

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

Université de Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi - Bordj Bou Arreridj

Faculté des Sciences et de la technologie

Département Electronique

Mémoire

Présenté pour obtenir

LE DIPLOME DE MASTER

FILIERE : Electronique

Spécialité : Industries Electronique

Par

➤ **BOUZIDI Meriem**

Intitulé

*Étude et simulation d'un système de conversion d'énergie solaire
photovoltaïque PV autonome avec stockage*

Soutenu le : 26/06/2024

Devant le Jury composé de :

Nom & Prénom	Grade	Qualité	Etablissement
M.BIOUD NADHIRA	MCA	Président	Univ-BBA
M.BOUKEZATA BOUALEM	MCA	Encadreur	Univ-BBA
M.SAHLI ABDESALEM	MAB	Examineur	Univ-BBA

Année Universitaire 2023/2024



UNIVERSITÉ MOHAMED EL BACHIR EL IBRAHIMI

Étude et simulation d'un système de
conversion d'énergie solaire
photovoltaïque PV autonome avec
stockage.

Auteur :

BOUZIDI MERIEM

Encadrant

Dr. Boualem BOUKEZATA

28 avril 2025

DÉDICACE

À la mémoire de **mon défunt fils Muhammad**

À la plus belle créature que **Dieu** a créée sur la surface de la terre,

C'est une source de tendresse, de patience et de générosité.

À **ma mère**

A **mon père**

A **mon mari** qui a toujours été à mes côtés

A tous **mes frères et sœurs**,

À toute ma famille

À tous mes amis et collègues

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier tout d'abord mon encadrant **Dr. BOUKEZATA Boualem** , pour sa patience, et surtout pour sa confiance, ses remarques et ses conseils, sa disponibilité et sa bienveillance. Qu'il trouve ici le témoignage de ma profonde gratitude. Je voudrais également remercier les membres du jury pour avoir accepté d'évaluer ce travail et pour toutes leurs remarques et critiques, ainsi que le personnel et les enseignants de l'université Mohammed Elbachir Elibrahimi bordj bou arerridj.

Chapitre 1

Introduction générale

1.1 Introduction générale

Une grande partie de l'énergie utilisée aujourd'hui dans le monde (plus de 80 %) provient de gisements de combustibles fossiles (charbon, pétrole, gaz) ou d'uranium. Ces gisements, ces stocks, constitués au fil des âges et de l'évolution géologique, sont évidemment en quantité limitée : ils sont épuisables.

Par opposition, les énergies fournies par le soleil, le vent, les chutes d'eau, la croissance des végétaux, les marées, la chaleur de la terre sont renouvelables. Toutes ces énergies renouvelables n'ont d'ailleurs en définitive que deux sources : le soleil (puisque celui-ci est à l'origine du vent, du cycle de l'eau, des marées, de la croissance des végétaux) et la terre (qui dégage de la chaleur).

Par extension, on assimile souvent l'énergie tirée des déchets à une énergie renouvelable : on peut en effet considérer que l'activité humaine ou animale est perpétuelle, et donc source de déchets sans cesse renouvelés. Souvent on englobe sous le nom de biomasse l'énergie d'origine végétale, encore appelée « houille verte » (bois et biocarburants), et les déchets humains, végétaux ou animaux.

Ce mémoire de master présente la simulation et la modélisation d'un système de conversion d'énergie basé sur une source d'énergie renouvelable PV. La configuration autonome sera adopté dans ce travail.

Le premier chapitre sera consacrer à la réalisation d'un état de l'art sur les systèmes d'énergie renouvelable, les différentes sources d'énergie, les configurations qui existent et ce chapitre sera

terminer par la définition du système de stockage avec son couplage avec le GPV.

Le deuxième chapitre cible la modélisation des éléments constituant le système global ainsi que les algorithmes de contrôles proposés dans ce travail de master.

Le dernier chapitre est pour but de valider les stratégies de contrôles proposées par simulation.

Les résultats obtenus ont confirmés la validités des travaux proposes. Le mémoire est terminé par une conclusion générale.

Chapitre 2

État de l'art des systèmes d'énergie renouvelable

2.1 Introduction

Ce chapitre commence par introduire les différentes sources d'énergie renouvelables, la configuration autonome du système photovoltaïque les plus documentés dans la littérature et l'élément de stockage clé dans cette dernière configuration.

Ensuite, il aborde le couplage d'une source renouvelable avec la batterie de stockage et les condition nécessaire d'assurer ce couplage.

2.2 Les énergies renouvelables

Le développement et l'exploitation des énergies renouvelables ont connu une forte croissance dans ces dernières années pour de multiples raisons. L'environnement et la question politique du réchauffement de la planète ont engendré une forte poussée pour l'exploitation des ressources d'énergie renouvelables en tant que méthode de réduction des émissions de dioxyde de carbone par le remplacement des ressources énergétiques hydrocarbonés. Une énergie est dite renouvelable si elle est produite à partir de ressources inépuisables. Toutes les énergies sont issues du soleil, directement (énergie solaire) ou indirectement (énergie éolienne, hydraulique et biomasse), les énergies issue du magma terrestre (géothermie) et les énergies issue de la gravitation (énergie marémotrice). Les diverses énergies que l'on pourrait tirer des océans,

telles que l'énergie de la houle, des courants marins ou du gradient thermique des mers, sont également issues indirectement de l'énergie solaire et font partie du champ des énergies renouvelables. Leur exploitation ne donne pas lieu à des émissions de gaz à effet de serre ou à des déchets dangereux. La production d'électricité décentralisée via des énergies renouvelables offre une plus grande sûreté d'approvisionnement des consommateurs tout en respectant l'environnement. Cependant, le caractère intermittent des sources impose des règles particulières de dimensionnement et d'exploitation de ces systèmes de récupération d'énergie. [6]

2.2.1 L'énergie solaire

Ce terme désigne l'énergie fournie par les rayons du soleil. Les rayons sont constitués de photons, vecteurs d'énergie. L'énergie du rayonnement solaire parvenant au sol s'emploie aujourd'hui pour désigner l'électricité solaire et l'énergie thermique obtenues à partir de l'exploitation du rayonnement du soleil. Les principales exploitations de l'énergie solaire sont l'énergie solaire thermique, thermodynamique et photovoltaïque. L'énergie solaire permet de chauffer un bâtiment ou un chauffe-eau grâce à des capteurs thermiques, mais aussi de produire de l'électricité. Elle utilise la chaleur transmise par le rayonnement, alors que l'énergie photovoltaïque utilise le rayonnement lui-même. [3]

2.2.1.1 Énergie solaire thermique



FIGURE 2.1 – Panneau solaire thermique.

Elle désigne l'énergie récupérée sous forme de chaleur de la lumière du soleil. L'énergie

solaire thermique peut être utilisée de façon passive ou active. On parle de solaire thermique passif pour les installations permettant de chauffer directement un bâtiment par ses surfaces vitrées (effet de serre) et/ou l'accumulation de chaleur sur des murs exposés au rayonnement solaire. Le solaire thermique actif consiste à récupérer la chaleur de soleil dans des panneaux solaires ou capteurs solaires dans lesquels circule un fluide caloporteur. Ce fluide chauffé dans les panneaux solaires peut stocker sa chaleur dans un ballon à accumulation qui alimente ensuite un circuit de chauffage.

2.2.1.2 Énergie solaire photovoltaïque

Le mot photovoltaïque est un mariage de deux mots : le mot grec « photo », qui signifie lumière, et « voltaïque », qui signifie l'électricité. La technologie photovoltaïque utilisée pour décrire le matériel qui convertit l'énergie solaire en énergie électrique. L'effet photovoltaïque est la conversion directe de la lumière (photons) en électricité par le biais des matériaux semi-conducteurs, il a été découvert en 1839 par Antoine Becquerel, grand père d'Henri Becquerel qui a découvert en 1896 la radioactivité. Les modules photovoltaïques (PV) qui effectuent cette conversion ont de nombreux avantages, ils sont durables, fiables et nécessitent un entretien minime, car ils n'ont pas de pièces mobiles. Ils sont également totalement silencieux et ne nécessitent que la lumière du soleil comme combustible. Le cœur du photovoltaïque (PV) est un matériau semi-conducteur qui peut être adapté pour libérer des électrons, ces derniers sont les particules chargées négativement qui forment la base de l'électricité. Le matériau semi-conducteur le plus couramment utilisé dans les cellules photovoltaïques est le silicium, un élément le plus souvent trouvé dans le sable. Les cellules au silicium cristallin (près de 84

2.2.2 Énergie éolienne

L'énergie éolienne consiste à exploiter l'énergie cinétique du vent. C'est une énergie renouvelable, inépuisable mais intermittente, et qui n'émet pas directement de gaz à effet de serre en phase d'exploitation.

La racine étymologique du terme « éolien » provient du nom du personnage mythologique Éole, connu en Grèce antique comme le maître des vents. La puissance des éoliennes actuellement déployées varie de quelques kW jusqu'à plus de 10 MW (12 MW pour l'Haliade-X). Le parc éo-



FIGURE 2.2 – Centrale solaire PV.

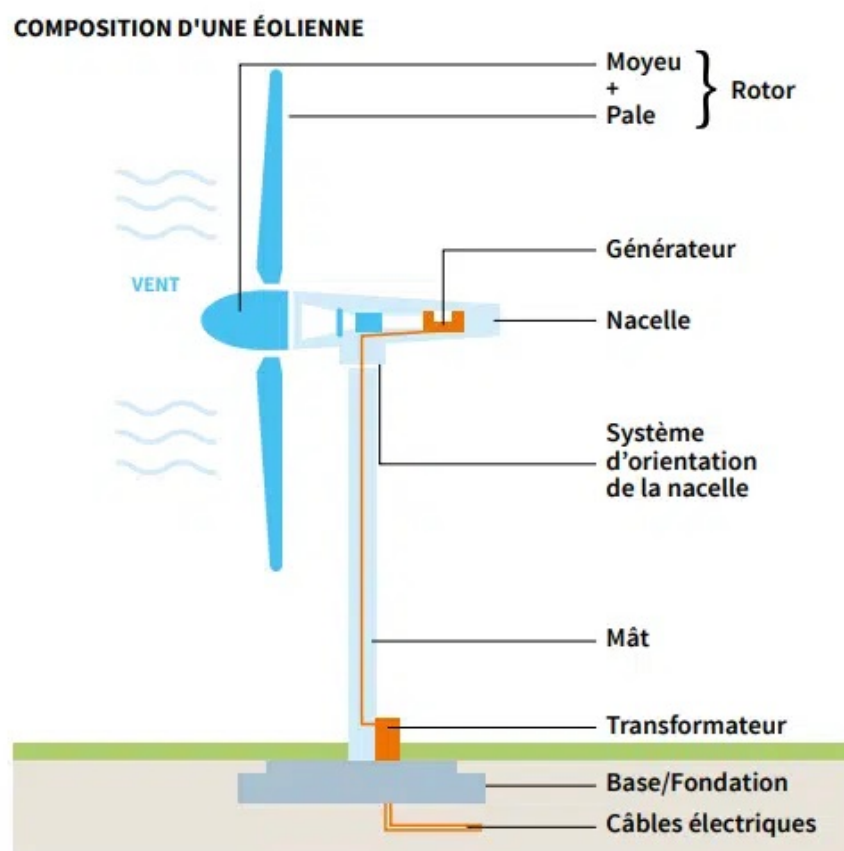


FIGURE 2.3 – Schéma d'énergie éolienne.

lien mondial a une puissance installée de 1081 GW en 2023, contre 651 GW en 2019. Il compte pour environ 6% de la production mondiale d'électricité. [2]

2.2.3 Énergie Hydraulique

Comme l'énergie éolienne qui utilise la force du vent, l'énergie hydraulique est une énergie primaire utilisant la force du mouvement d'eau (chutes d'eau, cours d'eau, courants marin, marée, vagues). L'énergie hydraulique est une manifestation indirecte de l'énergie du soleil, comme beaucoup de sources d'énergies renouvelables sur terre, sa source est inépuisable mais contrairement à l'énergie du vent, les cours d'eau ne cessent de couler. L'énergie hydraulique est une énergie permanente qui trouve son origine dans le cycle d'eau (évaporation-précipitation) causé par le rayonnement solaire sur le globe terrestre ainsi que la force gravitationnelle qui permet à l'eau de couler de haut en bas. L'énergie hydraulique est utilisée depuis l'antiquité sous forme d'énergie mécanique pour moudre le grain dans les moulins à eau placés le long des cours d'eau. Ce principe a été perfectionné pour actionner des forges, pour carder la laine, tanner les peaux, etc., au cours de l'époque préindustrielle. Actuellement, l'énergie hydraulique est essentiellement utilisée pour produire de l'électricité, on parle alors d'énergie hydroélectrique.

[5]

2.2.4 La biomasse

Elle désigne l'ensemble des matières organiques d'origine végétale, animale ou fongique qui peuvent devenir source d'énergie par combustion, après méthanisation (nouvelles transformations chimiques). La biomasse est utilisée par l'homme depuis des siècles (maîtrise le feu). Elle reste la principale énergie renouvelable utilisée dans le monde, pour le chauffage et la cuisson, mais particulièrement dans les pays peu industrialisés[5].

2.2.5 L'énergie géothermique

La géothermie, du grec géo (« la Terre ») et thermos (« la chaleur »), désigne à la fois la science qui étudie les phénomènes thermiques internes du globe terrestre, et la technologie qui vise à l'exploiter. Cette énergie utilise la chaleur du sous-sol, elle peut permettre de chauffer des locaux (avec une température moyenne ou faible), ou de produire de l'électricité par vapeur interposée (avec une température élevée).

2.3 Systèmes solaires photovoltaïques

Les systèmes photovoltaïques les plus couramment rencontrés sont : les systèmes autonomes, et les systèmes connectés au réseau électrique. [3]

2.3.1 Systèmes autonomes

Un système autonome photovoltaïque répond aux besoins en électricité de ceux qui sont trop éloignés et n'ont pas accès aux réseaux de distribution. Ce type de système nécessite l'utilisation de batteries pour le stockage de l'électricité et d'un contrôleur de charge pour assurer la durabilité des batteries. Il se révèle particulièrement adapté pour des applications comme une pompe dans le jardin, l'éclairage en zone isolée, l'alimentation de bornes téléphoniques le long de l'autoroute, etc. La figure 1.1 représente l'exemple d'un système PV autonome avec stockage. Pour ces applications il n'est pas toujours possible de mettre en place un réseau d'alimentation classique, soit à cause de contraintes techniques, soit pour des raisons économiques. Le système autonome doit être capable de fournir du courant aux consommateurs pendant la période de l'année de moindre irradiation lumineuse. Si on a besoin du courant toute l'année, la période de moindre irradiation est l'hiver (pour l'Algérie). Pendant cette période, il faudra plus de panneaux pour couvrir les mêmes besoins qu'en été. Les batteries donnent une autonomie au système pour des applications nocturnes ou quand les panneaux ne fournissent pas assez de courant. [8]

2.3.2 Systèmes connectés au réseau

Les systèmes photovoltaïques connectés au réseau permettent la décentralisation de la production sur le réseau électrique. Ces installations sont raccordées au réseau électrique public dans lequel elles injectent l'électricité qu'elles produisent. L'électricité générée n'est donc pas stockée mais fournie au réseau local de distribution. Ces systèmes couplés directement au réseau électrique à l'aide d'un convertisseur dc-ac (onduleur). La figure 1.2 présente un système PV connecté au réseau électrique. Ce type de système offre beaucoup de facilité pour le producteur/consommateur puisque c'est le réseau qui prend en charge l'équilibre entre la production et la consommation d'électricité. Il est impératif de convertir le courant continu produit par le système photovoltaïque en un courant alternatif synchronisé avec le réseau. Afin d'effectuer

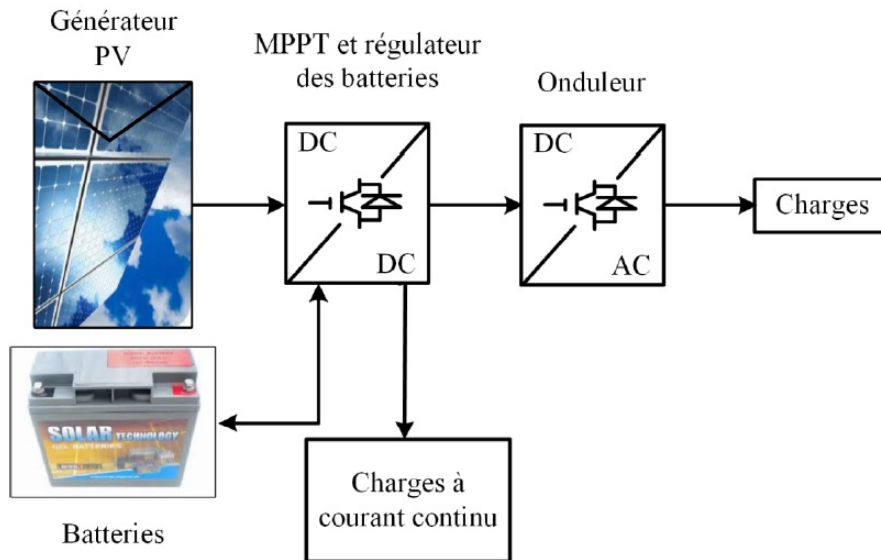


FIGURE 2.4 – Système photovoltaïque autonome avec stockage.

cette conversion, un onduleur de tension est mis en oeuvre. Le rendement typique d'un onduleur est d'environ 95%, il en existe de différentes puissances et sont conçus spécifiquement pour les applications photovoltaïques.

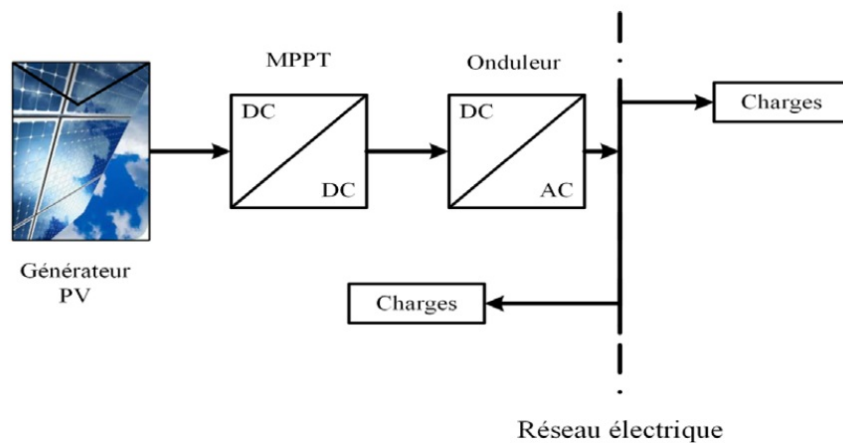


FIGURE 2.5 – Système photovoltaïque connecté au réseau électrique.

2.4 Système de stockage

L'énergie électrique est produite dans sa majorité par les énergies fossiles ou les énergies fissiles. Ces deux types présentent des inconvénients majeurs : - Fossiles : Effet néfaste sur l'environnement - Fissile : Insécurité. Le recours aux énergies renouvelables peut remédier à

ces problèmes. Mais elles ont aussi un problème qui se manifeste par la production irrégulière et intermittente. Chose qui représente l'un des obstacles à leur développement. Le stockage est la solution. Il permet de mettre en réserve une certaine quantité d'énergie pour une utilisation ultérieure.

Donc il vise à répondre à quatre problématiques principales : a) la récupération de la production d'énergie excédentaire par rapport à la demande du moment ; b) la fourniture d'énergie pour compenser l'insuffisance due au caractère intermittent de l'offre ; c) la fourniture d'énergie pour alimenter un pic de demande occasionnel et d) la fourniture d'énergie en cas de défaillance du système électrique ou de mauvaise qualité du réseau local (cas des systèmes à injection aux réseaux).

Le stockage se caractérise par trois paramètres qui sont :

A) la nature

La nature du stockage est multiple et fonction du temps de décharge, de la puissance et de la durée requises. Le stockage peut être à usage :

- fixe (maisons) ;
- Mobile (moyens de transport).

B) La capacité

C'est la quantité d'énergie stockée ; elle est liée directement à la durée de stockage. Elle peut varier de quelques heures (passage des nuages, le calme du vent, ...) à quelques jours (jours de faible ensoleillement , les jours de faible vent, ...).

- Le stockage est dit de faible capacité lorsque celle-ci est de l'ordre du kWh et de forte capacité si elle est au-delà de MWh. Dans ce cas, on parle de stockage massif de l'énergie.

C) Le rendement Le rendement de stockage c'est le rapport de l'énergie cédée à l'énergie introduite.

2.4.1 Type de stockage

À ce jour, le stockage direct de l'énergie électrique n'étant pas possible, l'électricité est convertie en d'autres formes d'énergie qui est stockée puis récupérée et retransformée pour être utilisable. Selon la capacité de stockage et sa nature, on peut citer quelques types à savoir : [\[9\]](#)

D) Mécanique (potentielle ou cinétique) : stockage gravitaire par pompage (STEP),

stockage par air comprimé (CAES) ;

E) Electrochimique et électrostatique : batteries, condensateurs, supraconducteurs ;

F) Chimique : hydrogène, méthanation, etc.

Dans ce mémoire on se limite au stockage par batterie au plomb. Le stockage d'énergie dans les systèmes photovoltaïques autonome est en général assuré par les batteries dont les inconvénients majeurs sont la très forte valeur du rapport poids/énergie stockée (de 20 à 50 kg/kWh) et leurs coûts. Pour les systèmes de faible puissance, les batteries les plus utilisées sont en plomb-acide.

2.4.2 Caractéristique de charge et de décharge

Les accumulateurs sont caractérisés par deux variables fonction de l'état de charge Q : 1) la tension $V_a(Q)$ et 2) la résistance interne $r_a(Q)$.

La tension diminue avec l'état de décharge de la batterie ; par contre la résistance interne diminue avec l'état de charge de la batterie. La tension varie entre 1.7V et 2.4V par élément suivant l'état de charge en conditions normales de fonctionnement.

2.4.3 Caractéristique de Charge

Pendant la charge la batterie se comporte comme un récepteur. Le courant rentre par l'anode et sort par la cathode ce qui produit une fabrication d'acide et augmente ainsi la densité de l'électrolyte. En conséquence la densité d'ions augmente également, ce qui fait baisser la résistance série R_{Bi} et augmente la tension V_{Bi} . Vers la fin de la charge le courant tend à électrolyser l'eau produisant de l'oxygène et de l'hydrogène (O_2 sur l'électrode positive et H_2 sur l'électrode négative). Ce phénomène est appelé gazéification. En cas de surcharge, la batterie perdra de l'eau qui devra être remplacée.

La figure [2.6](#) montre la différence de potentiel à ses bornes en fonction du temps. Le processus est composé de trois phases : phase d'un court régime transitoire, phase de la stabilisation de la tension aux environs de 2,2V (fin de charge point M). La phase trois commence à partir du point M et la tension croît rapidement. Les plaques complètement polarisées, ne retiennent plus l'oxygène et l'hydrogène dégagés. La fin de charge est atteinte et limitée par le système de régulation (présence d'un régulateur).

État de charge

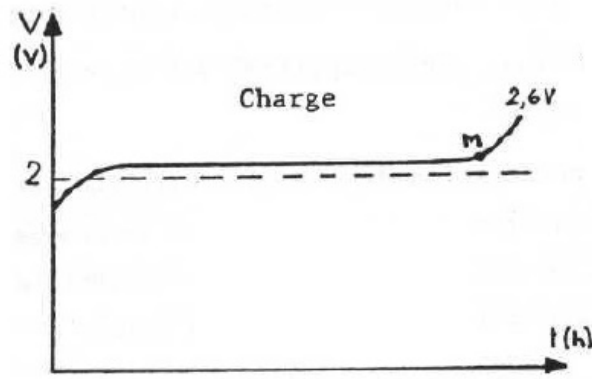


FIGURE 2.6 – Caractéristique de charge d’une batterie au plomb.

On définit l’état de charge d’une batterie E_{ch} comme suit :

$$E_{ch} = \frac{Q_E}{C_n} \quad (2.1)$$

ou Q_E la quantité d’énergie encore disponible en Ah et C_n la capacité nominale de la batterie.

$E_{ch} = 1$ si la batterie est pleine et $E_{ch} = 0$ si la batterie est vide.

2.4.4 Couplage d’une batterie au générateur PV

2.4.4.1 Paramètres

G) Autonomie

L’autonomie est la période durant laquelle la batterie est capable de fournir de l’énergie sans avoir besoin d’être rechargée ni subir de dommages. En général, elle est donnée en nombre de jours.

• H) Courant de surcharge

La batterie permet de fournir un courant de surcharge pendant quelques instants c’est à dire un courant plus élevé que celui peut fournir le générateur PV. Ce cas se présente pour le démarrage des moteurs et des appareils qui ont un courant de démarrage de 3 à 5 fois supérieur au courant d’utilisation.

I) Stabilisation de la tension

Une batterie permet de fournir une tension constante tout en éliminant les fluctuations de tension dues au générateur PV et de fonctionner à une tension constante optimale.

J) Profonde de décharge C'est le pourcentage d'énergie maximum que l'on peut retirer d'une batterie. La batterie ne doit pas être déchargée au-delà de cette valeur afin de prolonger sa durée de vie. Plus que la profondeur de décharge est profonde plus que sa durée de vie démunie. En général la profondeur de décharge est entre 20 et 30%.

K) Température

La variation de la température influence le rendement de la batterie. Celle-ci a un fonctionnement idéal à température ambiante de 25°C.

L) Cycle et durée de vie

Le cycle est le nombre de séquences de charge et décharge que peut subir une batterie à sa profondeur de décharge. Il détermine les performances de la batterie et sa durée de vie.

2.4.4.2 Couplage

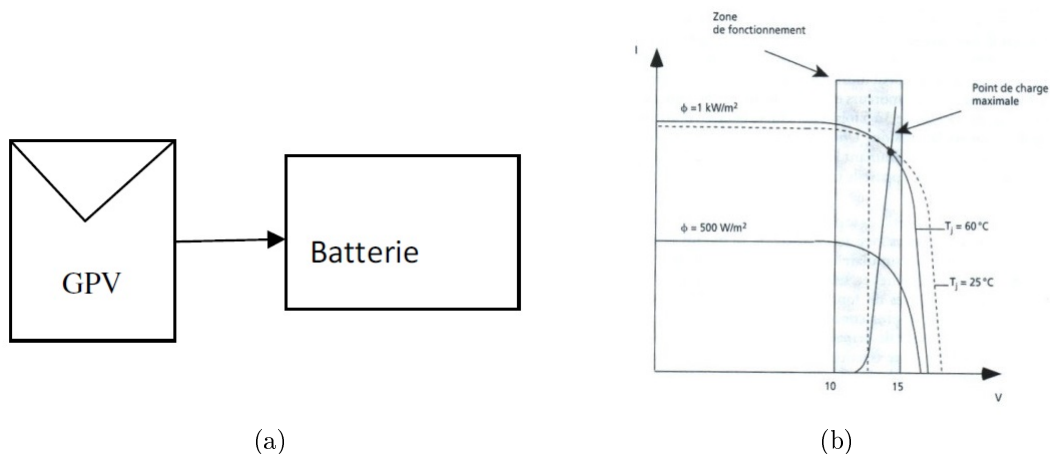


FIGURE 2.7 – a) Couplage direct de la batterie au GPV, b) Courbes $I(V)$ d'un module avec une batterie de 12V

La figure 2.7a montre le couplage direct d'une batterie au générateur PV et la fig. 2.7b la zone de fonctionnement d'une batterie de 12 V à un module de 50Wc. On remarque que la présence de la batterie fait fonctionner pratiquement le module dans sa zone optimale. Le branchement de la batterie se fait avec la présence d'un régulateur afin d'éviter les charges et décharges profondes de la batterie. La simulation d'une cellule PV est donnée sur la figure suivante

2.5 Conclusion

Ce chapitre a été consacré à l'étude des différentes source d'énergie renouvelable et les configurations de conversion d'énergie existes (autonomes et connectées au réseau). Dans ce rapport de Master on va s'intéresser aux systèmes de conversion autonomes à base de source solaire PV et un élément de stockage. la dernière partie de ce chapitre a évoqué l'élément de stockage et son couplage avec une source solaire PV.

Chapitre 3

Modélisation du système de conversion PV

3.1 Introduction

Ce chapitre sera consacré à l'étude et la modélisation du système de conversion complet, en commençant par le modèle du générateur PV, le convertisseur dc-dc avec son algorithme d'optimisation ainsi que sa stratégie de contrôle, le hacheur réversible en courant et la batterie de stockage.

3.2 La cellule photovoltaïque

La cellule PV est le plus petit élément d'une installation photovoltaïque. Elle est composée de matériaux semi- conducteurs de type P-N qui produisent un courant électrique sous l'effet des photons lumineux. Cette transformation est basée sur les trois mécanismes suivants :

- ✓ Absorption des photons par le matériau constituant le dispositif
- ✓ Conversion de l'énergie du photon en énergie électrique, ce qui correspond à la création des paires d'électrons/trous dans le matériau semi-conducteur
- ✓ Collecte des particules générées dans le dispositif.

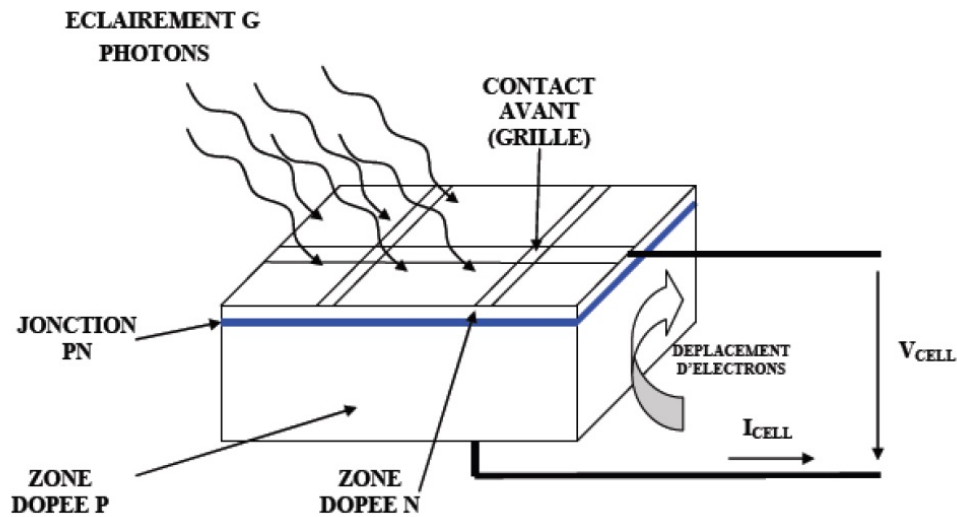


FIGURE 3.1 – Modèle physique de la cellule PV

3.2.1 Principe de fonctionnement de la cellule PV

Une cellule PV est réalisée à partir de deux couches de silicium, une dopée P (dopée au bore) et l'autre dopée N (dopée au phosphore) créant ainsi une jonction PN avec une barrière de potentiel. Lorsque les photons sont absorbés par le semi-conducteur, ils transmettent leur énergie aux atomes de la jonction PN de telle sorte que les électrons de ces atomes se libèrent et créent des électrons (charges N) et des trous (charges P). Ceci crée alors une différence de potentiel entre les deux couches. Cette différence de potentiel est mesurable entre les connexions des bornes positives et négatives de la cellule. A travers une charge continue, on peut en plus récolter des porteurs. La tension maximale de la cellule est d'environ 0.6 V pour un courant nul. Cette tension est nommée tension de circuit ouvert (V_{oc}). Le courant maximal se produit lorsque les bornes de la cellule sont court-circuitées, il est appelé courant de courtcircuit (I_{cc})

[4]

3.2.2 Modélisation du générateur PV

Le circuit équivalent du modèle à une seule diode de la cellule photovoltaïque idéale est illustré sur la figure 3.2. [3]

L'équation de base de la théorie des semi-conducteurs qui décrit mathématiquement la caractéristique I-V de la cellule photovoltaïque idéale est :

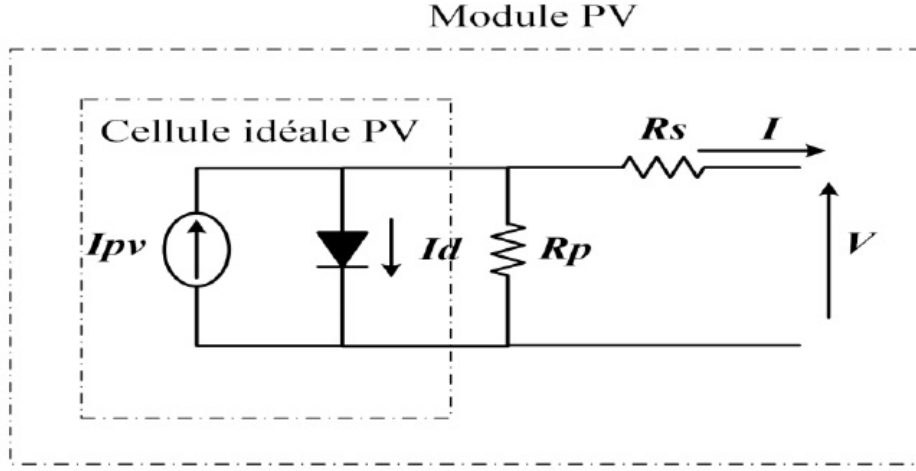


FIGURE 3.2 – Modèle du générateur PV

$$I = I_{pv,cel} - \underbrace{I_{o,cel} \left[\exp\left(\frac{qv}{akT}\right) - 1 \right]}_{I_d} \quad (3.1)$$

ou : I_{pv} est le courant généré par la lumière incidente, I_d est l'équation de la diode de Shockley, $I_{0,c}$ est le courant de fuite de la diode, q est la charge électrique, k est la constante de Boltzmann, T en Kelvin est la température de la jonction p-n, et a est le facteur d'idéalité de la diode.

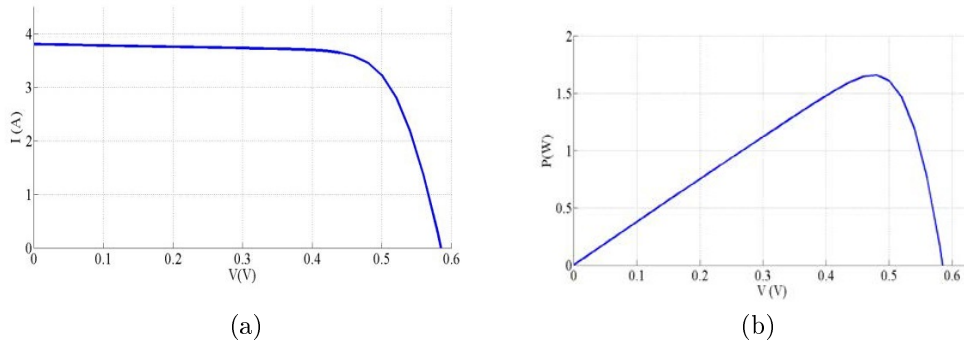


FIGURE 3.3 – Caractéristiques I-V et P-V d'une cellule photovoltaïque MSX 60W

L'association de plusieurs panneaux PV en série et parallèle donne naissance au générateur PV (GPV), l'équation qui décrit le fonctionnement d'un générateur PV est donnée par l'équation suivante :

$$I = N_{pp}I_{pv} - N_{pp}I_o \left[\exp \left(\frac{N_{ss}V + IR_s (N_{ss}/N_{pp})}{V_{ta}N_{ss}} \right) - 1 \right] - \frac{N_{ss}V + IR_s (N_{ss}/N_{pp})}{R_p (N_{ss}/N_{pp})} \quad (3.2)$$

3.2.3 Effets des conditions climatiques sur les modules PV

3.2.3.1 Influence de l'éclairement

Les caractéristiques (I-V et P-V) du module photovoltaïque (PV) MSX 60 sous différentes valeurs de l'ensoleillement sont présentées dans la figure ci-dessous :

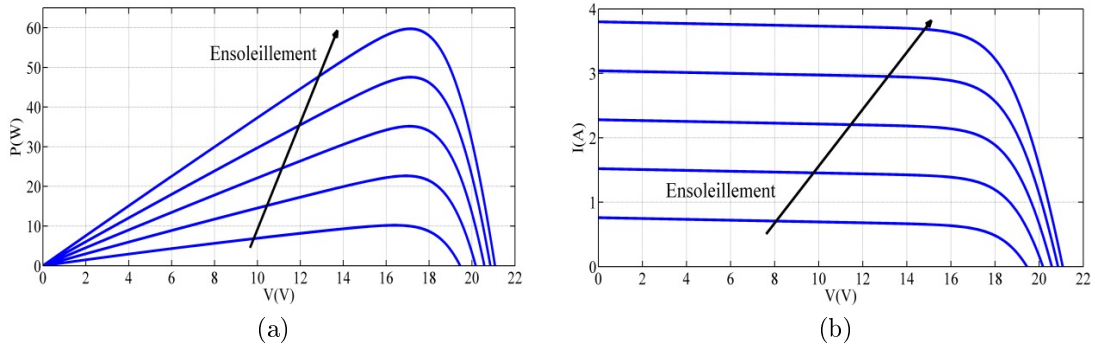


FIGURE 3.4 – Effet de l'éclairement sur la caractéristique P-V et I-V pour T=cste

3.2.3.2 Influence de la température

Les caractéristiques (I V et PV) du module photovoltaïque (PV) MSX 60 sous différentes valeurs de Température sont présentées dans la figure ci-dessous :

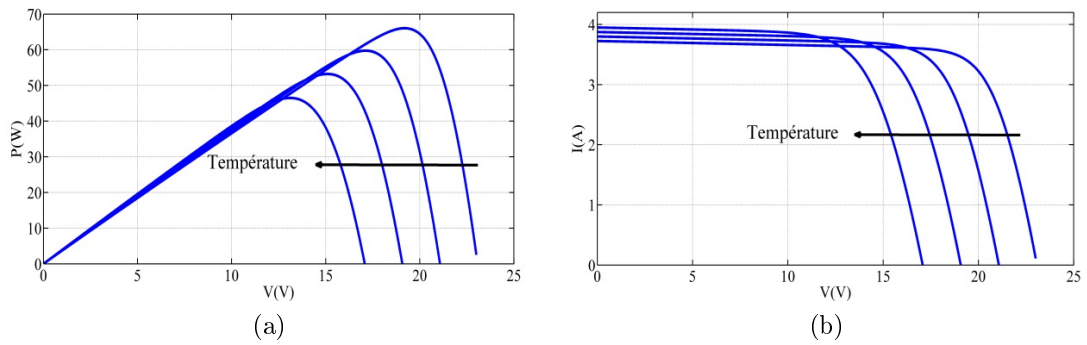


FIGURE 3.5 – Effet de la Température sur la caractéristique P-V et I-V pour G41=cste

3.3 Modélisation du convertisseur dc-dc

Dans cette partie nous présentons la modélisation des deux types de convertisseurs DC/DC (Boost et Buck-Boost), utilisés pour générer les tensions et les courants souhaités. Ce type de convertisseurs n'est constitué que par des éléments réactifs (Selfs, Capacités) qui, dans le cas idéal, ne consomment aucune énergie.

3.3.1 Convertisseur dc-dc boost

Convertisseur Boost présenté dans la (Figure 3.6), comporte un condensateur et une bobine d'inductance, et deux commutateurs complémentaires. Dans le cas du convertisseur élévateur de tension, la tension de sortie est supérieure à la tension d'entrée. Les interrupteurs sont ouverts et fermés alternativement avec un taux de fréquence de commutation *PWM*. Tant que le transistor est ON, la diode est éteinte, en train de s'inverser biaisée. La tension d'entrée, appliqué directement à l'inductance *L*. Lorsque le transistor est éteint, la charge est alimentée à la fois par la source d'entrée et le filtre *LC*. La sortie qui en résulte est un marché réglementé tension de grandeur supérieure à la tension d'entrée. Le fonctionnement du convertisseur sera analysé selon l'état des interrupteurs. [7]

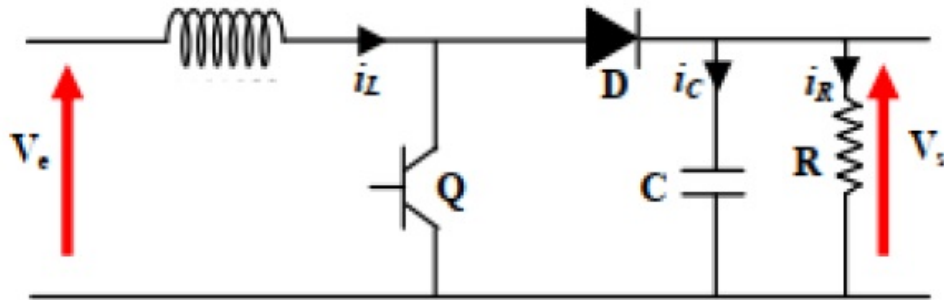


FIGURE 3.6 – Schéma de convertisseur Boost.

La première période ($0 \leq t \leq dT$) : Le transistor est à l'état ON et la diode OFF. Durant cette période, correspondant au cycle de *PWM* signal de conduite, le schéma équivalent du circuit est présenté ci-dessous. En cette période l'inductance stocke l'énergie.

Pour cette période d'exploitation, la tension de sortie et le courant dans l'inducteur i_L satisfont les équations suivantes :

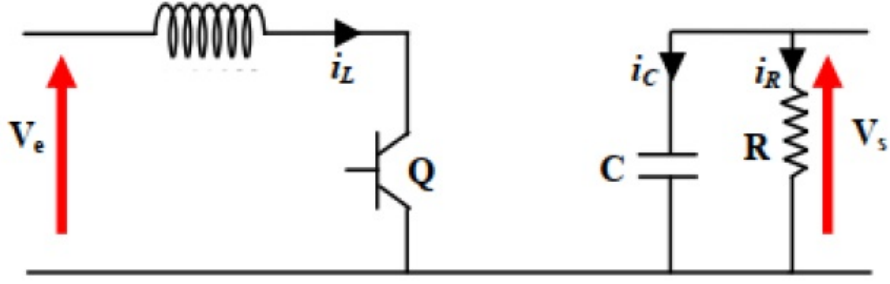


FIGURE 3.7 – Schéma de convertisseur Boost état ON.

$$\begin{cases} \frac{di_L}{dt} = \frac{1}{L} (V_e) \\ \frac{dV_c}{dt} = \frac{1}{C} \left(\frac{V_s}{R} \right) \end{cases} \quad (3.3)$$

La deuxième période ($dT \leq t \leq T$) : le transistor OFF et la diode ON Dans le moment où le commutateur à transistor à l'état OFF, la tension aux bornes de l'inductance va changer la polarité et diode passera à l'état. Le schéma équivalent du convertisseur au cours de cette période est indiqué dans la figure ci-dessous :

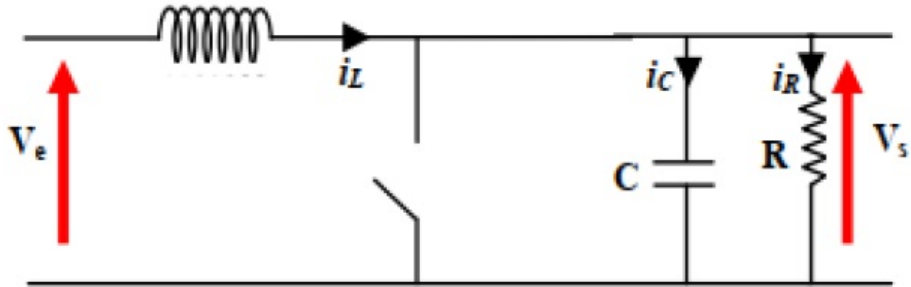


FIGURE 3.8 – Schéma de convertisseur Boost état Off.

Pour cette période d'exploitation, la tension de sortie et le courant dans l'inducteur i_l satisfont les équations suivantes :

$$\begin{cases} \frac{di_L}{dt} = \frac{1}{L} (V_e - V_c) \\ \frac{dV_c}{dt} = \frac{1}{C} \left(i_L - \frac{V_s}{R} \right) \end{cases} \quad (3.4)$$

À partir de ces deux dernières équations, on obtient le modèle moyenne de convertisseur à

la condition continue CCM comme suit :

$$\begin{cases} \frac{di_L}{dt} = \frac{1}{L} V_e - (1 - u) \frac{1}{L} V_c \\ \frac{dV_c}{dt} = \frac{1}{C} \left((1 - u) i_L - \frac{V_c}{R} \right) \end{cases} \quad (3.5)$$

3.3.2 Convertisseur Buck-Boost

Les interrupteurs sont ouverts et fermés alternativement avec un taux de fréquence de commutation *PWM*. Tant que le transistor est ON, la diode est éteinte, en train de s'inverser biaisée. La tension d'entrée, appliqué directement à l'inductance *L*, détermine un courant ascendant linéaire. Le condensateur est déchargé sur le circuit de charge. Lorsque le transistor est éteint, la charge est alimentée par le filtre *LC*. La sortie qui en résulte est une tension réglée de grandeur inférieure ou supérieure à l'entrée tension, en fonction de la valeur de cycle de service, mais il a une polarité inverse. Le convertisseur opération sera analysée en fonction de l'état ON ou OFF des interrupteurs. [7]

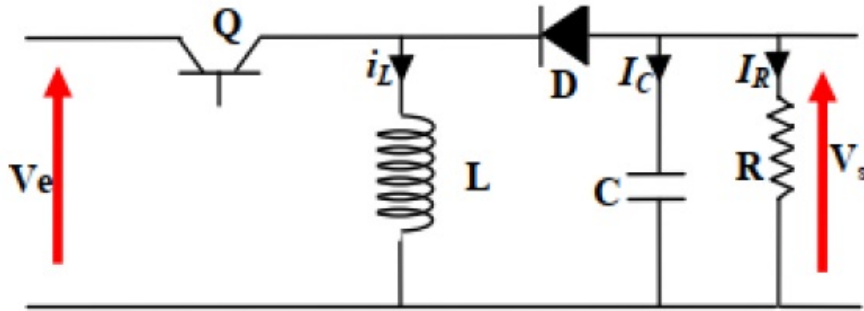


FIGURE 3.9 – Schéma de convertisseur Buck- Boost.

La première période ($0 \leq t \leq dT$) : Le transistor est à l'état ON et la diode OFF. Durant cette période, correspondant au cycle de *PWM* signal de conduite, le schéma équivalent du circuit est présenté ci-dessous. En cette période L'inductance stocke l'énergie.

Pour cette période d'exploitation, la tension de sortie et le courant dans l'inducteur i_L satisfont les équations suivantes :

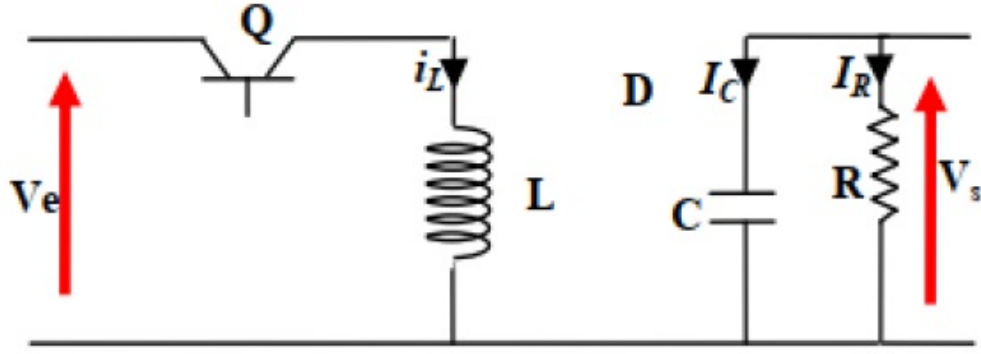


FIGURE 3.10 – Schéma buck-Boost d'un Interrupteur ON.

$$\begin{cases} \frac{di_L}{dt} = \frac{1}{L} (V_e) \\ \frac{dV_c}{dt} = \frac{1}{C} \left(\frac{V_s}{R} \right) \end{cases} \quad (3.6)$$

La deuxième période ($dT \leq t \leq T$) : le transistor OFF et la diode ON Dans le moment où le commutateur à transistor à l'état OFF, la tension aux bornes d'inducteur sera changée la polarité et la diode s'allume à l'état. Le schéma équivalent de convertisseur cours de cette période est indiquée dans la figure ci-dessous

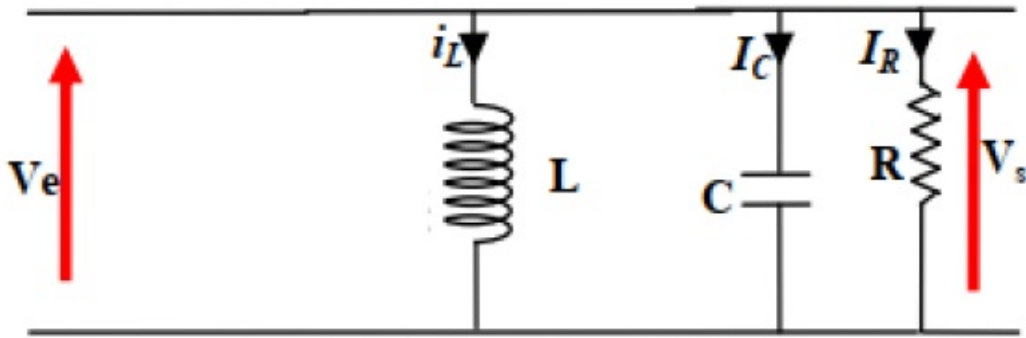


FIGURE 3.11 – Schéma buck-Boost d'un Interrupteur OFF.

Pour cette période d'exploitation, la tension de sortie et le courant dans l'inducteur i_L satisfont les équations suivantes :

$$\begin{cases} \frac{di_L}{dt} = \frac{1}{L} (V_e - V_c) \\ \frac{dV_c}{dt} = \frac{1}{C} \left(i_L - \frac{V_c}{R} \right) \end{cases} \quad (3.7)$$

À partir ces deux dernières équations, on obtient le modèle moyenne de convertisseur à la

condition continue CCM comme suit :

$$\begin{cases} \frac{di_L}{dt} = \frac{1}{L} V_e - (1 - u) \frac{1}{L} V_c \\ \frac{dV_c}{dt} = \frac{1}{C} \left((1 - u) i_L - \frac{V_c}{R} \right) \end{cases} \quad (3.8)$$

3.4 Contrôle du bus continu

Le contrôle du bus continu s'effectue par la charge et la décharge de la batterie a travers un convertisseur DC/DC Buck-Boost bidirectionnel en courant qui relie la batterie au bus continu comme représenter dans la Figure 3.12 avec sa boucle de régulation. Le principe de régulation consiste en : Lorsque la tension aux bornes du bus continu est inférieure à la tension de référence, le courant de référence I_{Lref} généré par le régulateur PI est positif, ce qui impose une décharge de la batterie en actionnant l'interrupteur Q donc fonctionnement Boost (1ère configuration). Lorsque la tension aux bornes du bus continu est supérieure à la tension de référence, le courant de référence I_{Lref} généré par le régulateur PI est négatif, ce qui impose une charge de la batterie en actionnant l'interrupteur D donc fonctionnement Buck (2ème configuration). [10]

3.5 Modélisation du hacheur réversible en courant

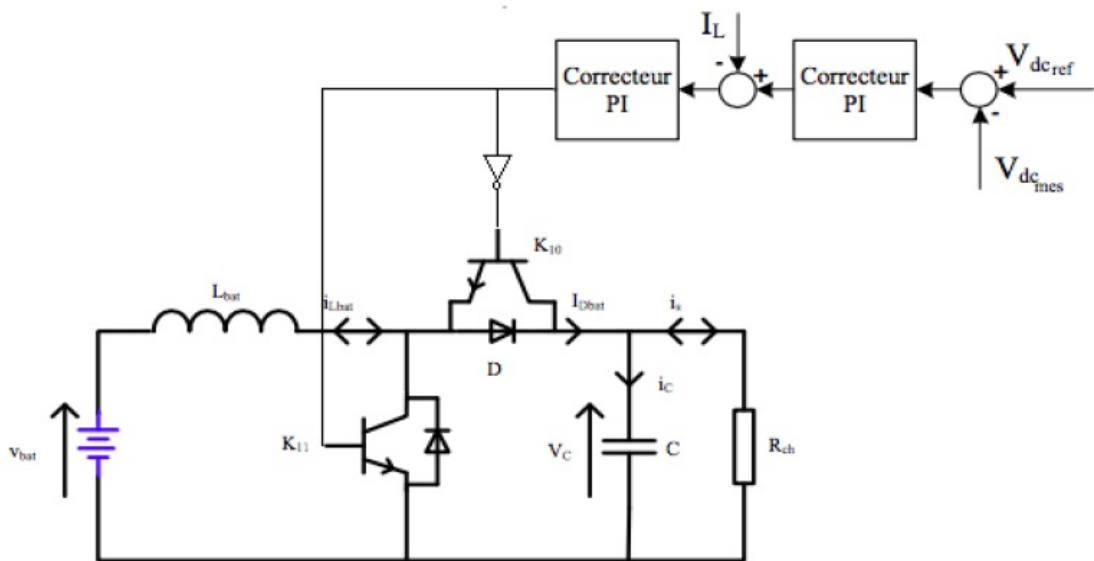


FIGURE 3.12 – Circuit équivalent de commande de la batterie.

Les équations associées à la première configuration sont [1] :

Intervalle $[0, \alpha_{k11}T_s]$

$$V_{Lbat} = V_{bat} \quad V_{Lbat} = V_{bat} - V_s$$

$$i_c = -i_s i_c = i_{lbat} - i_s$$

Ce qui conduit au modèle suivant, en utilisant le principe de la valeur moyenne

$$V_{Lbat} = 1 - (1 - \alpha_{k11})V_c + V_{batt}$$

$$I_{Lbat} = (1 - \alpha_{k11})I_{Lbat} - I_s$$

Les équations associées à la deuxième configuration sont :

Intervalle $[0, \alpha_{k10}T_s]$

$$V_{Lbat} = V_{bat} - V_s$$

$$i_c = i_{Lbat} - i_s$$

ce qui nous offre le modèle moyen suivant : $V_{Lbat} = -\alpha_{k10}V_c + V_{bat}$

$$i_c = \alpha_{k10}i_{Lbat} - i_s$$

Puisque les deux interrupteurs sont en fonctionnement complémentaires alors : $\alpha_{k10} = 1 - \alpha_{k11}$

On déduit que pour les deux configurations, le hacheur a le modèle de connaissance, de ce modèle on peut établir le modèle moyen de contrôle de tension du bus continu par la méthode d'inversion du modèle comme il est représenté dans la figure 3.12

3.6 Modélisation de la batterie

Il existe dans la littérature une large variété de modèles de batterie, ces modèles sont utilisés pour déterminer l'état de charge ou pour prédire la durée de vie des batteries. La plupart des modèles sont constitués de deux parties, l'une décrivant le modèle de capacité et l'autre, le modèle de tension de la batterie. [1]

La capacité est une des caractéristiques les plus importantes d'une batterie. Cette capacité représente la quantité de courant qui peut être extraite d'une électrode.

Le modèle de la tension fournit l'amplitude de la tension aux bornes de la batterie. Cette tension est influencée par la profondeur de la charge et de la décharge, les modèles de tension sont généralement basés sur des équations qui relient la tension au courant et à l'état de charge. L'une des modélisations de la batterie la plus simple est sa modélisation par une source idéale

de tension, une capacité et une résistance qui représente la résistance interne de la batterie comme illustré dans la figure [3.13](#)

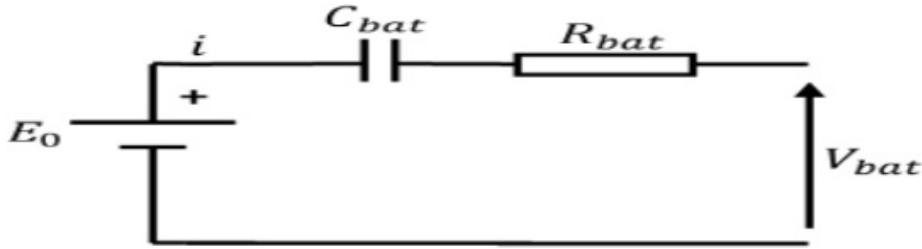


FIGURE 3.13 – Circuit équivalent du modèle de la batterie simplifié.

3.7 Algorithmes de recherche du point de puissance maximale (MPPT)

Le but d'exploiter un algorithme MPPT est de garantir dans toutes les conditions d'environnement climatique (en particulier le rayonnement solaire et la température) l'extraction de la puissance maximale des modules PV. Ceci est réalisé en faisant correspondre le point de puissance maximale (MPP) du PV avec la tension et le courant de fonctionnement du convertisseur de puissance. Lors de l'augmentation ou de la diminution de la température ou/et de l'irradiation, l'énergie solaire varie en fonction de ces changements atmosphériques, le point de puissance maximale évolue donc et correspond à une tension et un courant particulier.

3.7.1 Perturbation Et Observation (P&O, Perturb And Observe)

La méthode P&O est généralement la plus utilisée en raison de sa simplicité et sa facilité de réalisation. Comme son nom l'indique, cette méthode repose sur la perturbation (une augmentation ou une diminution) de la tension V_{ref} , ou du courant I_{ref} , et l'observation de la conséquence de cette perturbation sur la puissance mesurée ($P = VI$). Le principe de commande P&O consiste à provoquer une perturbation de faible valeur sur la tension V_{pv} , ce qui engendre une variation de la puissance.

La figure 3.14 représente l'algorithme classique de la P&O, où l'évolution de la puissance est analysée après chaque perturbation de tension. [3]

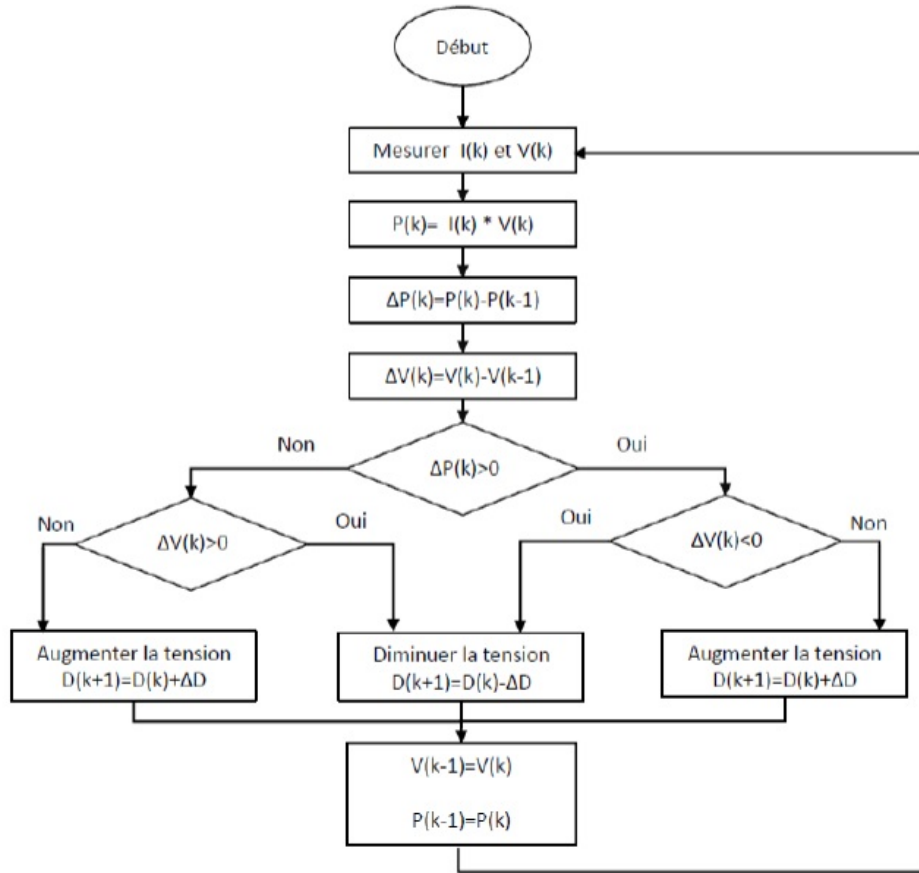


FIGURE 3.14 – Algorithme de la méthode P&O.

3.8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons décrit le détail de la modélisation de la chaîne de conversion d'énergie adoptée dans ce travail, le modèle de GPV, convertisseur dc-dc, la batterie et l'ensemble des algorithmes (MPPT, MLI et boucle de régulation cascade) de contrôles ont été abordés.

Chapitre 4

Résultas de simulation

Ce chapitre sera focalisé sur la simulation du système PV global avec le système de stockage et l'algorithme MPPT.

4.1 Introduction

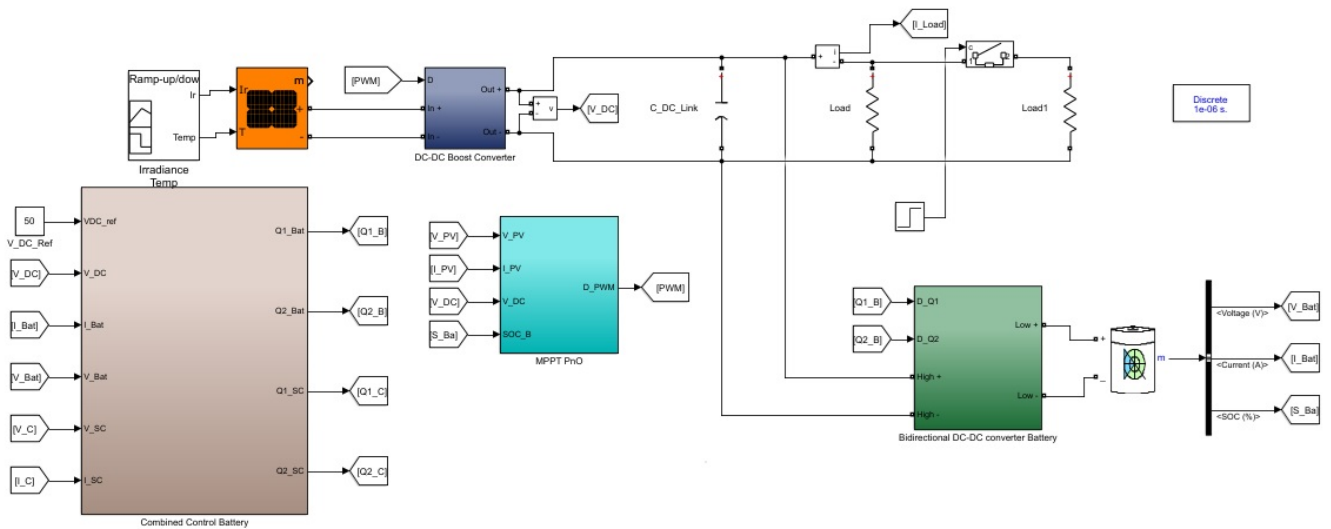


FIGURE 4.1 – Système PV global sous MATLAB Simulink

L'ensemble du système est modélisé et mis en oeuvre dans le logiciel MATLAB Simulink (Figure 4.1) afin de vérifier et simuler le système global dans différentes conditions climatiques et valeurs de charge. Le système PV (WU-120 figure 4.2) est constitué d'un GPV (2 panneaux en série et 4 panneaux en parallèle) d'un algorithme P&O et la commande MLI. Le hacheur réversible en courant avec sa commande PI en cascade pour assurer la charge et la décharge de

la batteie.

	(1) STC 1000W/m ²	(2) NOCT 800W/m ²
Maximum power (P_{max})	120W	86.4W
Voltage at P_{max} (V_{mpp})	18.1V	16.2V
Current at P_{max} (I_{mpp})	6.6A	5.3A
Short circuit current (I_{sc})	6.8A	5.5A
Open circuit voltage (V_{oc})	22.2V	20.2V
Module efficiency	14.4%	
Tolerance (P_{max})	+10% / -5%	
Nominal voltage	12V	
Efficiency reduction at 200W/m ²	<5% reduction efficiency 13.7%	
Limiting reverse current	6.8A	
Temperature coefficient of I_{sc}	0.105%/°C	
Temperature coefficient of V_{oc}	-0.360%/°C	
Temperature coefficient of (P_{max})	-0.45%/°C	
(3) NOCT	47±2°C	

FIGURE 4.2 – Paramètre du module PV WU-120

Le profil d'irradiation proposé dans ce manuscrit est proposé comme suit : de 0s à 0.6s $G = 1000W/m^2$ et de 0.6s jusqu'à 2 s $G = 500W/m^2$, une variation de la charge a été provoquée à l'instant 1.3s.

4.2 Introduction

4.3 GPV + Convertisseur dc-dc

La figure [4.3](#) présente la tension du GPV, le courant GPV et la puissance du GPV, il est clair que l'algorithme MPPT rejoint le point MPP pour chaque valeur d'irradiation. On voit bien à l'instant 1.3s une petite oscillation apparue au niveau des trois allures justifié par la variation de la charge au niveau du buc dc.

La tension de la batterie est 24V, initialement chargé à 50%, pendant la première phase ; la batterie est en phase de charge (le courant de la batterie est strictement négatif), voir figure [4.3](#) jusqu'à l'instant 0.6s ou le GPV diminue sa puissance générée à cause de la diminution de l'irradiation. Puis entre 0.6s et 1.3s l'état de charge de la batterie décroît et la batterie commence à fournir l'énergie à la charge avec le GPV. Puis à l'instant 1.3s, ou la charge a été augmentée la batterie compense le manque de puissance pour assurer la continuité de service

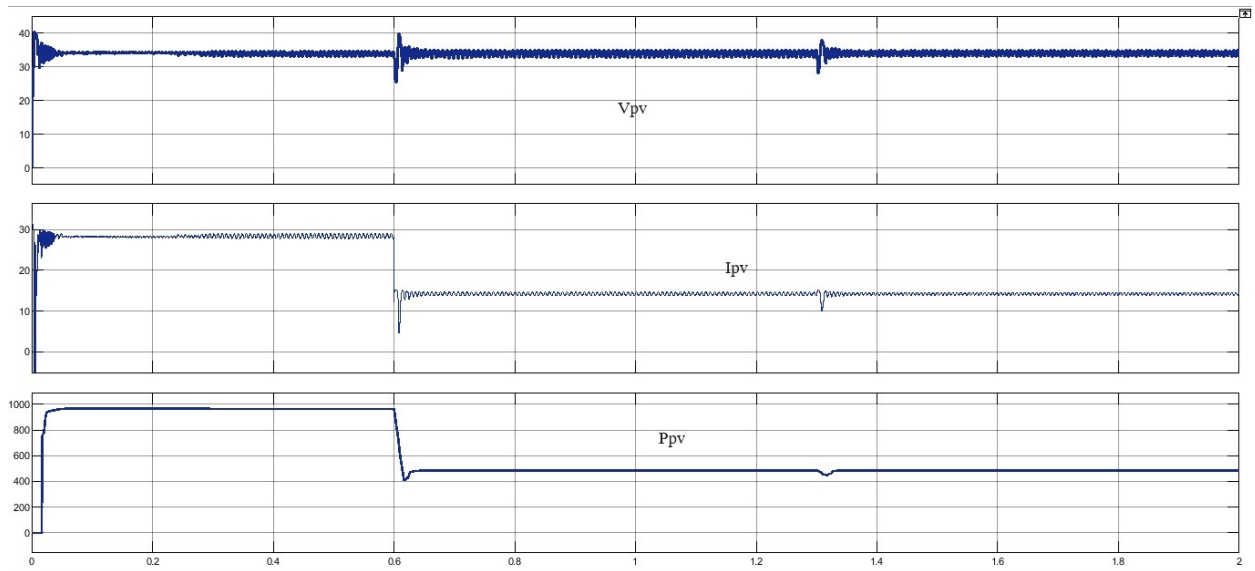


FIGURE 4.3 – La tension du GPV (V_{pv}), le courant du GPV (I_{pv}) et la puissance du GPV (P_{pv})

car le GPV ne peut pas donner plus d'énergie dans ce cas. La tension de la batterie reste pratiquement constante comme il est illustré dans la figure.

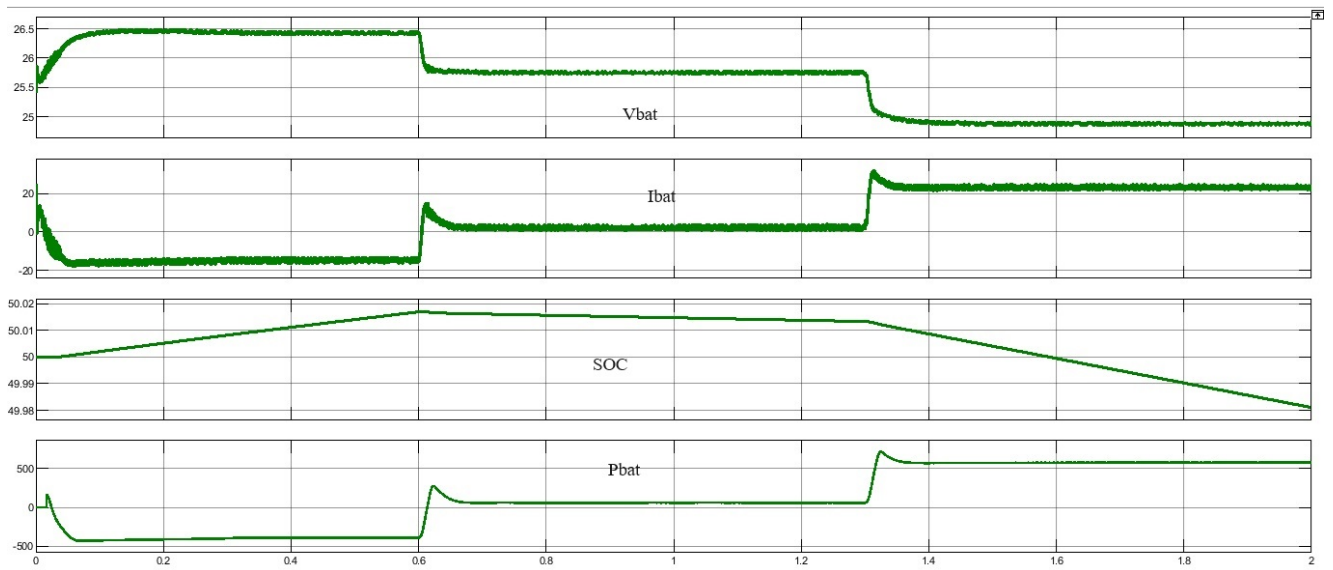


FIGURE 4.4 – Tension de la batterie V_{bat} , Courant de la batterie I_{bat} , L'état de charge SOC, Puissance de la batterie P_{bat}

4.4 Hacheur réversible en courant + batterie

Dans cette partie on abordera la régulation de la tension continu ainsi que la charge et la décharge de la batterie. La tension du bus dc est fixée à 50 V, la tension du bus dc suit

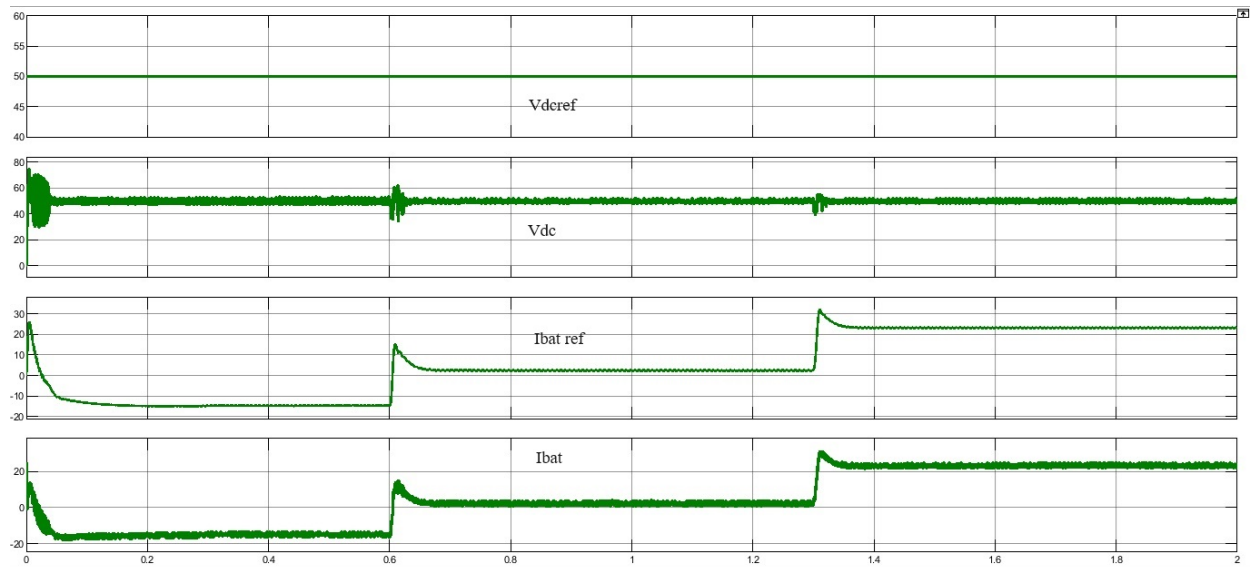


FIGURE 4.5 – La tension de bus continu V_{dref} , la tension du bus continu V_{dc} , le courant de la batterie de référence I_{batref} , le courant de la batterie I_{bat}

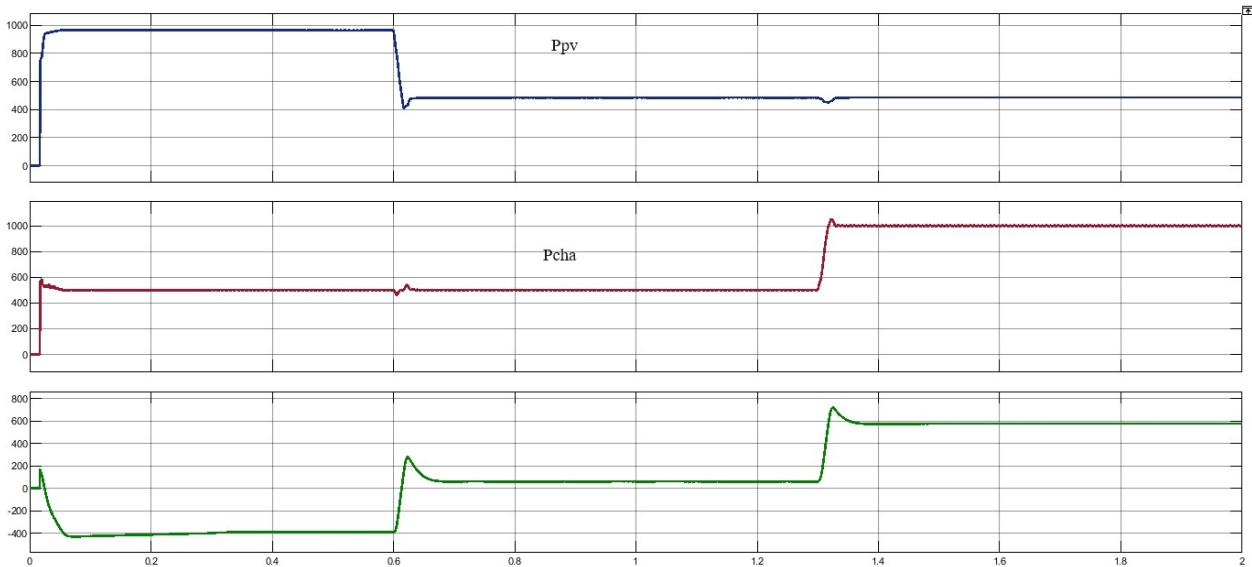


FIGURE 4.6 – La puissance du GPV P_{pv} , la puissance de la charge P_{cha} , la puissance de la batterie P_{bat}

parfaitement sa valeur de référence comme il est montré sur la figure 4.5, pareil pour le courant de la batterie, la sortie du régulateur PI est bien le courant de la batterie de référence puis après comparaison avec le courant mesuré la sortie du régulateur est le signal de commande pour générer les signaux de commande. La figure 4.6 décrit l'écoulement de puissance du système global, le GPV dans la première phase contribue à l'alimentation de la charge et la charge de la batterie comme il est illustré dans la figure puissance de la batterie négative puis après la diminution de la la puissance du GPV, la puissance de la batterie devient positive pour

compenser le manque de la puissance demandée par la charge, le même scénario est remarqué après la variation de la charge.

4.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons simulé l'ensemble du système avec les algorithmes développés afin de valider nos propositions dans ce travail. Les résultats de simulation ont été prouvés leur efficacités et validités. Comme perspective à ce travail, la propositions des algorithmes de gestion d'énergie basés sur l'intelligence artificiel est recommandé

Chapitre 5

Conclusion générale

Au terme de ce travail, nous avons pu modéliser et contrôler un système PV autonome et le valider par simulation.

Ce travail nous a permis de mettre en valeur nos connaissances théoriques préalables, qu'on a cumulées pendant toute la durée de nos études. Il nous a permis aussi d'acquérir une expérience dans la programmation et la simulation par Matlab Simulink.

Pour arriver à ce résultat, nous avons été amenés dans un premier temps une étude détaillée sur les systèmes renouvelables en configuration autonome en illustrant l'importance du système de stockage.

Dans un second temps, nous avons développé la modélisation mathématique de la source renouvelable les étage d'adaptation (convertisseur dc-dc) et l'élément de stockage.

En dernier temps, les résultats obtenus par simulation sous l'environnement Simulink /Matlab prouvent la validité de notre système particulièrement en smart grids ou les consommateurs devient consomme acteur.

En conclusion, on peut affirmer que l'objectif de ce mémoire est atteint. Les résultats obtenus sont très satisfaisantes et montrent l'efficacité des algorithmes proposé avec la batterie pour le stockage de l'énergie pour les smart grids ou embarquée pour le véhicule électrique.

Bibliographie

- [1] Abderrahmane AGROUM. Etude d'un système photovoltaïque autonome, mémoire de master, école nationale polytechnique, 2017. [18 juin 2017].
- [2] BELABBAS Belkacemi. Gestion des flux énergétiques d'un système de production d'énergie de sources renouvelables avec stockage en vue de la conception des réseaux électriques intelligents "smart grid", thèse de doctorat, école nationale polytechnique, 2018. [04 / 06 / 2018].
- [3] Boualem BOUKEZATA. Etude et commande d'une chaîne de conversion d'énergie d'un système solaire photovoltaïque, thèse doctorat, université de sétif1, 2017. [27-mars-2017].
- [4] NDIAYE Papa Amadou et KAWTHER Achari. Production d'énergie électrique à partir d'un système photovoltaïque, mémoire de master, université 8 mai 1945 – guelma, 2019. [02 / 07 / 2019,].
- [5] HELLEL EL Kadi. Fiabilité des systèmes énergétiques multi-sources, t h e s e de doctorat, université mouloud mammeri de tizi-ouzou, 2019. [07 octobre 2019].
- [6] Dris Mida. Fiabilité des systèmes énergétiques multi-sources, t h e s e de doctorat, université mouloud mammeri de tizi-ouzou, 2019. [07 octobre 2019].
- [7] Mr. HAMMOU ABDELHAKIM Mr. FLIH ABOU BAKRE. Utilisation des supercondensateurs et des batteries pour le stockage de l'énergie embarquée pour véhicule électrique, mémoire de master, université abdelhamid ibn badis mostaganem, 2022. [11 / 07 / 2022].
- [8] M.ZEGGAOUI Said. Stockage de l'énergie solaire, mémoire de master, école nationale polytechnique, 2016. [11/07/2016].
- [9] Seïma Shili. Contrôle des circuits d'équilibrage des systèmes de stockage d'énergie (supercondensateurs) en vue d'estimer et d'améliorer leur durée de vie, thèse de doctorat, université de lyon, 2016. [11/07/2016].

- [10] MECHEHAT Tamader. Contribution à la gestion d'énergie d'un système renouvelable : panneau photovoltaïque / batterie, mémoire de master, université kasdi merbah ouargla, 2014. [Online ; accessed 16-January-2014].

Résumé

L'énergie solaire PV représente la source énergétique la plus et mieux partagée sur la terre. La configuration autonome a été préférée pour les applications des sites isolés et smart grids. Ce travail s'intéresse essentiellement sur l'étude et la modélisation d'un système de conversion PV avec stockage d'énergie. Les résultats de simulation dans l'environnement MATLAB/SIMULINK montrent les performances du modèle et confirment l'efficacité des approches proposés pour le stockage de l'énergie issue d'une source d'énergie renouvelable.

Mots clés : énergie solaire PV, Modélisation, générateur photovoltaïque, batterie.

Abstract

Solar PV is the most widely shared energy source on earth. The stand-alone configuration has been preferred for isolated site and smart grid applications. This work focuses on the study and modeling of a PV conversion system with energy storage. Simulation results in the MATLAB/SIMULINK environment show the performance of the model and confirm the effectiveness of the proposed approaches for storing energy from a renewable energy source.

Keywords : PV solar energy, Modeling, photovoltaic generator, battery.

تمثل الطاقة الشمسية الكهروضوئية مصدر الطاقة الأكثر والأفضل على وجه الأرض. تم تفضيل التكوين المستقل للمواقع المعزولة وتطبيقات الشبكة الذكية.

يركز هذا العمل بشكل أساسي على دراسة ونمذجة نظام تحويل الطاقة الكهروضوئية مع تخزين الطاقة. تظهر نتائج المحاكاة في بيئة MATLAB/SIMULINK أداء النموذج وتؤكد فعالية الأساليب المقترحة لتخزين الطاقة من مصدر الطاقة المتجددة.

الكلمات المفتاحية: الطاقة الشمسية الكهروضوئية، النمذجة، المولدات الكهروضوئية، البطارية.