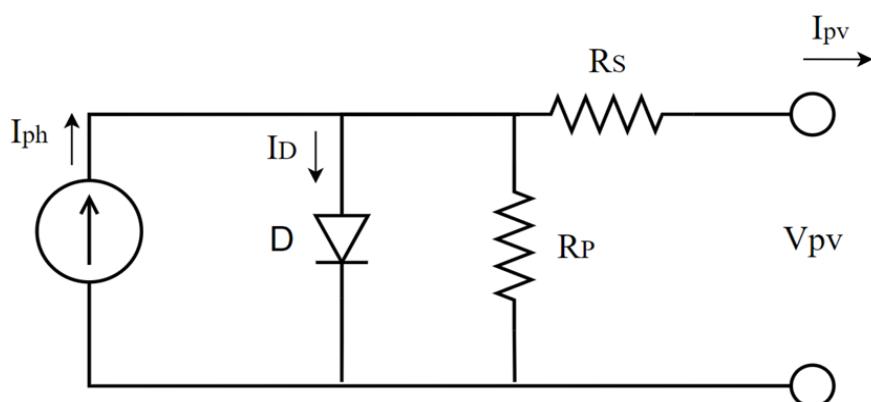


Figure II. 1 Schéma d'une cellule photovoltaïque à une diode.

Le courant engendré par la cellule photovoltaïque est donné par la loi des mailles :

Avec :

Avec I_s étant le courant de saturation, il est donné par :

Sachant que :

P_1, P_2, P_3, P_4 : qui sont des paramètres constants, E_{sref}, T_{jref} : qui représentent l'ensoleillement et la température sous conditions STC, N_s : nombre de cellules en série dans un module, q : la charge d'électron $1,6 \cdot 10^{-19}$ C, K : constante de Boltzmann $1,38 \cdot 10^{-23}$ J/K, E_G : énergie de gap $1,76 \cdot 10^{-19}$, A : facteur d'idéalité de la diode.

II.2.2 Modélisation d'un panneau photovoltaïque

Dans notre cas, nous allons effectuer la modélisation d'un panneau photovoltaïque de la marque Suntech, modèle « STP080S-12/Bb », en se basant sur ses caractéristiques fournies sous conditions standards (irradiance de 1000 W/m^2 et température de cellule de 25°C) :

Grandeur	Symbole	Valeur
Puissance Maximale	P_{max}	259.4 W
Tension Maximale	V_{max}	31.6V
Courant Maximale	I_{max}	7.2 A
Courant de court-circuit	I_{cc}	8.21 A
Tension de circuit ouvert	V_{co}	38.6 V
Coefficient de la température de la tension	α	-0,35%/ $^{\circ}$ C
Coefficient de la température de la puissance	β	-0,07%/ $^{\circ}$ C

Tableau II. 1 : Les caractéristiques du panneau photovoltaïque de la marque Suntech, modèle « STP080S-12/Bb »

II.2.3 Simulation du Panneau Photovoltaïque

Pour pouvoir étudier les caractéristiques du panneau utilisé, on modélise notre panneau avec Matlab :

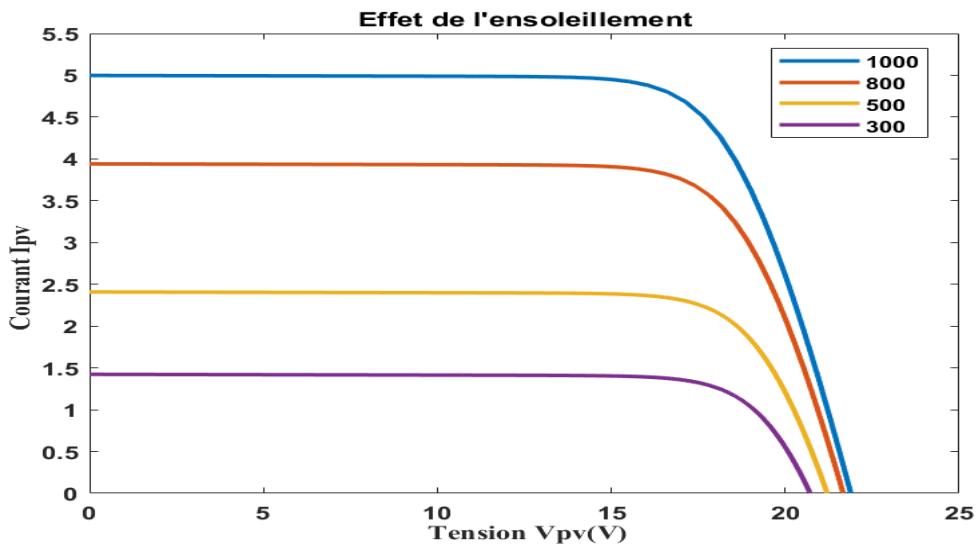


Figure II. 2 : Les caractéristiques Courant-Tension I-V avec variation d'ensoleillement

On observe que le courant de court-circuit augmente proportionnellement à l'intensité de l'ensoleillement.

En revanche, la tension en circuit ouvert demeure presque constante, même en cas de faible éclairement.

La figure (II.3) présente un exemple de la caractéristique courant/tension pour différentes températures d fonctionnement.

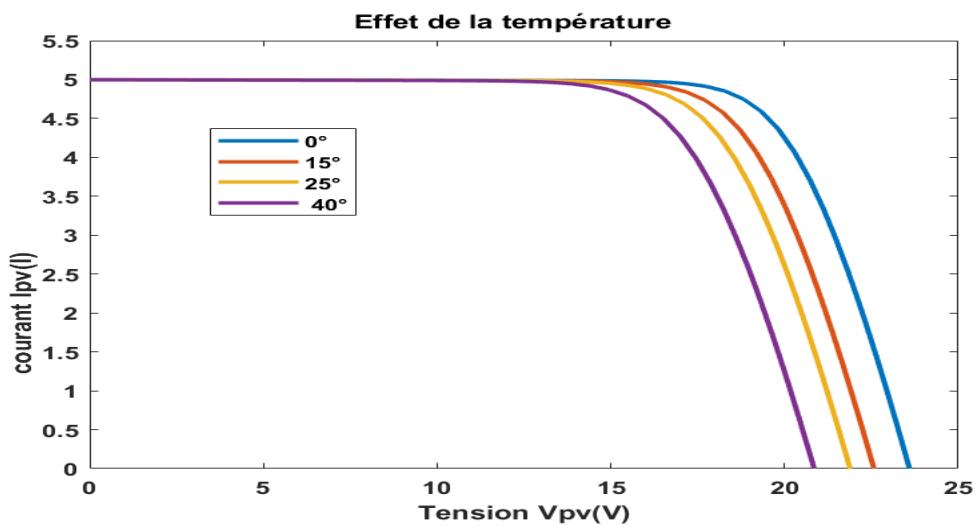


Figure II. 3 : Les caractéristiques courant/tension I-V pour différentes températures.

Il est constaté que la température a un impact limité sur le courant de court-circuit d'un système photovoltaïque. En revanche, la tension en circuit ouvert diminue sensiblement avec l'augmentation de la température, entraînant une baisse de la puissance disponible. Ainsi, lors

de la conception d'une installation, il est crucial de prendre en compte les variations thermiques du site afin d'optimiser les performances du système

Afin d'obtenir la caractéristique puissance-tension du panneau, des simulations ont été réalisées en faisant varier l'ensoleillement et la température. Les figures ci-dessous présentent les résultats obtenus : d'une part, pour une température constante ($T_a = 25^\circ\text{C}$) avec une variation de l'ensoleillement, et d'autre part, pour un ensoleillement constant ($E_s = 1000 \text{ W/m}^2$) avec une variation de la température.

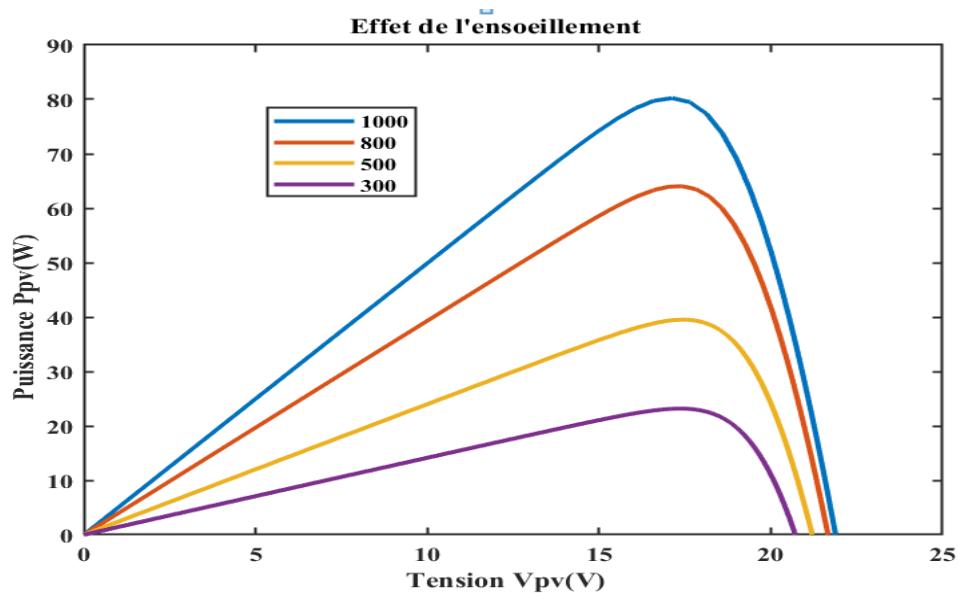


Figure II. 4 : Différentes allures de puissance/tension pour température constante et ensoleillements variables.

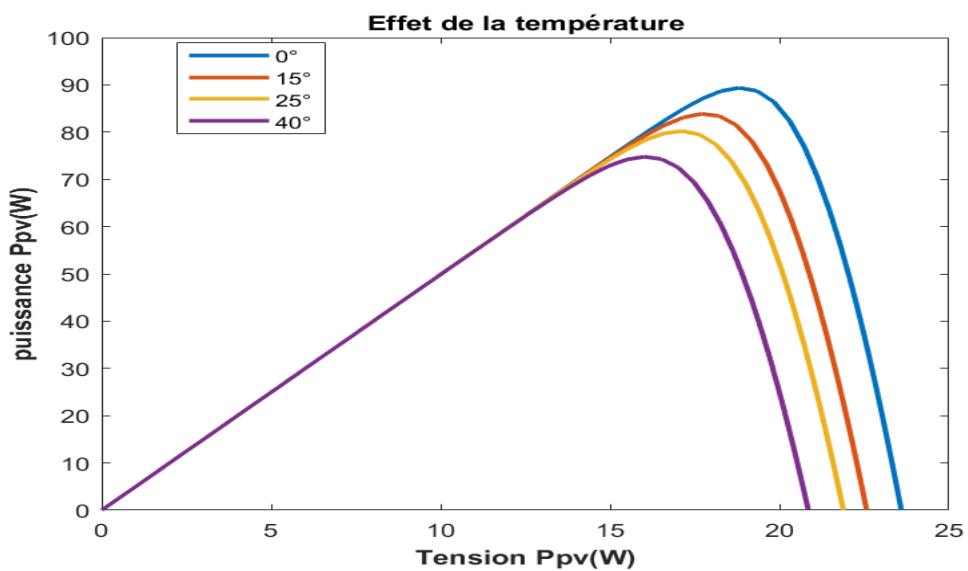


Figure II. 5 : Différentes allures de puissance/tension pour ensoleillement constant et températures variables.

II.3 Les convertisseurs DC/DC

Les convertisseurs DC/DC jouent un rôle crucial dans les systèmes photovoltaïques pour plusieurs raisons importantes comme peut le montrer la figure suivante :

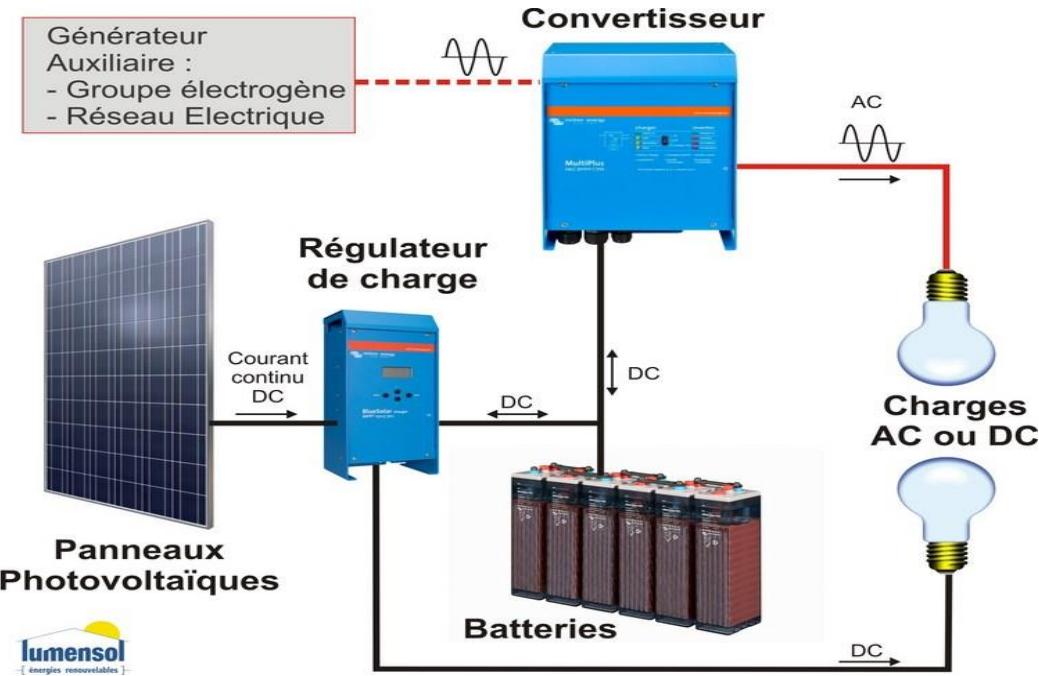


Figure II. 6: Rôle d'un convertisseur DC/DC dans un système photovoltaïque.

- Optimisation de la performance du système : les convertisseurs DC/DC intègrent généralement la technologie MPPT (Maximum Power Point Tracking), qui optimise en permanence le point de fonctionnement du système afin d'extraire la puissance maximale des panneaux solaires. Cette régulation améliore l'efficacité énergétique globale et permet d'augmenter la production d'électricité.
- Adaptation des niveaux de tension : les convertisseurs DC/DC permettent de transformer la tension variable et souvent non idéale générée par les panneaux solaires en une tension stable et adaptée aux besoins du système, qu'il s'agisse de charger des batteries ou de fournir de l'énergie à un onduleur pour la conversion en courant alternatif
- Stabilité et régulation : ils permettent de maintenir une tension de sortie stable, malgré les fluctuations de l'ensoleillement, assurant ainsi une alimentation électrique constante et fiable pour l'ensemble des composants du système photovoltaïque.
- Amélioration de l'efficacité globale : les convertisseurs DC/DC de haute performance réduisent au minimum les pertes liées à la conversion d'énergie, ce qui améliore

l'efficacité globale du système photovoltaïque. Grâce à l'intégration de technologies avancées, ces convertisseurs peuvent atteindre des rendements supérieurs à 95 %.

- Flexibilité de conception : ils offrent la possibilité d'intégrer des composants aux caractéristiques électriques variées — tels que des panneaux solaires présentant des tensions de sortie différentes — au sein d'un même système, ce qui confère une grande flexibilité en matière de conception et d'évolution du système photovoltaïque.
- Protection des composants : les convertisseurs DC/DC jouent un rôle essentiel dans la protection des composants sensibles du système, tels que les batteries et les onduleurs, en atténuant les surtensions et les fluctuations soudaines de tension. Cela contribue à prolonger leur durée de vie et à réduire les risques de défaillance.
- Compatibilité avec le stockage d'énergie : dans les systèmes photovoltaïques hybrides ou autonomes, les convertisseurs DC/DC jouent un rôle clé dans la gestion optimisée des cycles de charge et de décharge des batteries, permettant une utilisation efficace de l'énergie stockée.
- Intégration avec d'autres sources d'énergie : ils facilitent l'intégration de sources d'énergie complémentaires, telles que l'éolien ou les groupes électrogènes diesel, en assurant la conversion et la régulation appropriées des différentes tensions de sortie. Cela permet une gestion intelligente et optimale de l'ensemble du flux énergétique.

II.3.1 Types des convertisseurs DC/DC

Les hacheurs, qui sont des convertisseurs dédiés à la modulation de l'énergie en courant continu, permettent de réguler la tension appliquée à une charge ou le courant qui la traverse [45]. Installés entre un générateur et un récepteur, tous deux fonctionnant en courant continu, ils assurent un contrôle précis de l'énergie transférée. On distingue principalement deux types de hacheurs :

- Hacheur parallèle « Boost » : Un convertisseur Boost ou hacheur parallèle, sert à convertir une tension continue à une autre tension continue de plus forte valeur. Il est basé sur deux interrupteurs, un commandé et l'autre à commutation naturelle qui fonctionnent en complémentarité durant une période, un filtre LC et une résistance prise comme une charge. Comme précédemment expliqué, l'interrupteur T est commandé par un signal à modulation de largeur d'impulsion de période de découpage fixe et de rapport cyclique variable α qui permet d'ajuster la quantité d'énergie délivrée à la charge et donc d'imposer une nouvelle tension U' [46].

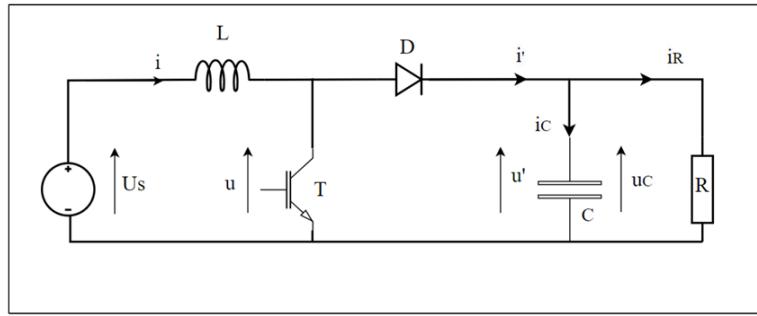


Figure II. 7: Schéma électrique d'un convertisseur BOOST.

Le fonctionnement d'un convertisseur Boost se décompose en deux phases distinctes, en fonction de l'état de l'interrupteur (T) :

Phase active : Lorsque l'interrupteur est fermé pendant l'intervalle $[0, \alpha T]$, le courant dans l'inductance augmente progressivement, ce qui permet de stocker une certaine quantité d'énergie sous forme magnétique. Pendant cette phase, la diode est bloquée, ce qui déconnecte la charge de l'alimentation.

À l'instant $t=0$, on ferme l'interrupteur pendant une durée $[\alpha T]$. La tension aux bornes de la diode D est égale à $(UD = UL - UC)$. Comme l'interrupteur est fermé, on a $U = 0$, ce qui implique $(UD = -US)$. La diode est donc bloquée puisque $US > 0$. Dans ces conditions, On obtient alors le schéma équivalent de la figure ci-dessous [47]:

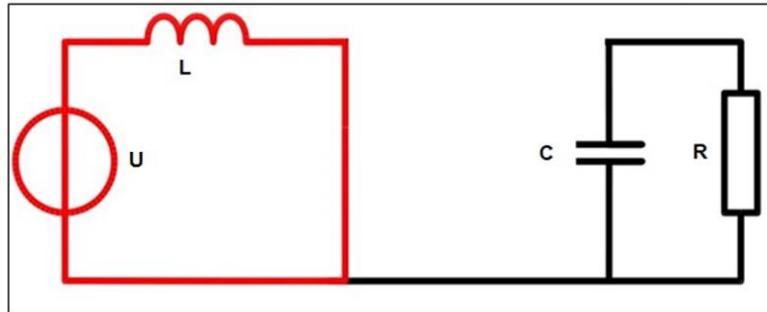


Figure II. 8: Schéma équivalent du hacheur boost pendant la phase active.

Phase de roue libre : Lorsque (T) est ouvert au cours de l'intervalle $[\alpha T, T]$, l'inductance se trouve en série avec la source et son énergie accumulée dans la phase 1 s'additionne à celle de la source (effet survoltage), Le courant traversant l'inductance traverse ensuite la diode, le condensateur et la charge. Il en résulte un transfert de l'énergie accumulée dans l'inductance vers la capacité.

À l'instant $t = \alpha T$, on ouvre l'interrupteur pendant une durée $[(1 - \alpha T)]$. Pour assurer la continuité du courant, la diode D entre en conduction. On obtient alors le schéma équivalent de la figure ci-dessous [48]:

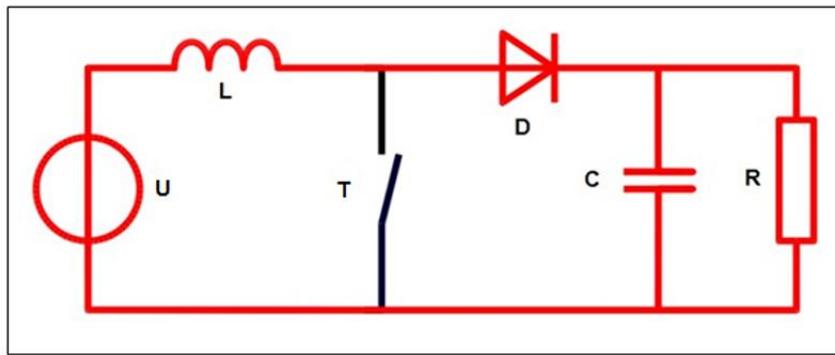


Figure II. 9 : Schéma équivalent du hacheur boost pendant la phase de roue libre.

La figure (I.9) illustre la forme du signal de commande appliquée à l'interrupteur. Il s'agit d'un signal rectangulaire de fréquence fixe f , dont la durée à l'état haut, appelée temps de conduction T_{on} , est réglée par le paramètre α . Ce paramètre, nommé rapport cyclique, est défini comme le rapport entre la durée de conduction de l'interrupteur et la période totale de découpage T de ce signal.[49]

On a :

Ou T_{off} correspond à la durée de blocage de l'interrupteur.

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

Durée de conduction :

Durée de blocage :

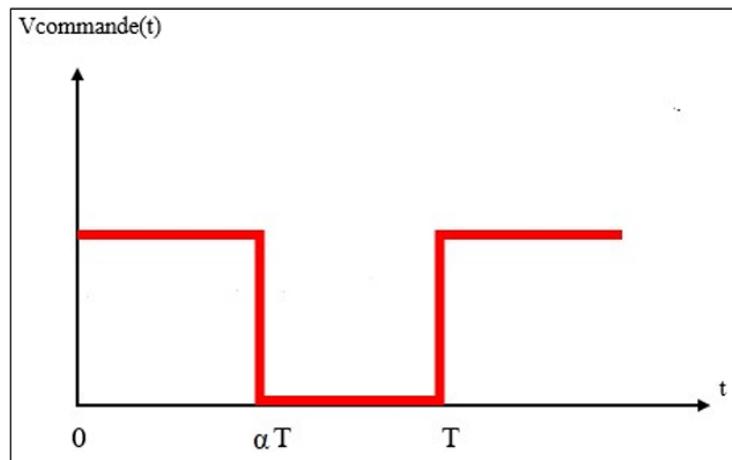


Figure II. 10 : Signal de commande de l'interrupteur

On obtient les équations suivantes :

Pour $0 < t < \alpha T$ (Phase active)

L'interrupteur T conduit :

$$i' = 0,$$

$$i_c = \frac{U_c}{R}$$

$$U = 0,$$

$$L \frac{di}{dt} = U_c.$$

Pour $\alpha T < t < T$ (Phase de roue libre)

La diode D conduit :

$$i' = i,$$

$$i_c = i - \frac{U_c}{R},$$

$$U = U_c,$$

$$L \frac{di}{dt} = U_s - U_c.$$

L'augmentation du courant i pendant le premier intervalle étant égale à sa diminution pendant le second, la valeur moyenne de la tension est nulle aux bornes de L. On a :

$$U_s 2\pi\alpha + (U_s - U_c)(2\pi\alpha) = 0 \quad \dots \quad (\text{II.9})$$

Sachant que le rapport cyclique de fonctionnement α est défini par la fraction :

Le convertisseur Boost est couramment utilisé dans les systèmes photovoltaïques, notamment en association avec un suiveur du point de puissance maximale (MPPT). Son fonctionnement en mode de courant continu lui permet d'extraire un maximum d'énergie des cellules solaires, optimisant ainsi la conversion de puissance. Grâce à son rendement énergétique élevé, souvent supérieur à celui des autres hacheurs, il constitue une solution efficace pour la gestion de l'énergie solaire. L'un de ses avantages réside dans la présence de l'inductance (L), qui joue un rôle crucial en réduisant l'ondulation du courant d'entrée, garantissant ainsi une meilleure stabilité du système.

- **Hacheur réversible en courant (deux quadrants)** : Un convertisseur de type hacheur à deux quadrants associe un hacheur série à un hacheur parallèle. Cette configuration permet au courant d'être réversible, tout en maintenant une tension de sortie toujours positive. L'énergie peut ainsi circuler de la source de tension continue vers la charge lorsque le courant I_s est positif, et dans le sens inverse lorsque I_s devient négatif. L'alimentation, avec une tension ($U_E > 0$)
 - On doit donc autoriser un courant bidirectionnel.

Cela permet au courant I_t de prendre des valeurs positives ou négatives, évitant ainsi les phénomènes de conduction discontinue et les limitations liées à un courant unidirectionnel. Selon le sens du courant, c'est l'un ou l'autre des composants du convertisseur qui assure la conduction.[50]

Il s'agit de la structure classique d'un hacheur série, utilisant des interrupteurs réversibles en courant, adaptée à une charge modifiée. Si l'on considère une machine à courant continu (MCC) comme charge, celle-ci peut fonctionner aussi bien en moteur qu'en génératrice sous une tension constante. La structure correspondante est illustrée dans la figure suivante.

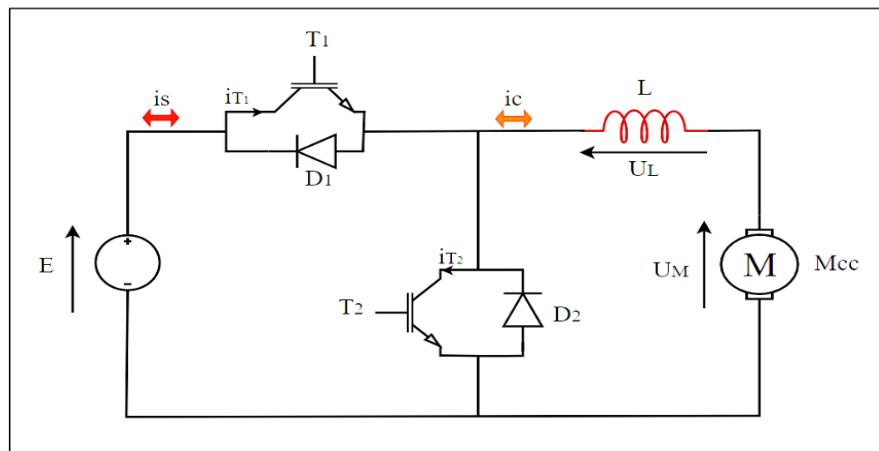


Figure II. 11 : Structure du hacheur série réversible en courant.

On effectue une commande complémentaire des interrupteurs électroniques de telle manière que l'on ait :

- T1 fermé ou D2 passante, et T2 ouvert et D1 bloquée, pendant $[\alpha T]$.
- T1 ouvert et D2 bloquée, et T2 fermé ou D1 passante, pendant $[(1 - \alpha) T]$.

On obtient alors les schémas équivalents suivants figures (II.11 et II.12).

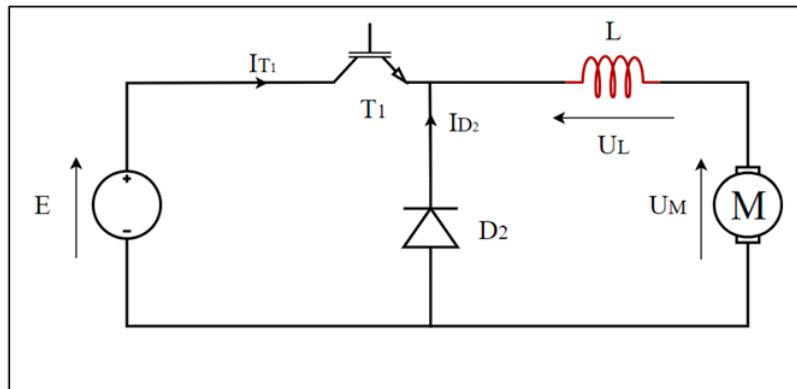


Figure II. 12: Principe de fonctionnement du hacheur réversible en courant (Phase 1).

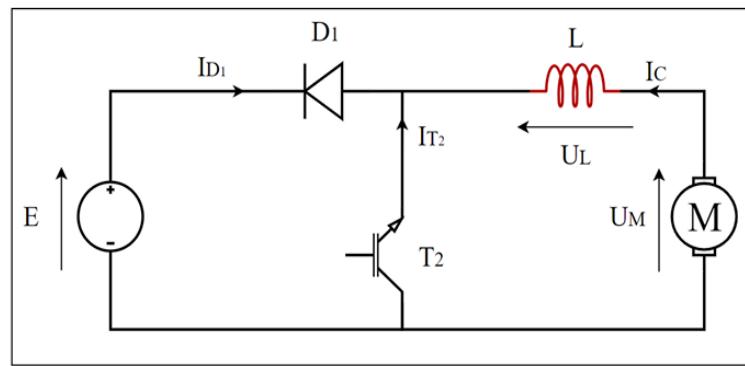


Figure II. 13: Principe de fonctionnement du hacheur réversible en courant (Phase 2).

- $0 \leq t < \alpha T$: T1 est fermé et T2 ouvert. On a : $U_C = E$ et $I_T = I_C$.
- $\alpha T \leq t \leq T$: T1 est ouvert et T2 fermé. On a : $U_C = 0$ et $I_T = 0$.

D'où :

$$U_{C \text{ moy}} = \alpha E \text{ et } I_{T \text{ moy}} = \alpha I_C$$

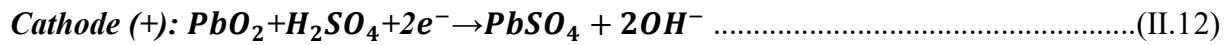
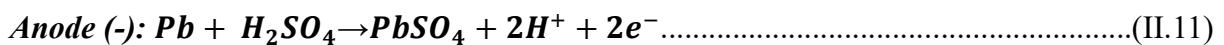
$$P_{E \text{ moy}} = E \times I_{T \text{ moy}} = E \times I_C = U_{C \text{ moy}} \times I_C = P_{C \text{ moy}}$$

II.4 La Batterie

Dans notre travail, on va utiliser la batterie à plomb acide, cette technologie est bien maîtrisée et présente l'avantage d'être quasiment entièrement recyclable. Elle se distingue par son coût de fabrication particulièrement bas, ce qui en fait une référence pour comparer les performances des autres types de batteries. Son fonctionnement repose sur une réaction d'oxydoréduction, permettant le stockage et la restitution de l'énergie électrique. La tension aux bornes d'un accumulateur au plomb est généralement proche de 2V, mais peut fluctuer entre 1,7V et 2,4V, selon son niveau de charge.

► Phase de décharge :

Lors de la phase de décharge, le plomb présent à l'anode subit une oxydation en perdant deux électrons, tandis qu'à la cathode, le plomb est réduit en captant deux électrons. Parallèlement, l'hydrogène généré à l'anode et l'oxygène produit à la cathode réagissent pour former de l'eau. Ces processus électrochimiques peuvent être décrits par les équations suivantes :



Lors de la décharge, les matériaux actifs — le dioxyde de plomb (PbO_2) à la cathode et le plomb (Pb) à l'anode — se transforment en sulfate de plomb ($PbSO_4$), ce qui s'accompagne d'une absorption d'acide sulfurique par l'électrolyte. La tension aux bornes de la batterie diminue progressivement au cours de la décharge, se maintenant autour de 2 V pendant une longue période d'utilisation. Toutefois, à partir d'un point critique, noté N, la tension chute rapidement pour atteindre environ 1,8 V. Une décharge trop profonde peut provoquer la formation de cristaux de sulfate de plomb de grande taille, ce qui entrave la circulation du courant et réduit durablement la capacité de la batterie.

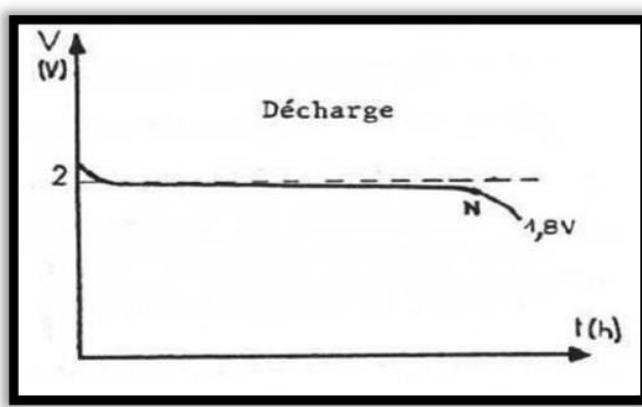
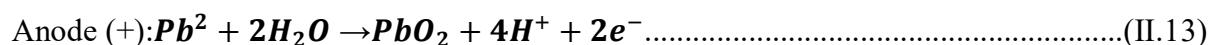


Figure II. 14: -A: Tension de décharge d'une batterie

Phase de charge :

Lors de la charge, les réactions inverses se produisent, car elles sont réversibles. L'eau est alors décomposée à chaque électrode :



Pendant la phase de charge, la batterie se comporte comme un récepteur. Sur le plan graphique, la tension à ses bornes atteint environ 2,2 V après une brève phase transitoire. En fin de charge, identifiée par le point M, la tension s'élève rapidement, signe que les plaques sont entièrement polarisées et ne parviennent plus à retenir les gaz dégagés — oxygène et hydrogène. La charge est considérée comme terminée lorsque la tension atteint une valeur comprise entre 2,6 V et 2,7 V, typiquement dans le cadre d'une charge cyclique. Une surcharge peut entraîner une perte d'eau par électrolyse, nécessitant un appoint, et causer des dommages irréversibles si les plaques ne sont plus totalement immergées.

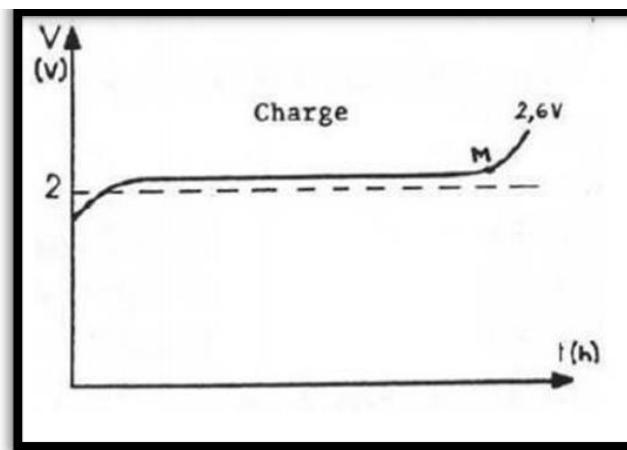


Figure II. 15: -B : Tension de charge d'une batterie

Le rendement faradique, représentant le rapport entre l'électricité débitée lors de la décharge et celle fournie pendant la charge, est généralement supérieur à 90% pour les batteries au plomb. Le rendement énergétique, le produit du rendement faradique par le rendement de tension, est d'environ 70 à 80%.

Le taux d'autodécharge correspond à la perte moyenne de capacité d'une batterie par mois, à une température donnée. Pour les batteries au plomb, il se situe généralement entre 3 % et 15 % par mois, et tend à augmenter avec l'âge de la batterie ainsi qu'avec la température ambiante.

La profondeur de décharge a une influence déterminante sur la durée de vie d'une batterie. Dans les applications solaires, cette profondeur dépasse rarement 40 %, ce qui explique pourquoi les accumulateurs sont souvent surdimensionnés afin d'en prolonger la longévité. En moyenne, la durée de vie des batteries au plomb est estimée entre 6 et 7 ans.

II.5 Commande MPPT

Le MPPT (Maximum Power Point Tracking) est une technique utilisée dans les systèmes photovoltaïques pour maximiser la puissance extraite des panneaux solaires. Il agit en ajustant la tension ou le courant pour que le panneau fonctionne toujours à son point de puissance maximale, qui varie avec l'ensoleillement et la température. Le MPPT commande un convertisseur DC/DC pour adapter dynamiquement le point de fonctionnement. L'algorithme le plus courant est le Perturbe and Observe (P&O), simple mais efficace. D'autres méthodes comme Incrémental Conductance sont plus précises. Le MPPT améliore considérablement le rendement énergétique. Il est indispensable dans tout système solaire moderne.

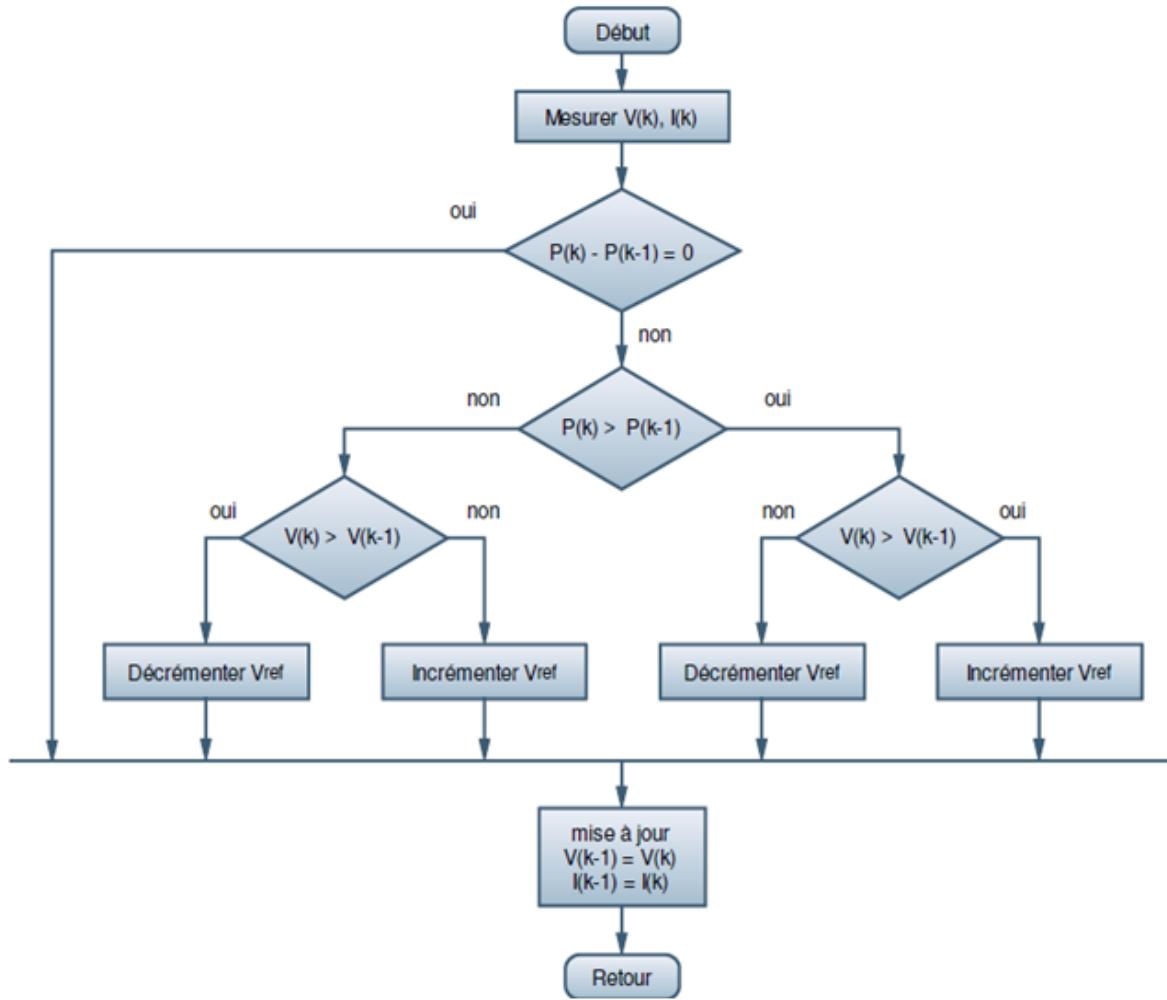


Figure II. 16: Organigramme de la MPPT P&O

II.6 Conclusion

Ce chapitre a permis de poser les bases théoriques et pratiques indispensables à la compréhension du fonctionnement d'un système photovoltaïque associé à des convertisseurs DC/DC et à un système de stockage par batterie. Nous avons d'abord modélisé et simulé le comportement d'un panneau photovoltaïque à l'aide de MATLAB/Simulink, en mettant en évidence l'influence des paramètres environnementaux tels que l'ensoleillement et la température sur ses performances.

La suite du chapitre a été consacrée à l'étude détaillée des convertisseurs DC/DC, notamment les hacheurs, dont le rôle est central dans la régulation et l'optimisation de la puissance délivrée par le panneau solaire. Nous avons comparé différentes structures, telles que les hacheurs Buck,

Boost, ainsi que les hacheurs réversibles en tension et en courant, en soulignant leurs principes de fonctionnement, leurs avantages, et leurs domaines d'application.

Enfin, l'analyse approfondie des batteries au plomb a mis en lumière leurs caractéristiques électrochimiques, les phénomènes liés à la charge et à la décharge, ainsi que les facteurs influençant leur durée de vie et leur efficacité énergétique. Cette compréhension est essentielle pour dimensionner correctement un système de stockage et garantir sa fiabilité à long terme dans une application photovoltaïque.

Ce socle de connaissances nous permettra d'aborder, dans les chapitres suivants, la conception et le pilotage d'un système hybride optimisé.

CHAPITRE III

(Simulation du système global)

III. 1 Introduction

Ce chapitre présente un système de gestion d'énergie solaire basé sur un bus DC. Il intègre trois éléments essentiels : un panneau photovoltaïque, une batterie de stockage, et une charge. L'objectif est d'assurer une alimentation continue de la charge en maximisant l'exploitation de l'énergie solaire.

Le système utilise un convertisseur Boost piloté par une commande MPPT pour extraire la puissance maximale du panneau, quelles que soient les conditions d'ensoleillement. Un convertisseur bidirectionnel relie la batterie au bus DC, permettant à celle-ci de se charger ou de se décharger selon les besoins énergétiques du moment.

Deux modes de fonctionnement sont analysés : l'un où la batterie compense un déficit de production solaire, l'autre où elle stocke l'excédent. Des simulations sous MATLAB permettent d'observer le comportement dynamique du système, valider son efficacité et sa capacité à maintenir une alimentation stable de la charge.

III.2 Système globale

Le schéma présenté représente un système de gestion d'énergie solaire basé sur un bus DC. Il intègre trois éléments principaux : une source photovoltaïque, une batterie de stockage et une charge. L'objectif est d'assurer une alimentation continue de la charge, en exploitant efficacement l'énergie solaire et en optimisant l'usage de la batterie :

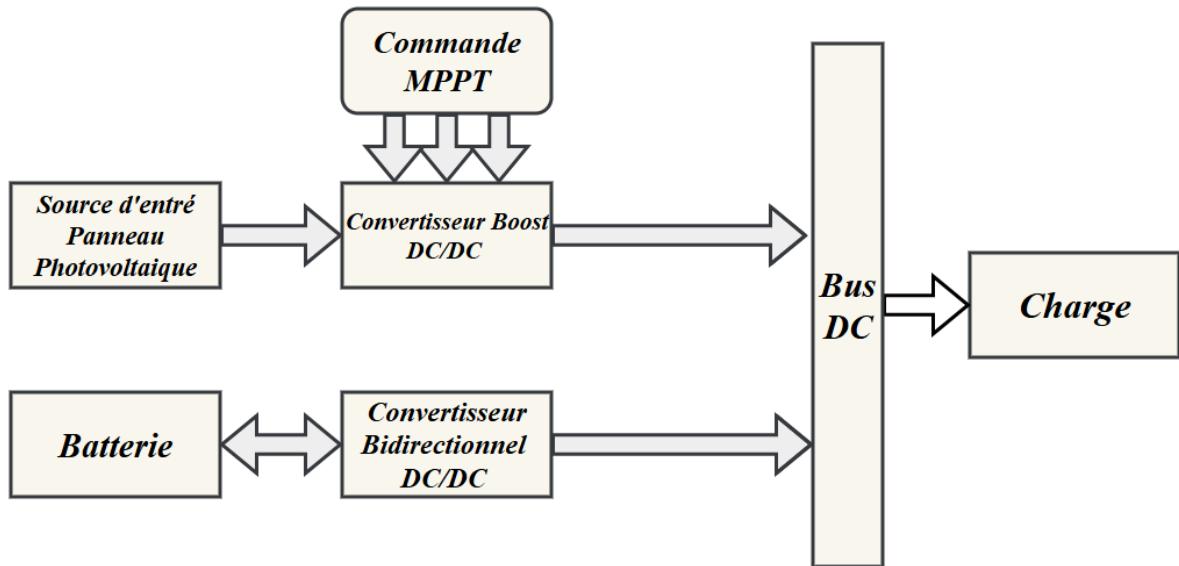


Figure III. 1 : Schéma synoptique du système global

III.3 PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT

L'énergie issue du panneau photovoltaïque est dirigée vers un convertisseur Boost DC/DC, piloté par une commande MPPT (Maximum Power Point Tracking). Ce système ajuste en temps réel le point de fonctionnement du panneau afin d'extraire la puissance maximale, quelles que soient les conditions d'ensoleillement. Le convertisseur élève ensuite la tension pour l'adapter au niveau du bus DC.

Le bus DC constitue l'élément central du système : il relie la source de production (le panneau solaire), la batterie de stockage (via un convertisseur bidirectionnel DC/DC), et la charge finale. La charge est alimentée directement par le bus, selon les besoins énergétiques du moment.

La batterie joue un rôle tampon : elle se charge (mode buck) lorsque la production solaire est excédentaire, et se décharge (mode boost) pour fournir de l'énergie à la charge lorsque la production est insuffisante ou nulle (comme la nuit ou par temps couvert). Le convertisseur bidirectionnel assure cette transition de manière automatique et sécurisée.

Mode 01	$P_{ch} > P_{pv}$	$P_{Batt} < 0$	$P_{ch} = P_{pv} + P_{Batt}$
Mode 02	$P_{ch} < P_{pv}$	$P_{Batt} > 0$	$P_{Batt} = P_{pv} - P_{ch}$

Tableau III. 1 : Les modes de fonctionnement de notre système

III.3.1 Mode 01

Dans ce mode, la puissance demandée par la charge (P_{ch}) est supérieure à la puissance fournie par le panneau photovoltaïque (P_{pv}). Pour combler ce manque, la batterie intervient et se décharge ($P_{Batt} < 0$), fournissant ainsi l'énergie nécessaire pour que la charge soit correctement alimentée. L'équation associée est : $P_{ch} = P_{pv} + P_{Batt}$ Cela signifie que la charge reçoit à la fois l'énergie produite par le panneau solaire et celle restituée par la batterie.

III.3.2 Mode 02

Dans ce mode, la puissance fournie par le panneau photovoltaïque (P_{pv}) est supérieure à la puissance demandée par la charge (P_{ch}). L'excédent d'énergie est alors utilisé pour charger la batterie ($P_{Batt} > 0$). L'équation correspondante est $P_{Batt} = P_{pv} - P_{ch}$ Cela signifie que toute l'énergie produite en trop par rapport à la demande est stockée dans la batterie pour une utilisation ultérieure.

III .4 Simulations et Résultats

Nous avons utilisé Matlab pour simuler le fonctionnement de notre système photovoltaïque basé sur un convertisseur Boost DC/DC piloté par une commande MPPT. Cette approche permet d'optimiser en temps réel la puissance extraite du panneau solaire, puis d'adapter la tension au niveau du bus DC. Le bus centralise la gestion énergétique entre la source solaire, la batterie de stockage (via un convertisseur bidirectionnel) et la charge finale.

III.4.1 Panneau Photovoltaïque

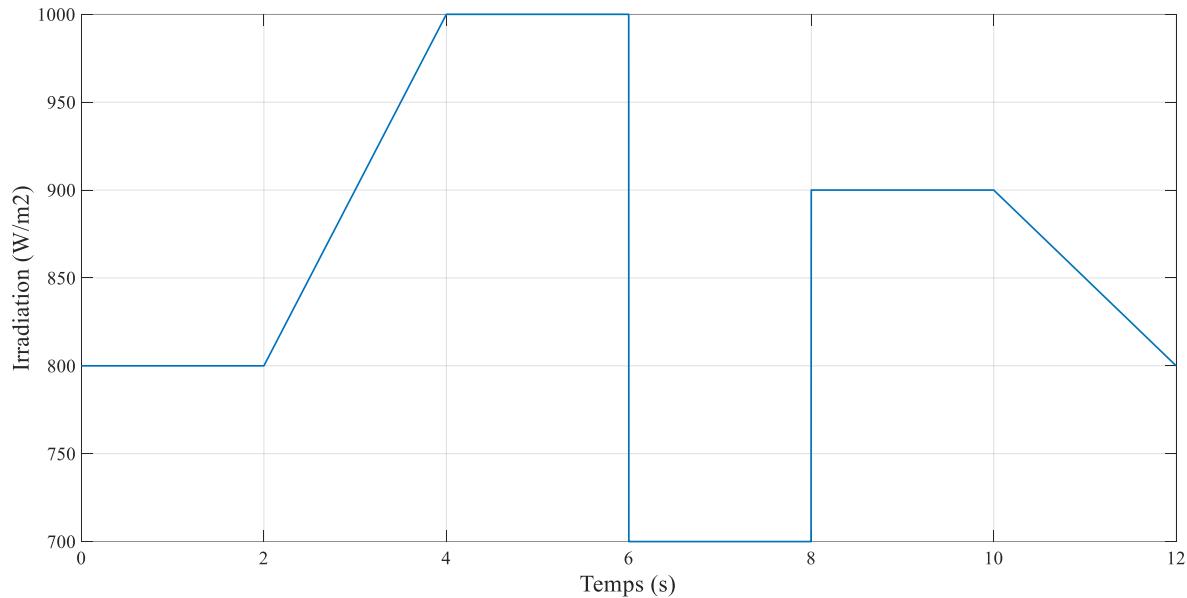


Figure III. 2 Profil d'irradiation solaire (W/m^2) en fonction du temps

Cette figure illustre la variation de l'irradiation solaire (en W/m^2) en fonction du temps, reflétant les changements naturels d'ensoleillement au cours d'une journée. Les données montrent une décroissance progressive de **850 W/m^2** à **700 W/m^2** , ce qui correspond typiquement à la baisse de luminosité en fin de matinée ou en début d'après-midi, ou bien à un passage nuageux temporaire.

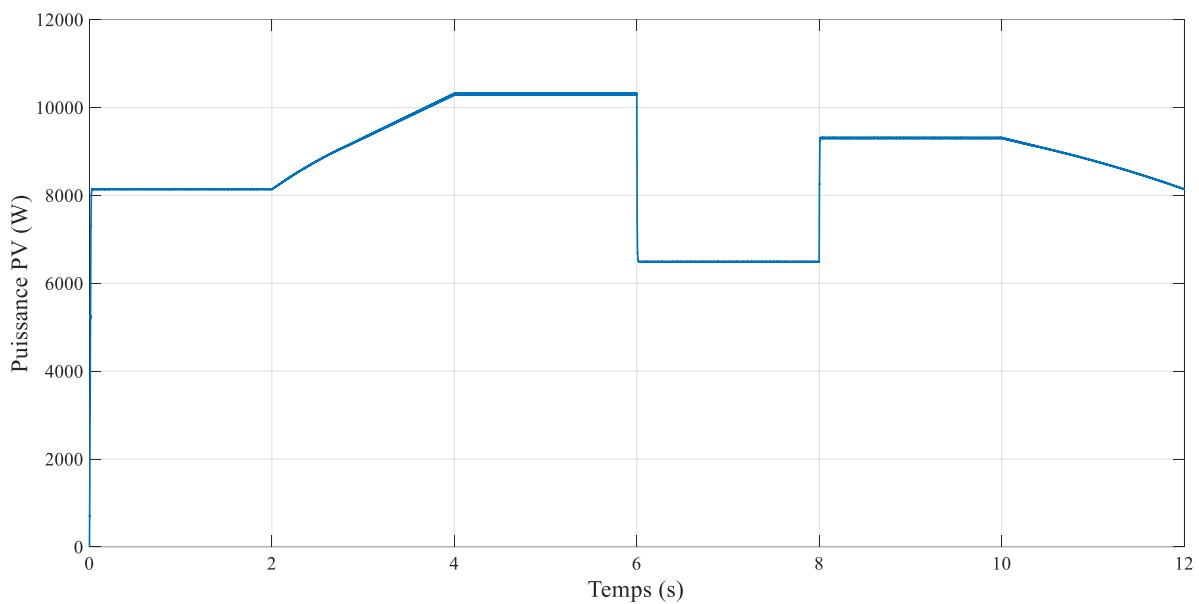


Figure III. 3 : Puissance générée par le panneau photovoltaïque (W) en fonction du temps (s)

Ce graphique illustre l'évolution de la puissance générée par un panneau photovoltaïque en fonction du temps. La puissance produite par le panneau photovoltaïque varie selon l'irradiation tel que la température est de 25°C. Elle atteint un maximum d'environ **9000 W**, avec des hausses et des baisses correspondant aux variations d'ensoleillement.

III.4.2 Batterie

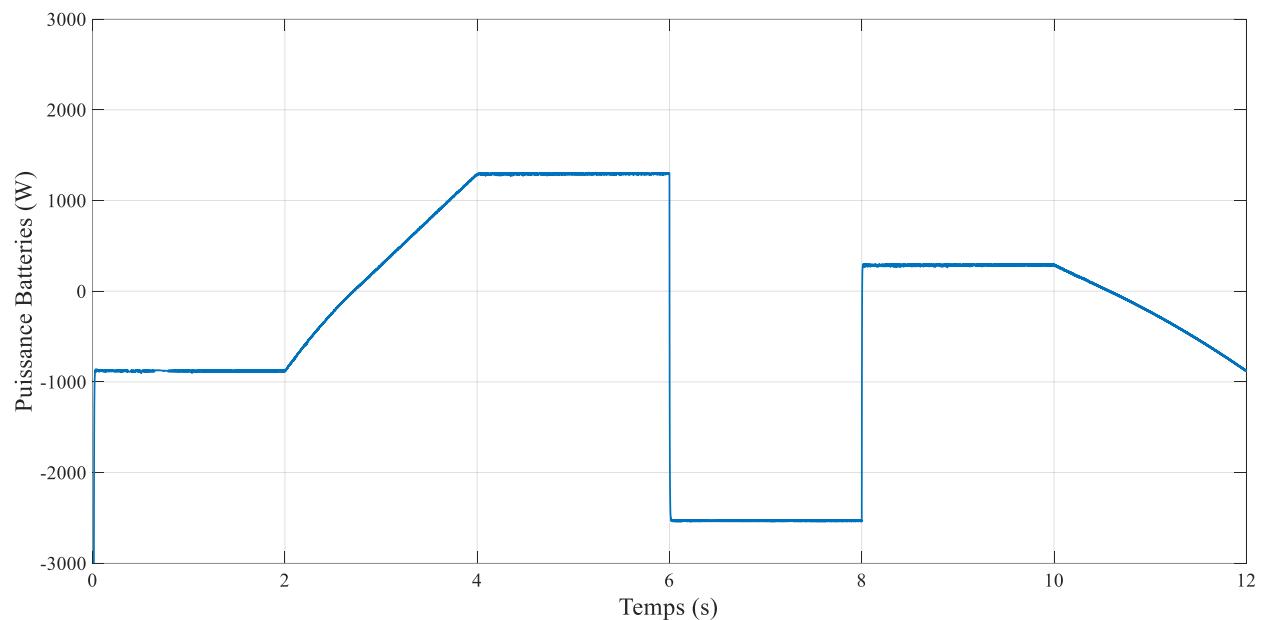


Figure III. 4 : Puissance de la batterie (W) en fonction du temps(s)

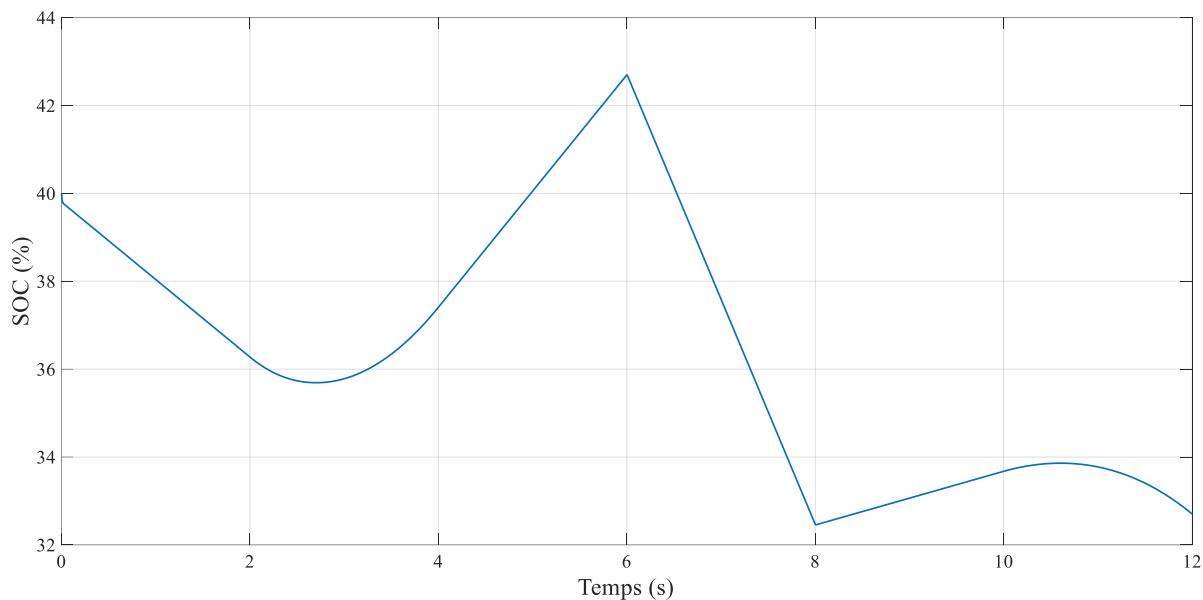


Figure III. 5 : Etat de charge de la batterie (%) en fonction du temps (s)

Les données présentées mettent en évidence le rôle clé de la batterie comme régulateur énergétique intelligent au sein de l'installation photovoltaïque. Son comportement dynamique s'ajuste en permanence aux conditions du système pour garantir une alimentation électrique optimale.

Fonctionnement en mode décharge :

Lorsque la production des panneaux photovoltaïques devient insuffisante (en cas de passage nuageux, la nuit ou lors d'une augmentation de la consommation), on observe que :

- La batterie bascule automatiquement en mode décharge (affichant une puissance négative)
- Son état de charge (SOC) diminue progressivement, passant de 44% à 32%
- Le convertisseur bidirectionnel active alors son mode boost
- Cette réaction permet de maintenir une tension stable sur le bus DC

Fonctionnement en mode charge :

À l'inverse, quand la production photovoltaïque dépasse les besoins :

- La batterie entre en phase de charge (puissance positive)
- Son SOC augmente de manière contrôlée de 32% à 44%

- Le convertisseur opère en mode buck
- L'énergie excédentaire est ainsi stockée pour une utilisation ultérieure

III.4.3 La charge

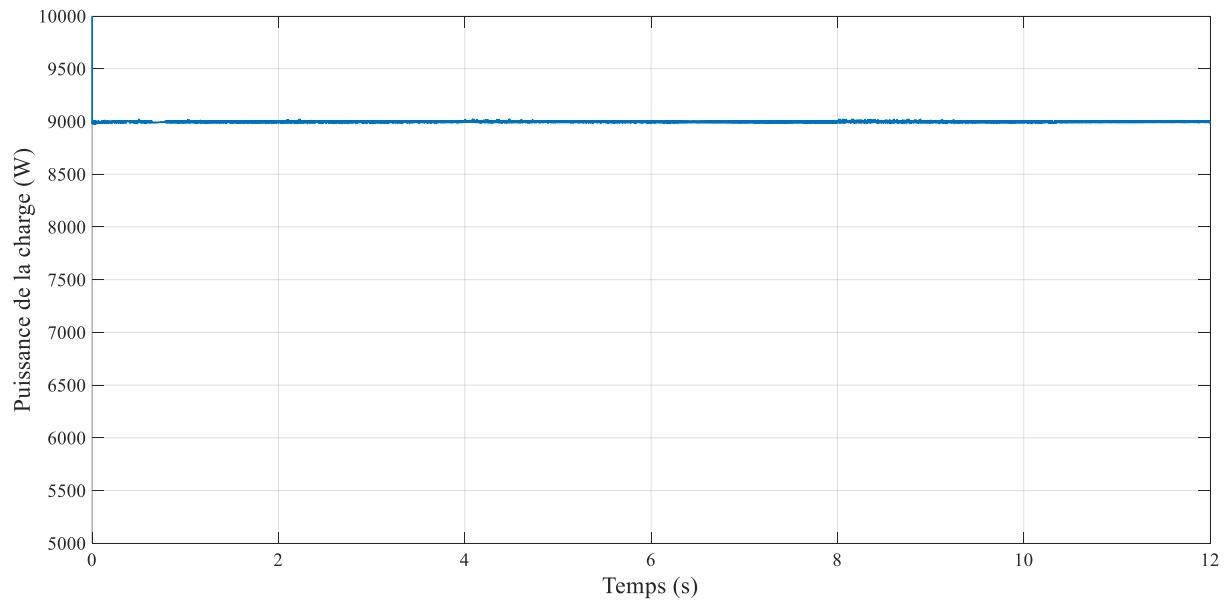


Figure III. 6 : Puissance de la charge(W) en fonction du temps(s).

Le système démontre une performance remarquable en maintenant une puissance de charge parfaitement stable à 9000 W, comme en témoigne la figure. La batterie joue un rôle crucial en compensant instantanément les variations de production solaire, tandis que le convertisseur bidirectionnel ajuste en temps réel les flux énergétiques. Le bus DC, quant à lui, agit comme élément tampon pour garantir cette stabilité. Cette régulation précise est rendue possible par un temps de réponse inférieur à la seconde et une coordination parfaite entre le MPPT, la batterie et les convertisseurs. Le système prouve ainsi sa capacité à fournir une alimentation électrique de qualité industrielle, éliminant efficacement les effets d'intermittence typiques de l'énergie solaire. Cependant, cette performance optimale nécessite un dimensionnement adéquat de la capacité de stockage et un système de contrôle-commande performant. Ces résultats valident l'efficacité de l'architecture globale et son aptitude à répondre aux exigences les plus strictes en matière de stabilité de puissance.

III.5 Conclusion

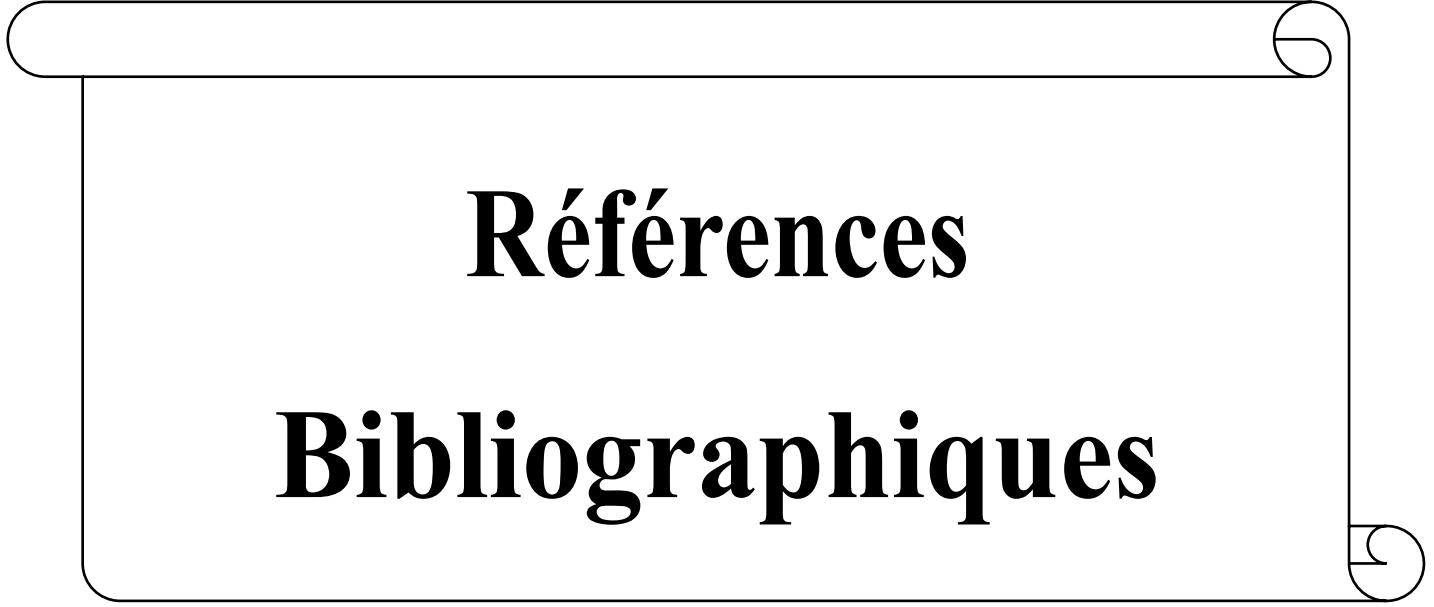
Dans ce chapitre, nous avons conçu et simulé un système photovoltaïque complet fonctionnant sur un bus DC, intégrant un convertisseur Boost, une commande MPPT, une batterie de stockage et une charge. À travers les différentes simulations réalisées sous MATLAB, il a été démontré que ce système assure une gestion énergétique efficace et dynamique, en s'adaptant automatiquement aux variations d'irradiation solaire. Le rôle de la batterie comme tampon énergétique s'est révélé essentiel pour garantir la stabilité de l'alimentation de la charge. Les résultats obtenus valident l'architecture proposée, en montrant sa capacité à maintenir une puissance constante, tout en optimisant l'usage des ressources solaires disponibles.

Conclusion générale

Au terme de ce travail, nous avons pu mettre en évidence l'importance et la complexité des systèmes photovoltaïques dans le contexte actuel de transition énergétique. Nous avons d'abord présenté les principes fondamentaux de l'énergie solaire photovoltaïque, ses composants essentiels et ses différentes configurations d'installation. Ensuite, une modélisation approfondie du système a été développée, incluant les panneaux photovoltaïques, les convertisseurs DC/DC, les batteries et la commande MPPT. Des simulations détaillées ont permis d'analyser le comportement dynamique du système dans diverses conditions de fonctionnement.

Les résultats obtenus ont confirmé la pertinence de l'architecture proposée, notamment en matière de stabilité de l'alimentation électrique et de gestion intelligente de l'énergie. L'intégration des convertisseurs et des systèmes de stockage s'est révélée cruciale pour maximiser la puissance extraite du générateur solaire et assurer un fonctionnement autonome et fiable.

Ce mémoire ouvre également la voie à plusieurs perspectives d'amélioration, telles que l'intégration d'algorithmes MPPT plus performants, l'utilisation de technologies de stockage alternatives (comme les batteries lithium-ion), ou encore l'extension vers des systèmes hybrides intégrant d'autres sources d'énergie renouvelable.



Références

Bibliographiques

- [1] Jacques Vernier, *Le soleil in Énergies renouvelables : Que sais-je ?*, Presses universitaires de France, 2014, p. 11-34
- [2] Rapport spécial publié par l'Agence Internationale de l'Énergie (AIE) en 2022 intitulé « Analyse des chaînes d'approvisionnement mondiales du photovoltaïque solaire » disponible sur le site Connaissance des Énergies.
- [3] Agence Internationale de l'Énergie (AIE), « Renewables 2020 »
- [4] L'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie (ADEME)
- [5] Petite histoire du photovoltaïque - Europe Énergie
- [6] L'Histoire du photovoltaïque -terre solaire
- [7] Technologies solaire en rupture,CEA,septembre 2024.
- [8] Archives des comprendre le solaire / terre solaire
- [9] Becquerel, E. (1839). Mémoire sur les effets électriques produits sous l'influence des rayons solaires. *Comptes rendus des séances de l'Académie des sciences*, 9, pp. 561-567.
- [10] Becquerel, E. (1839). Mémoire sur les effets électriques produits sous l'influence des rayons solaires. *Comptes rendus des séances de l'Académie des sciences*, 9, pp. 561-567.
- [11] Becquerel, E. (1839). Mémoire sur les effets électriques produits sous l'influence des rayons solaires. *Comptes rendus des séances de l'Académie des sciences*, 9, pp. 561-567.
- [12] Energy Institute - Statistical Review of World Energy (2023)
- [13] Energy Institute - Statistical Review of World Energy (2023)
- [14] J .Royer, T. Djiaiko, E. Schiler et B. Sadasy, «Le pompage photovoltaïque» université d'ottawa ,1998.
- [15] El Hamel L et Ghodbane S .2020. Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque optimisé par les algorithmes MPPT. Mémoire de Master, Université Kasdi Merbah Ouargla, .
- [16] Zerrouki Z et Berekci Reguig R. 2017. Dimensionnement d'un système photovoltaïque autonome. Mémoire De Master, Université Abou-Bekr Belkaid – Tlemcen, P1.

- [17] Belkbir K et chaabi S. 2017. conception et réalisation d'un suiveur de soleil à basz d'une carte Arduino UNO. Mémoire De Master, université Mammeri de Tizi-Ouzou, P5.
- [18] M. Iqbal. An Introduction to Solar Radiation. Academic Press Canada, Ontario, Canada, 1983
- [19] Labouret A et Cumunel P et Braun J-P. Cellules Solaires Les Bases De L'énergie Photovoltaïque. Dunod, Paris 2001.
- [20] Chibi Z. 2016. Effet du refroidissement sur les performances des panneaux PV. Mémoire De Master, L'université De Tlemcen.
- [21] Mohammed El Amine HA. 2019. Etude et réalisation d'un système de production d'énergie électrique par des panneaux photovoltaïques. Mémoire de Master, Centre Universitaire Belhadj Bouchaib d'Ain-Temouchent.
- [22] Ministry of Energy university Canada Toronto 2014/02
- [23]univ-ouargla thèse doctorat-BENSACI-Wafa.memoire=146, 05/2022
- [24] Zaamta S. 2008. Réalisation d'un régulateur solaire à base de Microcontrôleur pour le contrôle de l'état de charge et la protection des Accumulateurs. Mémoire De Magister, Centre Universités Larbi Ben M'hidi Oum El Bouaghi.
- [25] Angel M et Pastor C. 2006. Conception et réalisation de modules photovoltaïques électroniques. Thèse de doctorat, de l'Institut National des sciences Appliquées de Toulouse, septembre.
- [26] Bouguerra T. 2014. Optimisation d'un système photovoltaïque Application en continu et en alternatif. Mémoire De Magister, Université Mentouri De Constantine 1.
- [27] Mayouf S. 2016. Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque connecté au réseau électrique avec une commande vectorielle. Mémoire de Master, Université Mohamed Boudiaf - M'sila
- [28] Bouguerra T. 2014. Optimisation d'un système photovoltaïque Application en continu et en alternatif. Mémoire De Magister, Université Mentouri De Constantine 1.
- [29] Abid A et Bechludem Y. 2017. Etude et dimensionnement d'un convertisseur SEPIC pour une application photovoltaïque. Mémoire de Master, Université Abou Baker Belkaid De Tlemcen.

- [30] Installer Des Systèmes photovoltaïques, Guide pratique concis.
- [31] Bendjamaa I. 2012. Modélisation et commande d'un système De stockage photovoltaïque. Mémoire de Magister, Université Abou-Bakr Belkaid –Tlemcen
- [32] Loulou A. 2017. Électronique de puissance et commande dans le système photovoltaïque connectés au réseau. Mémoire de Master ,Université Université Badji Mokhtar -Annaba.
- [33] Loulou A. 2017. Électronique de puissance et commande dans le système photovoltaïque connectés au réseau. Mémoire de Master ,Université Université Badji Mokhtar -Annaba.
- [34] Guedaouria H. 2017. Dimensionnement d'un système photovoltaïque pour Alimenter le laboratoire LPDS au sien de l'université de Béchar. Mémoire de Master, Université Tahri Mohammed Bechar.
- [35] Madani M. 2018. Implémentation d'un algorithme MPPT dans une FPGA on utilisant la carte ML605. Mémoire de Master, Université Mohamed Boudiaf MSILA.
- [36] Tairi Y et Namane A .2020. Conception et simulation d'un chargeur solaire pour batterie li-ion. Mémoire de Master, Universite Kasdi Merbah Ouargla.
- [37] Assem H. 2014. (Le régulateur de charge et de contrôle dans un système Photovoltaïque Autonome). Attachée de Recherche, Division Energie solaire Photovoltaïque - CDER Recherche e et développement.
- [38] Hamdi A. 2018. Conception et dimensionnement d'un système Photovoltaïque pour habitation et pompage. Mémoire Master, Réseau électrique.
- [39] Thévenard D And Ross M « validation and Verification of Component Models and System Models for the PV », CETC-internal report 2003-035, Canada, 2003.
- [40] Zaaboub F. 2017.étude et simulation d'un générateur photovoltaïque connecté ou réseau électrique et doté d'un FAP. Mémoire De Master. Université Larbi Ben M'hidi Oum El Bouaghi.
- [41] Mémoire sur la Contribution de l'énergie photovoltaïque dans la performance Énergétique de l'habitat à haute qualité énergétique en Algérie.
- [42] Mémoire sur la Contribution de l'énergie photovoltaïque dans la performance Énergétique de l'habitat à haute qualité énergétique en Algérie.

- [43] TRÉMBLAY, Marc, et DUBÉ, Sophie. « L'impact des politiques économiques sur le développement rural au Québec : une analyse longitudinale ». *Université de Montréal*, Département de science politique, Cahiers de recherche CRÉUM, no 2023-05
- [44] TRÉMBLAY, Marc, et DUBÉ, Sophie. « L'impact des politiques économiques sur le développement rural au Québec : une analyse longitudinale ». *Université de Montréal*, Département de science politique, Cahiers de recherche CRÉUM, no 2023-05
- [45] DJEFFAFLIA Hichem et HATTAB, HoussamEddine. Modélisation et commandé d'un hacheur élévateur. Thèse de doctorat, 2020.
- [46] G. L. F. e. D. P. SÉGUIER, Electronique de puissance-structures, commande, applications, Paris : 10e édition DUNOD, 2004, vol. 2011, p. 2015.
- [47] S. E. NAFFOUTI, Dimensionnement et commande d'un hacheur parallèle alimenté par une source Photovoltaïque. Mémoire de fin de cycle, Université de Monastir, Tunisie, 2012.
- [48] S. E. NAFFOUTI, Dimensionnement et commande d'un hacheur parallèle alimenté par une source Photovoltaïque. Mémoire de fin de cycle, Université de Monastir, Tunisie, 2012.
- [49] S. E. NAFFOUTI, Dimensionnement et commande d'un hacheur parallèle alimenté par une source Photovoltaïque. Mémoire de fin de cycle, Université de Monastir, Tunisie, 2012.

Résumé

Ce mémoire de master, intitulé "**Etude d'un système photovoltaïque/Batterie**", présente la conception, la modélisation et la simulation d'un système photovoltaïque complet intégrant un dispositif de stockage par batterie. Face aux enjeux de la transition énergétique, ce travail explore une solution durable pour la production et la gestion de l'électricité à partir de l'énergie solaire. Le document est structuré en trois chapitres principaux :

-Etat de l'art : Présente les fondamentaux de l'énergie solaire photovoltaïque, l'historique de la technologie, les composants d'un système (cellule, module, panneau, batterie, régulateur) et les différents types d'installations (sites isolés, raccordées au réseau).

-Modélisation du système : Détaille la modélisation mathématique du panneau photovoltaïque, l'étude des convertisseurs DC/DC (notamment le hacheur Boost et le convertisseur bidirectionnel) et de la commande MPPT (Perturb and Observe), ainsi que celle de la batterie Plomb-acide.

-Simulation du système global : Décrit l'architecture d'un système basé sur un bus DC, intégrant le panneau, la batterie et la charge. Les simulations sous MATLAB/Simulink démontrent l'efficacité de la gestion d'énergie, où la batterie compense les déficits ou stocke les excédents de production solaire pour assurer une alimentation stable et continue de la charge.

Les résultats de simulation confirment la performance du système proposé, validant sa capacité à optimiser l'utilisation de l'énergie solaire et à garantir une puissance de sortie stable grâce à une gestion intelligente des flux énergétiques.

Abstract

This master's thesis, entitled "**Study of a Photovoltaic/Battery System**", focuses on the design, modeling, and simulation of a complete photovoltaic system integrated with battery storage. Addressing the challenges of the energy transition, this work explores a sustainable solution for generating and managing electricity from solar energy.

The document is structured into three main chapters:

-State of the Art: Introduces the fundamentals of solar photovoltaic energy, the history of the technology, the components of a system (cell, module, panel, battery, regulator), and the different types of installations (off-grid, grid-connected).

-System Modeling: Details the mathematical modeling of the photovoltaic panel, the study of DC/DC converters (including the Boost converter and the bidirectional converter) and the MPPT command (Perturb and Observe algorithm), as well as the Lead-acid battery.

-Global System Simulation: Describes the architecture of a DC bus-based system integrating the panel, the battery, and the load. Simulations using MATLAB/Simulink demonstrate the effectiveness of the energy management, where the battery compensates for deficits or stores surplus solar production to ensure a stable and continuous power supply to the load.

The simulation results confirm the performance of the proposed system, validating its ability to optimize the use of solar energy and ensure stable output power through intelligent energy flow management.

الملخص

"دراسة نظام طاقة شمسية/بطارية" هو عنوان هذا الأطروحة للماجستير، والتي تقدم تصميم ونموذج ومحاكاة لنظام طاقة شمسية كامل مدمج مع جهاز تخزين الطاقة بالبطاريات. في مواجهة تحديات التحول الطاقي، يستكشف هذا العمل حلاً مستداماً لإنتاج وإدارة الكهرباء من الطاقة الشمسية، وتم تنظيم المستند إلى ثلاثة فصول رئيسية.

حالة الفن: يقدم الأساسيات الخاصة بالطاقة الشمسية الكهروضوئية، التاريخ التكنولوجي، مكونات النظام (الخلية، اللوح، اللوح الشمسي، البطارية، المنظم) وأنواع التركيبات المختلفة (المناطق المعزلة، المتصلة بالشبكة).

نموذج النظام: يوضح النبذة الرياضية للوح الشمسي، دراسة محولات التيار المستمر/مستمر) خاصة محول التعزيز Boost والمحول ثانوي الاتجاه (نظام تتبع نقطة الطاقة القصوى MPPT خوارزمية Perturb and Observe)، بالإضافة إلى بطارية الرصاص الحمضية.

محاكاة النظام الشامل: يصف هيكلية النظام القائم على ناقل تيار مستمر، يدمج اللوح الشمسي، البطارية والحمل. تظهر عمليات المحاكاة باستخدام برنامج MATLAB/Simulink فعالية إدارة الطاقة، حيث تعيش البطارية العجز أو تخزن فائض الإنتاج الشمسي لضمان إمداد مستقر ومستمر للحملة.

تؤكد نتائج المحاكاة أداء النظام المقترن، مما يتحقق من قدرته على تحسين استخدام الطاقة الشمسية وضمان استقرار طاقة الخرج من خلال الإدراة الذكية لتدفقات الطاقة.