

UNIVERSITÉ IBN-KHALDOUN DE TIARET
FACULTÉ DES SCIENCES APPLIQUÉES
DÉPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE



MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

Pour l'obtention du diplôme de Master

Domaine: Sciences et Technologie

Filière : Génie électrique

Spécialité : *Automatique et Informatique Industrielle*

Développement d'un algorithme de la gestion énergétique d'un système PV/Stockage.

Préparé par :

TAZERKOUNET Souad

MIMOUNI Said Abdelmalek

Devant le Jury :

Nom et prénoms

Grade

Qualité

S. BELFEDHAL

MCB

Président

A. BENATTIA

MCB

Examineur

S. ZINE

MCB

Examineur

S. BELABBAS

MCA

Encadreur

S. HEROUAL

Doctorante

Invitée

Année universitaire : 2022-2023

Remerciements

Nous remercions, avant tout, ALLAH de nous avoir donné le courage, la volonté et la patience de mener à terme ce modeste travail.

Nous remercions très profondément nos encadrants Mr. **BELABBAS Belkacem** et Mlle. **HEROUAL Samira** qui ont accepté de nous encadrer, nous les remercions pour les efforts et le temps qu'ils nous ont réservé et pour leurs encouragements.

Nous remercions très chaleureusement les membres de jury qui ont accepté de juger ce travail

Notre reconnaissance va également à nos enseignants de la formation « Automatique » en particulier ceux du département de Génie électrique, pour leurs honorables tâches durant notre période de formation.

Merci, à tous ceux qui nous ont aidés de près ou de loin pour accomplir ce travail.

الملخص:

في هذا العمل، درسنا إدارة الطاقة لنظام بطارية الليثيوم الضوئية لتحسين جودة الطاقة وتحقيق استقرار النظام. لاستخراج أقصى قدر من الطاقة من المولد الكهروضوئي، طبقنا تحكم رقمي MPPT (الحد الأقصى لتتبع نقطة الطاقة) باستخدام طريقة "الاضطراب والمراقبة" لاستخراج الطاقة المثلى بناءً على بيانات الأرصاد الجوية المتغيرة مثل الإشعاع. يتم استخدام إدارة الطاقة في هذا النظام لضمان الاستقرار والربحية والاستقلالية للنظام الكهروضوئي المتصل بالبطارية مع منظم PI والحمولة الكهربائية. قمنا بمحاكاة نظامنا باستخدام برنامج MATLAB / SimPower System. تظهر نتائج المحاكاة فعالية خوارزمية إدارة الطاقة المقترحة.

الكلمات المفتاحية: المولدات الكهروضوئية، البطارية، الاضطراب والمراقبة، إدارة الطاقة

Résumé :

Dans ce travail, on a étudié la gestion énergétique d'un système PV/batterie type lithium afin d'améliorer la qualité d'énergie et avoir un système stable. Pour d'extraire le maximum d'énergie de générateur photovoltaïque, on a appliqué une commande numérique MPPT type « perturbation et observation » pour extraire la puissance optimale pour des données météorologiques variables tel que l'irradiation. La gestion énergétique est utilisée pour ce système pour assurer la stabilité, rentabilité et l'autonomie du système PV connecté avec la batterie avec le régulateur PI et la charge. Nous avons simulé notre système sous le logiciel MATLAB /SimPower System. Les résultats de simulation montrent que l'algorithme de la gestion énergétique proposée est efficace et performant.

Mots clés : générateur photovoltaïque, batterie, perturbation et observation, La gestion énergétique

Abstract :

In this work, we studied the energy management of a PV/lithium battery system to improve energy quality and achieve system stability. To extract the maximum energy from the photovoltaic generator, we applied a digital MPPT (Maximum Power Point Tracking) control using the "perturbation and observation" method to extract the optimal power based on variable meteorological data such as irradiation. Energy management is employed in this system to ensure stability, profitability, and autonomy of the PV system connected to the battery with the PI regulator and load. We simulated our system using MATLAB/SimPower System software. The simulation results demonstrate the effectiveness and performance of the proposed energy management algorithm.

Keywords: photovoltaic generator, battery, disturbance and observation, energy management

LISTE DES SYMBOLES :

T: température °c

Q: charge de l'électron

E_g : énergie de la bande interdite (V)

N_s : nombre de cellules en série

N_p : nombre de cellules en parallèle

G : éclairement (W/m²)

IL: courant photonique (A)

R_s : résistance série (Ω)

R_{sh} : résistance shunt (Ω)

I_{cc} : courant de court-circuit (A)

V_{co} : tension du circuit ouvert (V)

T: période (V)

d: rapport cyclique

K: interrupteur

C : capacité

V_i Et V_o : tensions d'entrée et de sortie de l'hacheur (V)

I_i Et I_o : courant d'entrée et de sortie (A)

SOMMAIRE

Chapitre 01 :

I Introduction.....	13
I.1 Energie photovoltaïque.....	13
I.1.1 Historique de l'énergie photovoltaïque	13
I.1.2 Energie photovoltaïque dans le monde.....	14
I.1.3 Production d'énergie photovoltaïque en Algérie.....	14
I.1.4 Les différents types de système photovoltaïques.....	15
I.1.5 Avantage et inconvénients de l'énergie photovoltaïques	17
I.2 Système de stockage d'électricité	18
I.2.1 Technologie de stockage de l'électricité.....	18
I.2.2 Choix de système de stockage	19
I.2.3 Comparaison entre les modes de stockage	20
I.3 Conclusion.....	21

Chapitre 02 :

II Introduction	23
II.1.1 Principe de fonctionnement des cellules photovoltaïques	23
II.1.2 Modélisation de la cellule photovoltaïque	23
II.1.3 Les caractéristiques d'une cellule photovoltaïque:	25
II.1.4 Puissance d'une cellule PV	25
II.1.5 Puissance maximale d'une cellule PV	25
II.1.6 Caractéristique puissance-tension et puissance-courant	26
II.2 LE CONVERTISSEUR DC/DC	26
II.2.1 Les convertisseurs DC-DC (hacheurs).....	26
II.2.2 Hacheur survolteur (boost).....	27
II.3 MPPT (maximum power point tracker)	28
II.3.1 Généralité:.....	28
II.3.2 Méthode MPPT	29
II.4 Généralité sur batterie Lithium	31
II.4.1 Classification des batteries Lithium:.....	31
II.4.2 Le modèle mathématique de la batterie Lithium-ion	32
II.4.3 Les facteurs qui influents sur la batterie Lithium.....	32
II.4.4 Avantage de la batterie Lithium.....	33
II.4.5 Inconvénients de la batterie lithium :	33
II.4.6 Hacheur dévolteur-survolteur (Buck-Boost).....	33
II.5 CONCLUSION :	35

Chapitre 03 :

III Introduction	37
III.1.1 L'importance du régulateur PI dans la gestion d'un système photovoltaïque : ..	37
III.1.2 les étape à suivre pour la conception d'un régulateur PI.....	38
III.1.3 Synthèse et structure des régulateurs PI	38
III.1.4 Le Réglage de la tension de bus continue Vdc :	38
III.1.5 La dimension du régulateur PI.....	39
III.2 L'intérêt de la gestion :	39
III.2.1 Algorithme de gestion.....	40
III.3 Résultats de simulation	41
III.3.1 Irradiation variable.....	41
III.3.2 Interpretation (irradiations variable):.....	41

III.3.3 Charge variable:.....	44
III.4 Conclusion.....	46
IV Conclusion générale	48

LISTE DES FIGURES

CHAPITRE 01 :

Figure I. 1 Capacité d'énergie solaire photovoltaïque dans le monde selon le pays (gigawatts)	6
Figure I. 2 Progression de l'énergie photovoltaïque en Algérie.	7
Figure I. 3 Systèmes photovoltaïques connectés au réseau.	8
Figure I. 4 Systèmes photovoltaïques hors réseau.	9
Figure I. 5 Systèmes photovoltaïques hybrides.	9
Figure I. 6 Systèmes photovoltaïques flottants	10
Figure I. 7 Les différents systèmes de stockage les plus répandus.	13

CHAPITRE 02 :

FIGURE II. 1 représentation en coupe d'une cellule photovoltaïque	16
FIGURE II. 2 Schéma équivalent électrique d'une cellule PV.	17
FIGURE II. 3 Caractéristique puissance-tension et puissance-courant	20
FIGURE II. 4 Convertisseur DC/DC	20
FIGURE II. 5 Schéma de principe d'un convertisseur (Boost)	21
FIGURE II. 6 Schémas équivalents du hacheur survolteur, (a) : K fermé, (b) : K ouvert	21
FIGURE II. 7 Etage d'adaptation jouant le rôle d'interface de puissance entre un GPV et une charge pour le transfert de P _{MAX} du GPV.	23
FIGURE II. 8 Fluctuation du PPM avec l'intensité d'éclairement (A) et la charge R	23
FIGURE II. 9 Organigramme de la méthode P&O.	25
FIGURE II. 10 Caractéristique de décharge du courant nominal de batterie lithium-ion (Li-Ion)	27
FIGURE II. 11 Schéma de principe d'un convertisseur dévolteur-survolteur	29
FIGURE II. 12 Schémas équivalents du hacheur survolteur, (a) : K fermé, (b) : K ouvert ...	30

CHAPITRE 03 :

FIGURE III. 1 Schéma globale de la chaîne complète.	33
FIGURE III. 2 Schéma de commande utilisant la structure PI	35
FIGURE III. 3 Schéma de Réglage de la tension de bus continue V _{dc}	35
FIGURE III. 4 L'organigramme de gestion d'énergie	38
FIGURE III. 5 : Schéma de simulation de la chaîne complète sous une irradiation variable	38
FIGURE III. 6 Irradiation variable	39
FIGURE III. 7 La puissance photovoltaïque.	39
FIGURE III. 8 la puissance de la charge	40
FIGURE III. 9 Etat de charge de la batterie	40
FIGURE III. 10 La puissance de la batterie	40
FIGURE III. 11 Schéma de simulation de la chaîne complète sous une charge variable	41
FIGURE III. 12 irradiation constant	42
FIGURE III. 13 la puissance photovoltaïque	42
FIGURE III. 14 La puissance de la charge.	42
FIGURE III. 15 La puissance de la batterie	43
FIGURE III. 16 L'état de charge de la batterie	43

LISTE DES TABLEAU

CHAPITRE 01 :

Tableau I. 1 comparaison entre les modes de stockage de l'énergie électrique..... 14

***Introduction
Générale***

Les énergies renouvelables sont des sources d'énergie qui se renouvellent naturellement et qui sont considérées comme des alternatives durables et écologiques aux combustibles fossiles. Les principales sources d'énergies renouvelables sont le soleil, le vent, l'eau, la biomasse et la géothermie [1],[2].

L'énergie solaire est l'une des formes d'énergie renouvelable les plus courantes et les plus accessibles. Elle est produite à partir de l'énergie du soleil, qui est convertie en électricité à l'aide de panneaux solaires [3]. Les panneaux solaires sont constitués de cellules photovoltaïques qui absorbent la lumière du soleil et la transforment en électricité [4].

Cependant, l'énergie solaire est intermittente et ne peut être produite que pendant la journée, lorsque le soleil est présent. Le stockage de l'énergie est donc essentiel pour garantir un approvisionnement constant en énergie solaire. Les systèmes de stockage d'énergie permettent de stocker l'électricité produite par les panneaux solaires pendant la journée pour une utilisation ultérieure, lorsque le soleil ne brille pas. Les batteries sont le moyen le plus courant de stocker l'énergie solaire [5],[6].

Le dimensionnement de stockage optimal basé sur la partie de modélisation des composants constituant ce système et la charge de l'utilisation. A cet effet nous intéressons sur les modèles de ces composants, c'est à dire la modélisation du champ photovoltaïque, batterie, régulateur et le convertisseur [7].

Dans ce sens, les convertisseurs DC-DC constituent une partie assez importante de la chaîne de conversion. Ils sont utilisés largement pour élever les tensions et courants des panneaux photovoltaïques mais aussi dans les connexions à des batteries d'accumulateurs, les éoliennes, les systèmes hybrides.... Ces convertisseurs servent à adapter la tension d'entrée d'un système par rapport à la tension de sortie désirée.)[8].

Dans ce contexte notre mémoire de master de thème : **Développement d'un algorithme énergétique d'un système PV/stockage** est structuré de la manière suivante :

Le premier chapitre présente une description générale de la production et la croissance mondiale et locale (Algérie) de l'énergie renouvelable, Puis une généralité sur la croissance des différentes installations des centrales photovoltaïques raccordées sites isolés. Enfin, nous présentons les différents types des systèmes de stockages d'électricité et le système de contrôle et de surveillance.

Dans le premier chapitre on présente la structure physique d'une cellule PV et son principe de fonctionnement. Ensuite, on étudie la modélisation du générateur PV pour déterminer les caractéristiques $I_{pv}(V_{pv})$ et $P_{pv}(V_{pv})$ ainsi que les influences des différents paramètres climatiques et autres sur ces dernières. Ensuite, on décrit les différents systèmes

de stockage d'énergie. Ensuite, on aborde les technologies et les types de batteries ainsi que leurs caractéristiques. Enfin, on présente les différents modèles de la batterie.

Le deuxième chapitre est divisé en deux parties :

- Dans la première partie est consacré à une étude descriptive de l'ensemble des composants de Générateur Photovoltaïque (GPV). Après Nous avons présenté un type d'algorithme de MPPT pour extraire le maximum d'énergie.
- Dans la deuxième partie on aborde la modélisation d'un système de stockage de type Batterie lithium Ainsi on présentera la modélisation et le principe de fonctionnement d'un convertisseur DC-DC de type Buck-Boost qui sera utilisé pour charger et décharger la Batterie.

Le troisième chapitre est consacré au système globale PV/batterie, avec un algorithme de gestion énergétique du système étudié pour les différents scénarios possibles. Ensuite, Nous procédant à la simulation Et implémentation, puis nous étalerons les résultats.

Finalement, nous terminerons ce mémoire par une conclusion générale qui résume notre étude dans sa partie théorique et simulation des résultats.

Chapitre 1

*Généralités sur le système photovoltaïque et le
stockage d'énergie*

I Introduction

L'énergie photovoltaïque est une énergie dont la source est illimitée et non polluante et dont l'exploitation cause le moins de dégâts écologiques. Cette énergie peut être utilisée comme source d'énergie en site isolé [9].

L'un des principaux inconvénients de l'énergie solaire est son caractère intermittent, Pour une utilisation permanente, il est donc nécessaire de stocker une partie de l'énergie produite [10].

L'idée est donc de stocker l'énergie pour garantir la satisfaction de la demande à chaque instant mais aussi pour éviter d'éventuelles surtensions en cas de surproduction d'énergie. Aujourd'hui, un large éventail de technologies de stockage d'énergie est utilisé[10].

Ce chapitre commence par présenter brièvement une généralité et l'historique de l'énergie photovoltaïque et leur production au niveau mondiale et algérien ainsi que la croissance des différents systèmes photovoltaïques raccordés sites isolés. Nous avons étudié aussi les différentes Système de stockage d'électricité et leurs inconvénients et avantages.

I.1 Energie photovoltaïque

L'énergie photovoltaïque (PV) est le produit de la conversion directe du rayonnement solaire au moyen de piles solaires. Il s'agit de raccorder des modules solaires ensemble jusqu'à l'obtention de la puissance électrique désirée. Un générateur photovoltaïque peut générer quelques watts jusqu'à plusieurs centaines, voire de milliers de watts [11].

I.1.1 Historique de l'énergie photovoltaïque

Les systèmes photovoltaïques sont utilisés depuis 40 ans. Les applications ont commencé avec le programme spatial pour la transmission radio des satellites. Elles se sont poursuivies avec les balises en mer et l'équipement de sites isolés dans tous les pays du monde, en utilisant les batteries pour stocker l'énergie électrique pendant les heures sans soleil [12].

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

1875 : Werner Von Siemens expose devant l'Académie des Sciences de Berlin un article sur

l'effet photovoltaïque dans les semi-conducteurs. Mais jusqu'à la Seconde Guerre Mondiale, le phénomène reste encore une curiosité de laboratoire.

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

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

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

1983: la première voiture alimentée par énergie photovoltaïque parcourt une distance de 4000 km en Australie.

La première cellule photovoltaïque (ou photopile) a été développée aux Etats-Unis en 1954 par les chercheurs des laboratoires Bell, qui ont découvert que la photosensibilité du silicium pouvait être augmentée en ajoutant des "impuretés". C'est une technique appelée le "dopage" qui est utilisée pour tous les semi-conducteurs mais en dépit de l'intérêt des scientifiques au cours des années, ce n'est que lors de la course vers l'espace que les cellules ont quitté les laboratoires. En effet, les photopiles représentent la solution idéale pour satisfaire les besoins en électricité à bord des satellites, ainsi que dans tout site isolé[12].

I.1.2 Energie photovoltaïque dans le monde

Selon l'Agence internationale de l'énergie (AIE), la capacité totale de production d'énergie photovoltaïque dans le monde a augmenté rapidement au cours des dernières années, passant de moins de 5 gigawatts (GW) en 2005 à environ 600 GW en 2021. Cette croissance est due à une baisse des coûts des technologies solaires, à des politiques de soutien gouvernementales, à l'augmentation de la sensibilisation du public à la durabilité environnementale, ainsi qu'à l'investissement de l'industrie [13].

Les pays les plus avancés dans l'utilisation de l'énergie photovoltaïque sont la Chine, les États-Unis, le Japon, l'Allemagne et l'Inde, qui représentent ensemble plus de 70% de la capacité totale de production d'énergie photovoltaïque dans le monde. Cependant, d'autres pays comme l'Australie, la Corée du Sud et certains pays européens comme l'Italie, l'Espagne et la France ont également connu une croissance rapide de leur capacité photovoltaïque ces dernières années [14]

En résumé, l'énergie photovoltaïque est une source d'énergie renouvelable en constante évolution qui est de plus en plus utilisée dans le monde entier. La technologie continue de s'améliorer et de devenir moins coûteuse, ce qui contribue à une croissance continue de la capacité de production d'énergie photovoltaïque [13-14].

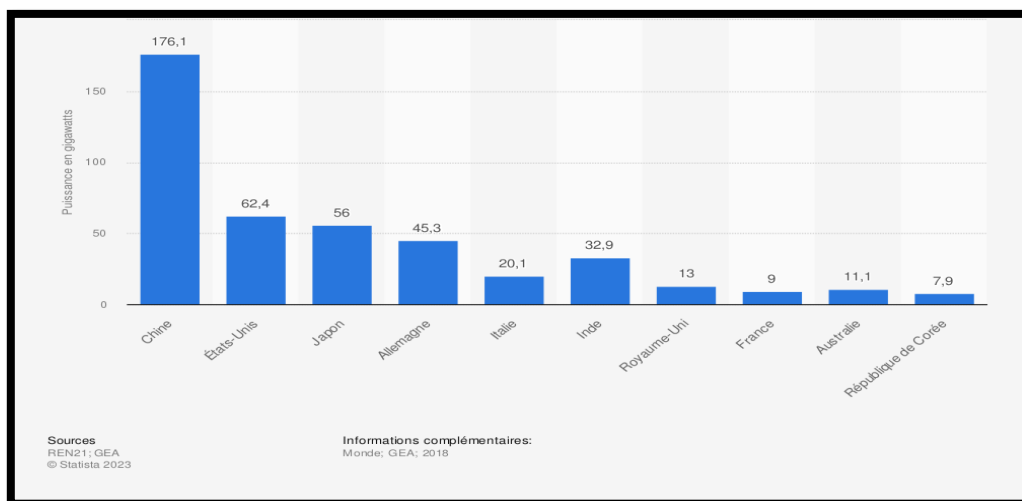


Figure I. 1 Capacité d'énergie solaire photovoltaïque dans le monde selon le pays (gigawatts)

I.1.3 Production d'énergie photovoltaïque en Algérie

L'énergie photovoltaïque en Algérie est en développement depuis plusieurs années, notamment avec l'adoption de la loi sur les énergies renouvelables en 2011, qui a pour objectif de développer la production d'électricité à partir de sources d'énergie renouvelables et de réduire la dépendance du pays aux combustibles fossiles.

L'Algérie dispose d'un potentiel important pour l'énergie solaire, avec plus de 300 jours de soleil par an dans certaines régions. Selon l'Agence Nationale pour la Promotion et la Rationalisation de l'Utilisation de l'Energie (APRUE), le potentiel de production d'énergie photovoltaïque est estimé à environ 13,5 GW.

Le gouvernement algérien a lancé plusieurs programmes pour encourager le développement de l'énergie solaire, notamment le programme national pour les énergies renouvelables et l'efficacité énergétique (PNRE) qui vise à installer 22 GW de capacité de production d'énergie renouvelable d'ici 2030, dont une grande partie sera constituée d'énergie solaire.

En 2021, l'Algérie avait une capacité de production d'énergie solaire de 418 MW, principalement installée dans des centrales solaires à grande échelle. Cependant, il y a

également un intérêt croissant pour les installations solaires de petite taille, comme les systèmes solaires domestiques et les micro-réseaux solaires dans les zones rurales.

En conclusion, l'Algérie dispose d'un potentiel important pour l'énergie solaire et est en train de développer son industrie solaire, grâce à des politiques gouvernementales favorables et à l'intérêt croissant pour les énergies renouvelables [14]

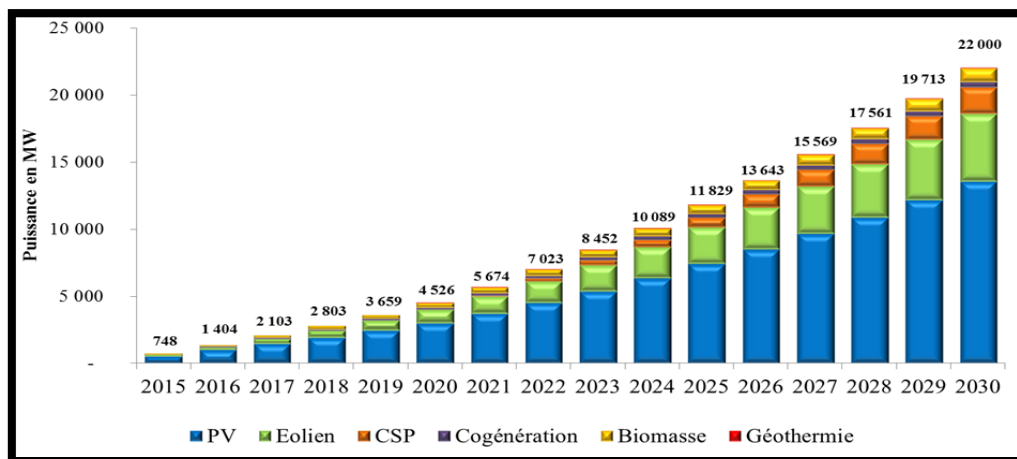


Figure I. 2 Progression de l'énergie photovoltaïque en Algérie.

I.1.4 Les différents types de système photovoltaïques

Il existe différents types de systèmes photovoltaïques, qui sont conçus pour répondre à des besoins différents en termes de production d'électricité et d'applications. Voici les principaux types de systèmes photovoltaïques :

I.1.4.1 Systèmes photovoltaïques connectés au réseau (ou Grid-Tied) :

Ces systèmes sont reliés au réseau électrique et produisent de l'électricité qui est injectée dans le réseau. Ils sont souvent utilisés dans les zones urbaines où l'électricité du réseau est disponible. Les surplus d'électricité peuvent être vendus au réseau ou stockés pour une utilisation ultérieure [15].

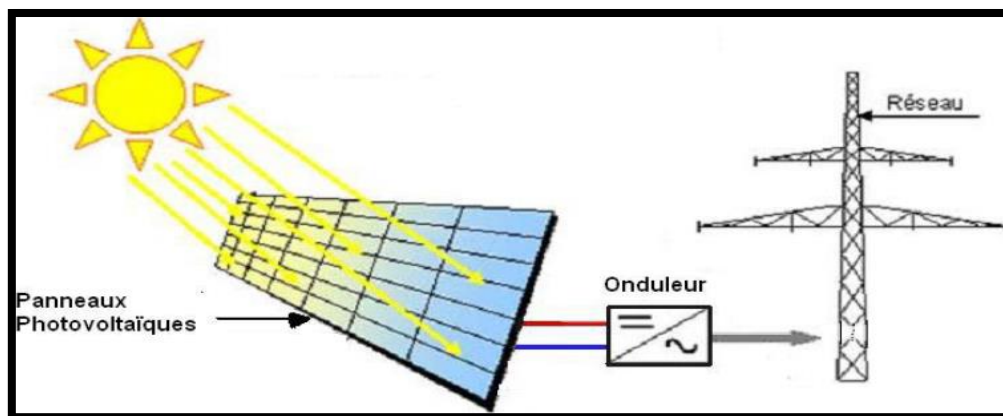


Figure I. 3 Systèmes photovoltaïques connectés au réseau.

I.1.4.2 Systèmes photovoltaïques hors réseau (ou Off-Grid) :

Ces systèmes sont autonomes et ne sont pas reliés au réseau électrique. Ils sont souvent utilisés dans les zones rurales ou isolées où l'accès à l'électricité est limité. Ces systèmes sont équipés de batteries de stockage pour permettre la production d'électricité en continu.

Les différents types de systèmes photovoltaïques autonomes sont décrits sur la figure (I.4) qui traduit les différentes possibilités offertes :

Couplage direct à une charge adaptée ou couplage avec adaptateur d'impédance MPPT (Maximum Power Point Tracking), fonctionnement au fil du soleil ou avec stockage d'énergie électrique. Le couplage direct implique un fonctionnement au fil du soleil, donc à puissance essentiellement variable au cours de la journée. Les charges typiques à courant continu qui peuvent satisfaire le critère (tension constante à puissance variable) sont les accumulateurs électrochimiques. Les charges alternatives sont les pompes à eau, c'est le pompage au fil du soleil, le stockage est néanmoins présent dans la plupart des cas une adaptation d'impédance doit être réalisée en insérant entre le générateur et sa charge électrique un dispositif électronique qui permet de forcer le système à fonctionner à sa puissance maximale la forme d'eau emmagasinée (dans un réservoir)

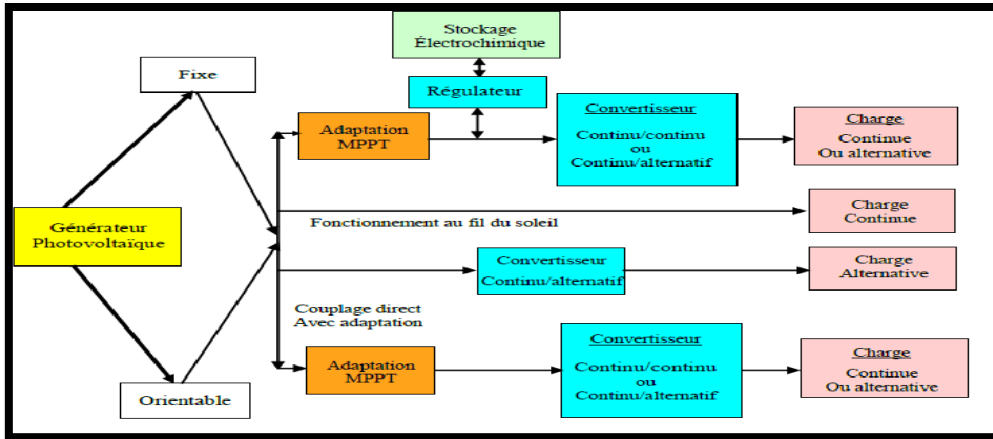


Figure I. 4 Systèmes photovoltaïques hors réseau.

I.1.4.3 Systèmes photovoltaïques hybrides :

Ces systèmes combinent plusieurs sources d'énergie, généralement solaire et éolienne, pour produire de l'électricité. Ils sont souvent utilisés dans les zones rurales où il y a un potentiel pour l'énergie éolienne.

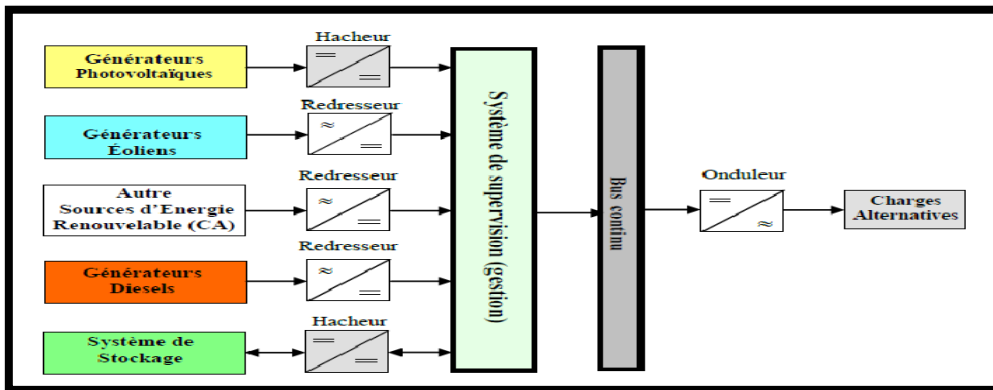


Figure I. 5 Systèmes photovoltaïques hybrides.

I.1.4.4 Systèmes photovoltaïques flottants :

Ces systèmes sont installés sur l'eau, tels que les lacs, les réservoirs ou les océans. Ils sont souvent utilisés dans les zones où l'espace terrestre est limité. Les systèmes flottants peuvent également fournir une ombre à l'eau, ce qui réduit l'évaporation et la croissance d'algues.



Figure I. 6 Systèmes photovoltaïques flottants

En résumé, il existe différents types de systèmes photovoltaïques qui sont adaptés à des besoins différents en termes de production d'électricité et d'applications. Les systèmes photovoltaïques connectés au réseau sont souvent utilisés dans les zones urbaines, tandis que les systèmes photovoltaïques hors réseau sont utilisés dans les zones rurales ou isolées. Les systèmes photovoltaïques hybrides, flottants et intégrés sont également en développement pour répondre aux besoins spécifiques de l'industrie [15].

I.1.5 Avantage et inconvénients de l'énergie photovoltaïques

L'énergie photovoltaïque a plusieurs avantages, néanmoins elle présente aussi quelques inconvénients, ils seront présentés ci-dessous :

I.1.5.1 Les avantages de l'énergie photovoltaïque

- ✓ Une haute fiabilité. L'installation ne comporte pas de pièces mobiles qui la rendent particulièrement appropriée aux régions isolées. C'est la raison de son utilisation sur les engins spatiaux.
- ✓ le caractère modulaire des panneaux photovoltaïque permet un montage simple et adaptable à des besoins énergétiques divers. Les systèmes peuvent être dimensionnés pour des applications de puissance saillant du milliwatt au Mégawatt.
- ✓ Le coût de fonctionnement est très faible vu les entre tiens réduits et il ne nécessite combustible, ni son transport, ni personnel hautement spécialisé.
- ✓ La technologie photovoltaïque présente des qualités sur le plan écologique car le produit fini est non polluant, silencieux et n'entraîne aucune perturbation du milieu, ce n'est pas l'occupation de l'espace pour les installations de grandes dimensions.

I.1.5.2 Inconvénients de l'énergie photovoltaïque

- ✓ La fabrication du module photovoltaïque relève de la haute technologie et requiert des investissements d'un coût élevé.
- ✓ Le rendement réel de conversion d'un module est faible, de l'ordre de 10-15 % avec une limite théorique pour une cellule de 28%. Les générateurs photovoltaïques ne sont compétitifs par rapport aux générateurs diesel que pour des faibles demandes d'énergie en régions isolées.
- ✓ Lorsque le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batterie) est nécessaire, le coût du générateur est accru. Le stockage de l'énergie électrique pose encore de nombreux problèmes.

I.2 Système de stockage d'électricité

Le stockage énergétique est le processus de stockage de l'énergie produite à partir de différentes sources d'énergie pour une utilisation future. Cela peut inclure le stockage de l'électricité produite à partir de sources renouvelables telles que l'énergie solaire et éolienne, ainsi que l'énergie produite à partir de combustibles fossiles [16].

Le stockage d'énergie peut également être utilisé pour lisser les variations de la demande d'électricité, pour fournir une alimentation de secours en cas de pannes de courant et pour réduire les coûts de production d'électricité en utilisant l'énergie stockée pendant les heures creuses pour répondre à la demande pendant les heures de pointe [16].

En général, plusieurs critères sont analysés lors de la considération et du choix des technologies du système de stockage pour une application spécifique. Ces critères incluent [17] :

- ❖ Durée de vie
- ❖ Cycle de vie
- ❖ Puissance et l'énergie
- ❖ Taux d'autodécharge
- ❖ Impact sur l'environnement
- ❖ Efficacité du cycle
- ❖ Coût en capital
- ❖ Durée de stockage

I.2.1 Technologie de stockage de l'électricité

Le stockage de l'électricité peut être réalisé efficacement. Initialement, il doit être transformé en une autre forme d'énergie stockable et être reconverti en cas de besoin. Il existe de nombreuses techniques possibles de stocker de l'énergie, que l'on retrouve dans pratiquement toutes les formes d'énergie : mécanique, chimique et thermique. Les technologies de stockage répondant à des critères techniques et économiques spécifiques, qui varient considérablement en fonction des applications et des besoins, seront évidemment de types différents. Il existe différentes technologies de stockage d'énergie électrique, chacune adaptée à leur domaine d'application. En général, plusieurs critères sont analysés lors de la considération et du choix des technologies du système de stockage pour une application spécifique. Ces critères incluent la durée, le cycle de vie, la puissance et l'énergie, les taux d'auto d'autodécharge, l'impact sur l'environnement, l'efficacité du cycle, le coût en capital, la durée de stockage et la maturité technique [17].

I.2.1.1 Le Stockage direct

Ce sont des techniques qui permettent de stocker directement l'énergie sous forme électrique. Il s'agit des : condensateurs, super condensateurs et inductances supraconductrices. Ces techniques de stockage sont considérées comme des sources de puissance à cause de leur grande puissance spécifique et de leur faible densité. Il s'agit de [18]:

- ❖ Les condensateurs
- ❖ Super condensateur
- ❖ Inductances supraconductrices

I.2.1.2 Le Stockage Indirect

Pour stocker l'énergie de façon significative et l'utiliser sur de longues périodes, il est souvent nécessaire de la transformer d'abord en une autre forme d'énergie intermédiaire et stockable (potentielle, cinétique, chimique ou thermique). Nous citons ci-dessous quelques types de stockage indirect. Il s'agit de [18]:

- ❖ Accumulateurs électrochimiques
- ❖ Stockage sous forme d'hydrogène
- ❖ Stockage hydraulique

- ❖ Stockage à air comprimé (CAES)
- ❖ Volant d'inertie
- ❖ Stockage sous forme thermique

I.2.2 Choix de système de stockage

À l'échelle mondiale, divers types de projets de stockage d'énergie ont été exécutés à différentes échelles. Une analyse détaillée de la base de données de projets de stockage d'énergie globale du « Département of Energy » des États-Unis révèle que la technologie de stockage d'énergie par batterie compte le plus grand nombre de projets opérationnels lié aux énergies renouvelables[19].

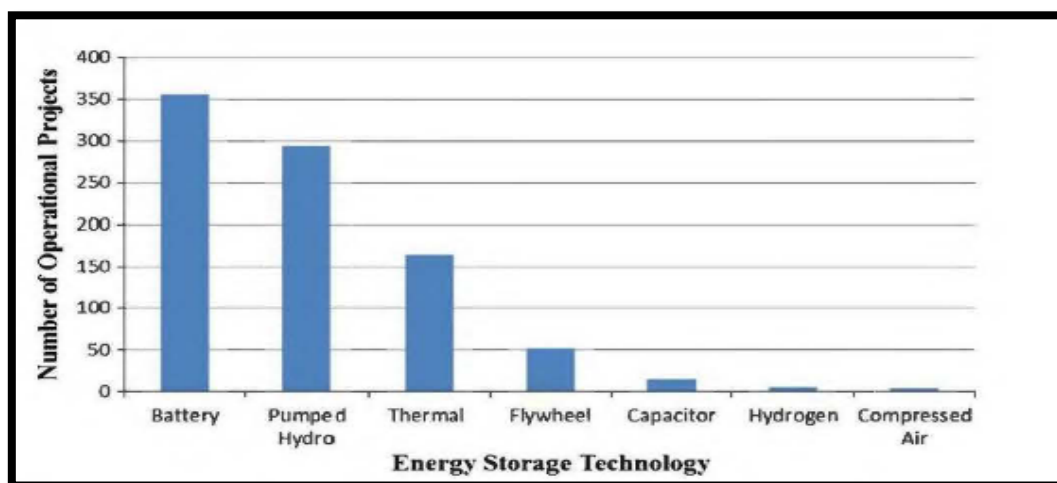


Figure I. 7 Les différents systèmes de stockage les plus répandus

Aujourd'hui les accumulateurs électrochimiques ont une densité énergétique se situant entre 150 et 250 kWh/kg avec une durée de vie relativement faible de l'ordre.

Les accumulateurs électrochimiques notamment ceux au lithium-ion occupent la quasi-totalité du marché de la téléphonie mobile. Ils sont également utilisés dans les applications de forte puissance et dans l'aérospatiale telle que les satellites Galileo. Les accumulateurs Ni-Cd sont aussi utilisés dans les applications demandant une forte puissance et peuvent fonctionner sous une température relativement élevée. Pour ce qui est de la batterie au plomb, son marché est un enjeu industriel important. Il concerne les batteries de démarrage ainsi que la plupart des batteries stationnaires. En fonction de la nature des électrodes et de l'électrolyte, on rencontre différentes technologies d'accumulateurs électrochimiques dont les plus utilisées sont : plomb-acide, nickel-cadmium et lithium-ion.

I.2.3 Comparaison entre les modes de stockage

Tableau I. 1 comparaison entre les modes de stockage de l'énergie électrique

Technologie	Avantages	Inconvénients
Batterie	Faible coût	Durée de vie
Air comprimé	Capacité de stockage importante.	Site spécifique Coulé avec le gaz naturel
Pompage hydraulique	Stockage important Faible coût	Délais de construction Site favorable
Volant d'inertie	Puissance élevée	Faible densité d'énergie Le coût
Supraconducteur	Puissance élevée	Coût élevé Faible densité d'énergie

I.3 Conclusion

Le présent chapitre est consacré à la présentation d'un aperçu sur la production d'énergie électrique d'origine photovoltaïque en vue leur importance au niveau du monde et les pays en développement en termes de réduction de la pollution et du réchauffement climatique ainsi que les différents modes de stockage, notamment, on trouve que les La stockage énergétique joue un rôle très important dans ce système en termes de rentabilité, d'efficacité de production et fiabilité.

CHAPITRE 2

Modélisation d'un système PV et de la batterie

II.1 Introduction

L'énergie solaire photovoltaïque provient de la transformation directe d'une partie de la lumière en électricité. Cette conversion s'effectue par le biais d'une cellule dite photovoltaïque (PV) basé sur un phénomène physique appelé effet photovoltaïque qui consiste à produire une force électromotrice lorsque la cellule est exposée à la lumière

Pour assurer le fonctionnement optimal du générateur photovoltaïque (GPV), un équipement de commande doit être mis entre le GPV et la charge, dont le but est l'adaptation des deux équipements (générateur photovoltaïque - charge) pour un meilleur transfert d'énergie vers la charge. Ce dernier peut augmenter d'une manière significative le rendement en puissance de GPV, nous utilisons pour cela un convertisseur DC-DC (hacheur) menu d'une commande de la poursuite de point de puissance maximale (MPPT).

En combinant ces panneaux solaires photovoltaïques avec des batteries lithium, il est possible de créer un système d'énergie solaire domestique ou industriel qui permet de stocker l'énergie produite par les panneaux solaires pendant la journée pour une utilisation ultérieure lorsque le soleil ne brille plus. Les batteries lithium sont souvent utilisées dans ces systèmes de stockage d'énergie solaire car elles ont une grande capacité de stockage d'énergie et peuvent être rechargées rapidement.

II.1.1 Principe de fonctionnement des cellules photovoltaïques

Elle a été découverte en 1839 par Antoine Becquerel, [5] ce phénomène est basé sur le comportement des matériaux semi-conducteurs lorsqu'ils reçoivent un rayonnement solaire. En effet, lorsque les photons de la lumière du soleil rentrent en contact avec ces matériaux particuliers, ils transmettent leur énergie aux électrons des semi-conducteurs qui génèrent alors une tension électrique.

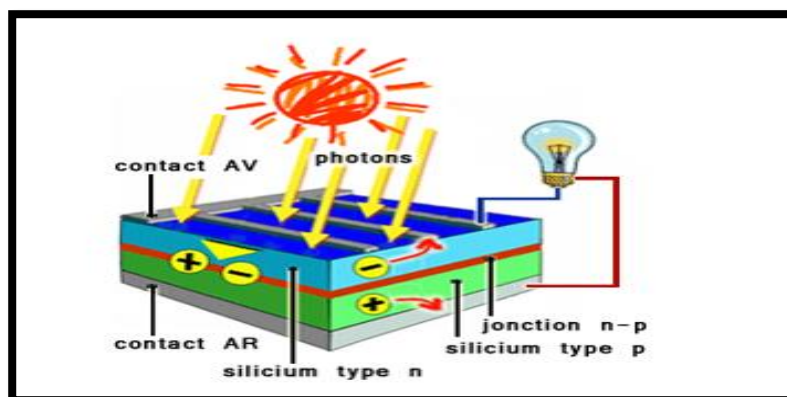


FIGURE II. 1 représentation en coupe d'une cellule photovoltaïque

L'effet photovoltaïque se manifeste quand un photon est absorbé dans un matériau composé

de semi-conducteurs dopés p (positif) et n (négatif), dénommé comme jonction p-n (ou n-p). Sous l'effet de ce dopage, un champ électrique est présent dans le matériau de manière permanente. Quand un photon incident (grain de lumière) interagit avec les électrons du matériau, il cède son énergie $h\nu$ à l'électron qui se retrouve libéré de sa bande de valence et subit donc le champ électrique intrinsèque. Sous l'effet de ce champ, l'électron migre vers la face supérieure laissant place à un trou qui migre en direction inverse. Des électrodes placées sur les faces supérieure et inférieure permettent de récolter les électrons et de leur faire réaliser un travail électrique pour rejoindre le trou de la face antérieure [6],[7]

II.1.2 Modélisation de la cellule photovoltaïque

Une cellule PV peut se modéliser à partir de l'équation définissant le comportement statique de la jonction PN d'une diode classique. Ainsi, la figure II.2 illustre le schéma équivalent électrique d'une cellule PV réelle.

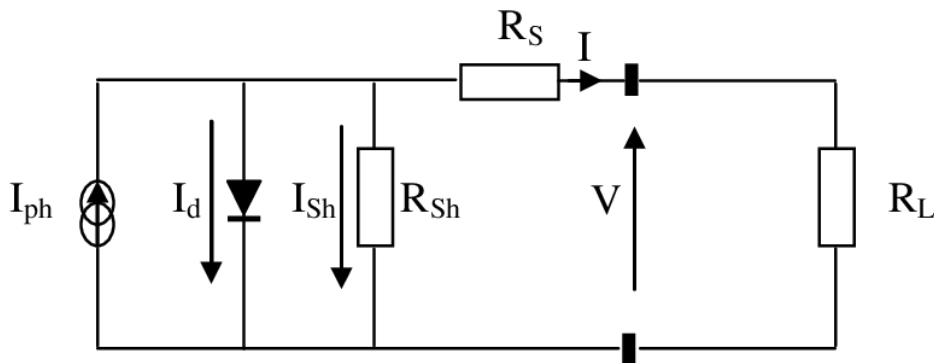


FIGURE II. 2 Schéma équivalent électrique d'une cellule PV.

Dans la Fig. II.2 En appliquant la loi de Kirchhoff, le courant sera obtenu par l'équation suivante :

$$I = I_{ph} - I_d - I_{sh} \tag{II.1}$$

I_{ph} : est un courant généré par la lumière ou le photo courant.

I_{sh} : courant qui circule dans la résistance parallèle, est donnée par l'équation suivante

$$I_{sh} = \frac{V+I.R_s}{R_{sh}} \tag{II.2}$$

I_d : le courant de la diode qui est proportionnel au courant de saturation, il est donné par

L'équation suivante :

$$I_d = I_s \left[\exp \left(\frac{q.(V+I.R_s)}{K.T.C.A} \right) - 1 \right] \tag{II.3}$$

I_s : est le courant de saturation inverse en ampère (A)

q : charge d'électrons

k : constante de Boltzmann

T_c : est une température de cellule en Kelvin (K)

A : est un facteur idéal

R_s : est une résistance série (Ω)

Nous remplaçons dans l'équation (II.1), l'équation caractéristique tension-courant d'une cellule solaire est donnée comme suit :

$$I = I_{ph} - I_s \left[\exp \left(\frac{q \cdot (V + I \cdot R_s)}{K \cdot T_c \cdot A} \right) - 1 \right] - \frac{(V + I \cdot R_s)}{R_p} \quad (\text{II.4})$$

La photo courante dépend principalement de l'ensoleillement et de la température de fonctionnement de la cellule, qui est décrite par l'équation suivante :

$$I_{ph} = [I_{SC} + K_i \cdot (T_c - T_{ref})] \cdot \frac{G}{G_{ref}} \quad (\text{II.5})$$

I_{SC} : est le courant de court-circuit de la cellule à 25 ° C et 1000W / m2,

K_i : le coefficient de température du courant de court-circuit de la cellule,

T_{ref} : est la température de référence de la cellule, en Kelvin (K) (= 25C ° + 273),

G : est l'ensoleillement en watt /mètre carré (W / m2),

G_{ref} : est l'insolation de référence de la cellule (= 1000W / m2),

D'autre part, le courant de saturation de la cellule varie avec la température de la cellule, qui est décrite comme suit

$$I_s = I_{rs} \left(\frac{T_c}{T_{ref}} \right)^3 \cdot \exp \left[\frac{q \cdot E_G \left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T_c} \right)}{K \cdot A} \right] \quad (\text{II.6})$$

Où

I_{rs} : le courant de saturation inverse de la cellule à une température de référence et un Rayonnement solaire

E_G : est l'énergie de gap du semi-conducteur utilisé dans la cellule en électronvolt (eV)

JIME 2019

A : est le facteur idéal qui dépend de la technologie PV

II.1.3 Les caractéristiques d'une cellule photovoltaïque:

➤ Le courant de court-circuit (I_{cc}) qui fournit chaque cellule est :

$$I_{cc(\text{cellule})} = \frac{I_{cc}}{N_p} \quad (\text{II.7})$$

➤ La tension du circuit ouvert (V_{co}) de chaque cellule est :

$$V_{co(\text{cellule})} = \frac{V_{co}}{N_s} \quad (\text{II.8})$$

➤ Le courant maximal de chaque cellule est :

$$I_{mp(cellule)} = \frac{I_{mp}}{N_p} \quad (\text{II.9})$$

➤ La tension maximale de chaque cellule est :

$$V_{mp(cellule)} = \frac{V_{mp}}{N_s} \quad (\text{II.10})$$

➤ La puissance maximale de chaque cellule est:

$$P_{max (cellule)} = I_{mp(cellule)} \cdot V_{mp(cellule)} \quad (\text{II.11})$$

➤ La résistance série de chaque cellule est :

$$R_{s(cellule)} = \frac{N_p}{N_s} \cdot R_{s(module)} \quad (\text{II.12})$$

➤ La résistance shunt de chaque cellule est :

$$R_{sh(cellule)} = \frac{N_p}{N_s} \cdot R_{sh(module)} \quad (\text{II.13})$$

II.1.4 Puissance d'une cellule PV

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

$$P = VI \quad (\text{II.14})$$

P: Puissance fournie par la cellule PV.

V: Tension mesurée aux bornes de la cellule PV.

I: Intensité débitée par la cellule.

II.1.5 Puissance maximale d'une cellule PV

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

$$P_{max\ idéale} = V_{co} * I_{cc} \quad (\text{II.15})$$

$P_{max\ idéale}$: La puissance fournie par la cellule

V : La tension de circuit ouvert mesurée aux bornes de la cellule PV.

I : L'intensité de court-circuit débitée par la cellule PV.

En pratique, la courbe caractéristique d'une cellule PV est plus 'arrondie' et la Tension au

point de puissance maximale V_{pmax} est inférieure à la tension de circuit ouvert V_{co} . De même que le courant fourni I_{pmax} est inférieur, pour cette même tension, au courant de court-circuit I_{cc}

II.1.6 Caractéristique puissance-tension et puissance-courant

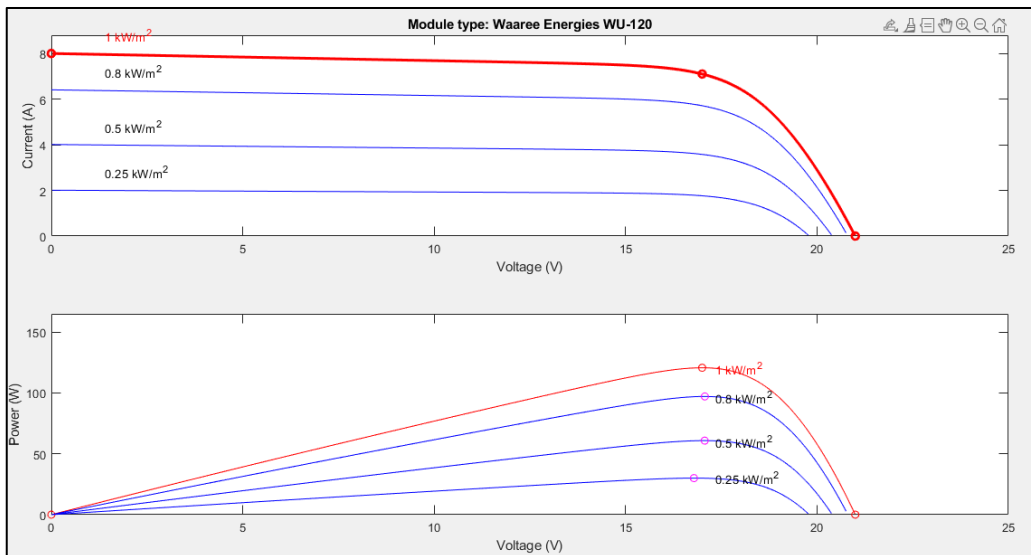


FIGURE II. 3 Caractéristique puissance-tension et puissance-courant

II.2 LE CONVERTISSEUR DC/DC

II.2.1 Les convertisseurs DC-DC (hacheurs)

La (figure II.4) montre la représentation d'un convertisseur DC/DC, qui peut être utilisé comme interface entre la source et la charge [13]

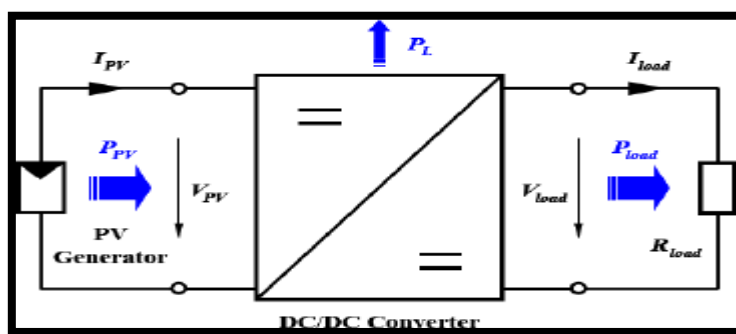


FIGURE II. 4 Convertisseur DC/DC

Le rôle du convertisseur DC/DC (dans le cadre du PV) est de faire l'adaptation entre la source (GPV) et la charge pour un transfert de puissance maximal. Ceci est fait en maintenant la puissance fournie sur ou assez proche du MPP pour n'importe quelles conditions de fonctionnement (rayonnement, température, caractéristique de charge, etc.).

Contrairement au cas général où le convertisseur DC/DC est utilisé pour réguler la tension de sortie, ici c'est plutôt la tension d'entrée qui est régulée. La tension de référence (consigne) est alors constante ou imposée par un algorithme de commande.

Si les pertes internes PL du convertisseur sont négligeables, alors les puissances d'entrée et de sortie sont égales.

Il existe plusieurs types des convertisseurs DC-DC. Parmi les quels, on présente le principe des d'un seul type de convertisseur à découpage (survolteur), utilisés fréquemment dans les systèmes photovoltaïques pour générer les tensions et les courants souhaités ainsi que pour l'adaptation des panneaux solaires avec les différentes charges.

II.2.2 Hacheur survolteur (boost)

Ce dernier est un convertisseur survolteur, connu aussi sous le nom de « boost » ou hacheur parallèle, son schéma de principe de base est celui de la (figure II.4). Son application typique est de convertir sa tension d'entrée en une tension de sortie supérieure [14].

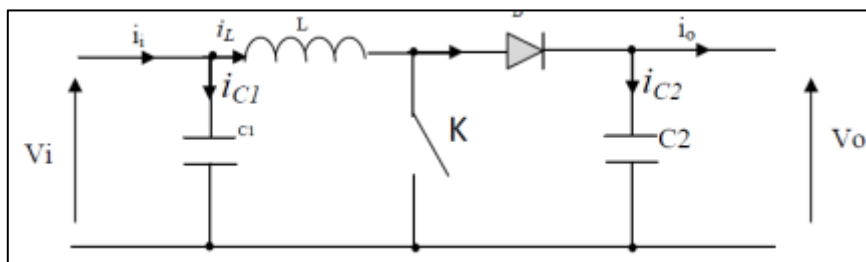


FIGURE II. 5 Schéma de principe d'un convertisseur (Boost)

Comme pour le convertisseur dévolteur, l'application des lois de Kirchhoff sur les circuits équivalents du convertisseur survolteur (figure I.5) des deux phases de fonctionnement donne [14] :

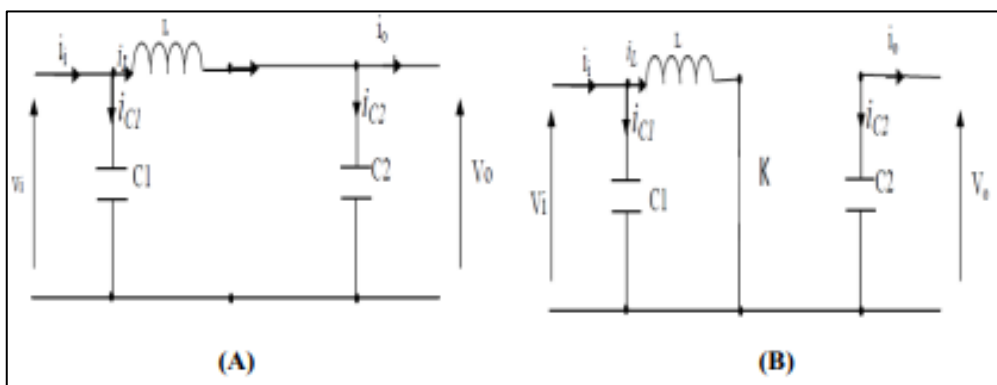


FIGURE II. 6 Schémas équivalents du hacheur survolteur, (a) : K fermé, (b) : K ouvert

Pour la première période $d.T_s$:

$$\begin{cases} I_{c1}(t) = C_1 \frac{dvi(t)}{dt} = I_i(t) - I_L(t) \\ I_{c2}(t) = C_2 \frac{dv0(t)}{dt} = -I_0(t) \\ V_L(t) = L \frac{diL(t)}{dt} = -V_i(t) \end{cases} \quad (\text{II.16})$$

Pour la deuxième période $(1 - d).T_s$:

$$\begin{cases} I_{c1}(t) = C_1 \frac{dvi(t)}{dt} = I_i(t) - I_L(t) \\ I_{c2}(t) = C_2 \frac{dv0(t)}{dt} = I_L(t) - I_0(t) \\ V_L(t) = L \frac{diL(t)}{dt} = V_i(t) - V_0(t) \end{cases} \quad (\text{II.17})$$

En appliquant la relation (I.18) sur les systèmes d'équations (I.21) et (I.22), Comme pour le convertisseur dévolteur, on trouve le modèle approximé du convertisseur survolteur [14] :

$$\begin{cases} I_L(t) = I_i(t) - C_1 \frac{dvi(t)}{dt} \\ I_0(t) = (1 - d)I_L(t) - C_2 \frac{dv0(t)}{dt} \\ V_i(t) = L \frac{diL(t)}{dt} + (1 - d)V_0(t) \end{cases} \quad (\text{II.18})$$

II.3 MPPT (maximum power point tracker)

II.3.1 Généralité:

La commande **MPPT** (*Maximum Power Point Tracking*) est un organe fonctionnel du système PV et permet de chercher le point de fonctionnement optimal du générateur PV qui dépend des conditions météorologiques et de la variation de la charge [18]. Son principe de régulation est basé sur la variation automatique du rapport cyclique α à la valeur adéquate de manière à maximiser continuellement la puissance à la sortie du panneau PV.

Dans ce contexte nous étudions la conception et le fonctionnement d'une commande numérique, de manière à ce que la puissance optimale délivrée par le panneau solaire soit quasiment transférée à la charge de façon automatique quelle que soit l'intensité d'éclairement et la valeur de la charge.

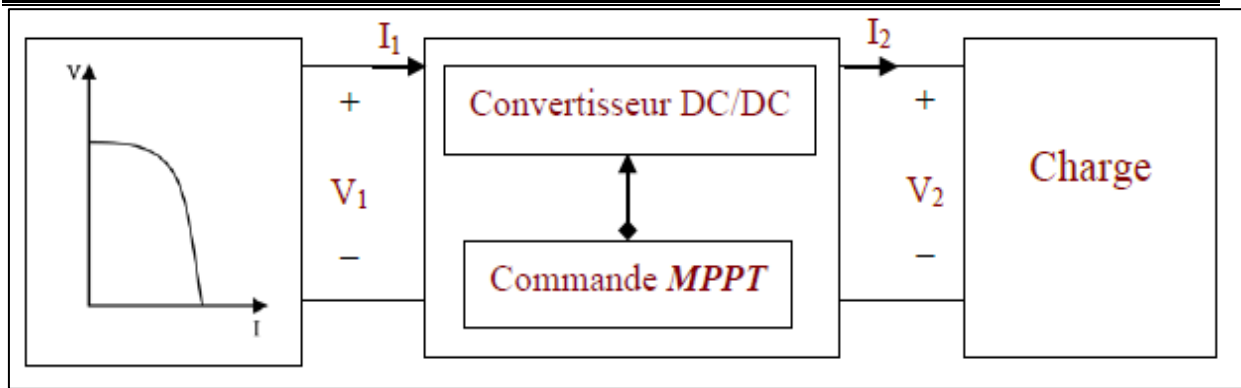


FIGURE II. 7 Etage d'adaptation jouant le rôle d'interface de puissance entre un GPV et une charge pour le transfert de P_{MAX} du GPV.

Prenons comme exemple, pour une puissance incidente W_1 , la puissance optimale transférée à la charge ne pourrait être maximale que pour un rapport cyclique bien défini : α_{1opt} ; si la puissance incidente change : W_2 , alors ce point de puissance maximale est le point PPM2 et le point de fonctionnement du GPV et le point Pf [17]. Pour converger vers le nouveau point PPM2, il faut ajuster le rapport cyclique α à la valeur α_{2opt} . Il en sera de même lorsque la charge R_s change : le point de puissance maximale dévie de sa position optimale (PPM1) ; pour converger vers ce PPM1, il faut agir sur le rapport cyclique α . Donc, dans un système PV indépendant et autonome, cette régulation doit être réalisée automatiquement afin de poursuivre le point de fonctionnement optimal. En pratique, cette régulation est effectuée par la commande **MPPT**.

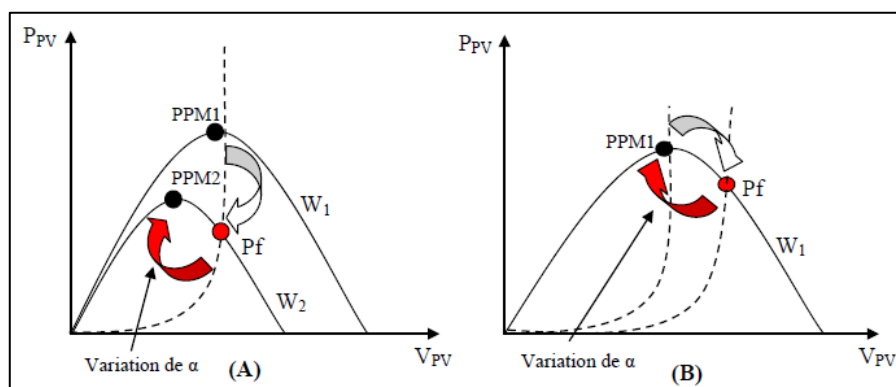


FIGURE II. 8 Fluctuation du PPM avec l'intensité d'éclairément (A) et la charge R

Diverses publications sur des commandes assurant un fonctionnement de type MPPT apparaissent régulièrement dans la littérature depuis 1968, date de publication de la première loi de commande de ce type, adaptée à une source d'énergie renouvelable de type PV [16].

Etant donnée le grand nombre de publication dans ce domaine, nous ne présentons que le principe de base des premiers types de commandes pour ensuite décrire notre commande MPPT qui a été implémentée à l'aide d'un circuit électronique numérique. [22]

II.3.2 Méthode MPPT**II.3.2.1 Méthode de perturbation et observation (P&O) :**

Cette méthode consiste à perturber l'un des paramètres d'entrées du convertisseur statique (généralement la tension V_{pv}), et d'observer l'impact de ce changement sur la puissance de sortie du système, donc tous les algorithmes qui contiennent une action de commande associée à une action de recherche sont regroupés sous cette dénomination.

L'avantage de cette méthode c'est qu'elle a la particularité d'avoir une structure de régulation simple, et peu de paramètre de mesure. Elle peut déduire le point de puissance maximale même lors des variations de l'éclairement et la température, pour toutes ces raisons, la méthode P&O est devenue une approche largement répandue dans la recherche du MPPT. [25]

Pour expliquer le principe de cette commande extrême, partant d'une commande avec un rapport cyclique petit, et à chaque cycle, en ajustant α régulièrement, V_{pv} et I_{pv} sont mesurées afin de calculer $P(K)$, la valeur obtenue est comparée avec la valeur $P(K-1)$ calculée au cycle précédent, selon cette comparaison, V_{pv} est ajustée soit dans le même sens que dans le cycle précédent soit dans une direction opposée. De cette manière, la puissance va alors Augmenter, repasser par le maximum, puis diminuer ; dès détection d'une diminution de la puissance, le sens de la commande est à nouveau inversé... Finalement, le système se place en oscillation autour du maximum.

Cette oscillation permet au système de pilotage de vérifier que le maximum ne s'est pas déplacé et dans le cas échéant de le suivre mais elle entraîne une perte de rendement qui augmente avec le pas d'incrémentation de la perturbation, le point de fonctionnement moyen étant en dessous du maximum. Si ce pas d'incrémentation est large, l'algorithme du MPPT répond rapidement aux changements soudains des conditions de fonctionnement. Le rendement de cette technique est d'environ 85%. [25.26]

La Figure II.9 représente l'algorithme de la méthode P&O. L'inconvénient majeur de cette technique réside dans le cas de changement rapide des conditions atmosphériques (comme une journée nuageuse avec éclaircies), cette méthode peut déplacer le point de fonctionnement dans une direction fautive et les pertes de puissance risquent d'être encore plus importantes ; cet ajustement incorrect continuera jusqu'à ce que le changement de l'éclairement ralentisse ou se stabilise, et avant que de nouvelles perturbations soient effectuées il est nécessaire que le convertisseur statique fonctionne en régime établi c'est pour cela cette méthode est jugée trop lente à retrouver le nouveau point de fonctionnement.

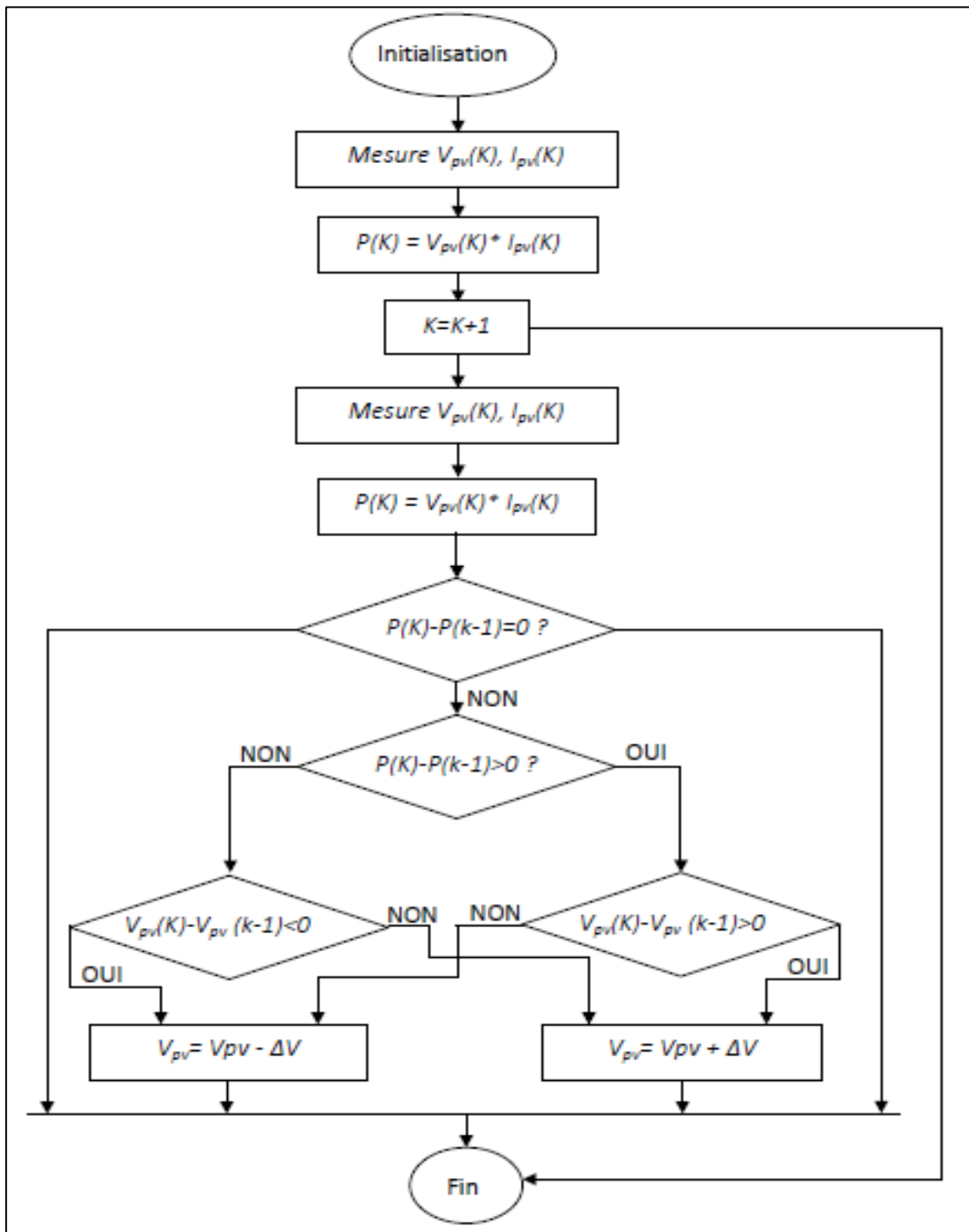


FIGURE II. 9 Organigramme de la méthode P&O.

II.4 Généralité sur batterie Lithium

Les batteries au lithium sont des dispositifs électrochimiques qui utilisent du lithium comme matière première pour stocker et fournir de l'énergie électrique. Elles sont populaires dans de nombreux dispositifs électroniques, tels que les téléphones portables, les ordinateurs portables et les tablettes, ainsi que dans les véhicules électriques et les systèmes de stockage d'énergie pour les énergies renouvelables. [26,27]

Les batteries au lithium sont très appréciées car elles ont une densité énergétique plus élevée que les batteries au plomb-acide et les batteries nickel-cadmium. Cela signifie qu'elles peuvent stocker plus d'énergie dans un espace plus petit, ce qui les rend plus légères et plus compactes.

Les batteries au lithium fonctionnent en utilisant une réaction chimique entre un matériau cathodique et un matériau anodique qui sont séparés par un électrolyte. Lorsque la batterie est connectée à un circuit électrique, des ions lithium se déplacent de l'anode vers la cathode à travers l'électrolyte, produisant de l'énergie électrique. Lorsque la batterie est déchargée, les ions lithium retournent de la cathode à l'anode.

Il existe différents types de batteries au lithium, tels que les batteries lithium-ion, les batteries lithium-polymère et les batteries lithium-fer-phosphate. Chacun a des caractéristiques différentes en termes de densité d'énergie, de durée de vie, de coût et de sécurité. [26]

II.4.1 Classification des batteries Lithium:

Les batteries au lithium peuvent être classées en différentes catégories en fonction de leurs matériaux, de leur composition et de leur utilisation. Voici quelques-unes des classifications courantes des batteries au lithium :

1. Batteries lithium-ion (Li-ion) : Les batteries lithium-ion sont les plus courantes et les plus populaires parmi les batteries au lithium. Elles sont utilisées dans de nombreux dispositifs électroniques, tels que les téléphones portables, les ordinateurs portables, les tablettes et les appareils photo numériques.
2. Batteries lithium-polymère (Li-pol) : Les batteries lithium-polymère sont similaires aux batteries lithium-ion, mais elles utilisent un électrolyte polymère solide au lieu d'un électrolyte liquide. Elles sont souvent utilisées dans les dispositifs électroniques plus petits et plus minces, tels que les montres intelligentes, les écouteurs sans fil et les drones.
3. Batteries lithium-fer-phosphate (LiFePO₄) : Les batteries lithium-fer-phosphate ont une durée de vie plus longue que les batteries lithium-ion et sont souvent utilisées dans les véhicules électriques et les systèmes de stockage d'énergie pour les énergies renouvelables. [27]

4. Batteries lithium-manganèse (LiMn) : Les batteries lithium-manganèse sont souvent utilisées dans les outils électriques, les scooters électriques et les systèmes de secours, car elles peuvent fournir une grande quantité de courant de décharge.

5. Batteries lithium-titanate (Li-Ti) : Les batteries lithium-titanate ont une durée de vie très longue et peuvent fonctionner à des températures extrêmes, ce qui les rend idéales pour les véhicules électriques et les systèmes de stockage d'énergie.

6. Batteries lithium-soufre (Li-S) : Les batteries lithium-soufre ont une densité d'énergie très élevée, mais elles sont encore en cours de développement et n'ont pas encore été largement utilisées dans les produits commerciaux.

Il existe également des sous-catégories dans chaque type de batterie, en fonction des matériaux spécifiques utilisés pour les électrodes et de la composition de l'électrolyte.

II.4.2 Le modèle mathématique de la batterie Lithium-ion

➤ **Modél de charge ($i^*>0$)**

$$f(it, i^*, i, Exp) = E_0 - K \frac{Q}{Q-it} i^* - K \frac{Q}{Q-it} + it + A. \exp(-B. it) \tag{II.19}$$

➤ **Modél de décharge ($i^*<0$)**

$$f_{ch}(it, i^*, i, Exp) = E_0 - K \frac{Q}{it+0.1Q} i^* - K \frac{Q}{Q-it} + it + A. \exp(-B. it) \tag{II.20}$$

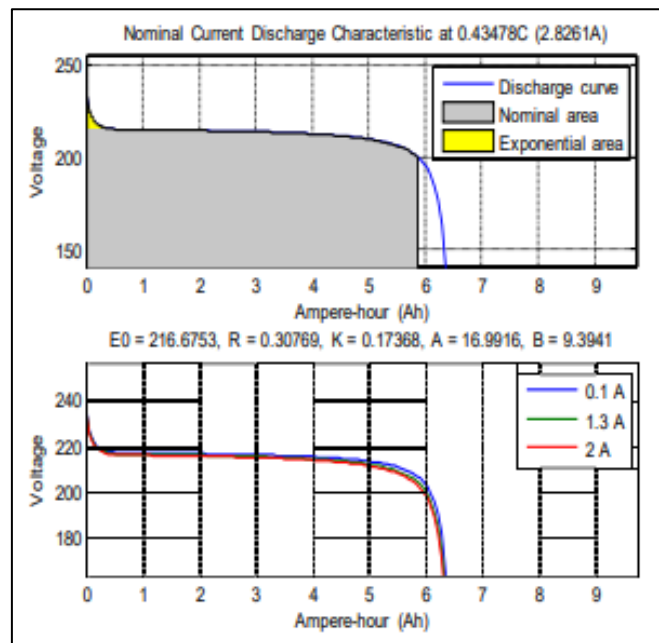


FIGURE II. 10 Caractéristique de décharge du courant nominal de batterie lithium-ion (Li-Ion)

II.4.3 Les facteurs qui influents sur la batterie Lithium

Plusieurs facteurs peuvent influencer les performances et la durée de vie d'une

batterie au lithium, notamment :

1. La température : La température a un impact significatif sur la performance de la batterie au lithium. Des températures trop élevées peuvent causer une dégradation rapide de la batterie, tandis que des températures trop basses peuvent réduire la capacité de la batterie.
2. Le taux de charge et de décharge : Les batteries au lithium ont des taux de charge et de décharge recommandés. Des taux trop élevés peuvent réduire la durée de vie de la batterie, tandis que des taux trop faibles peuvent réduire la capacité de la batterie.
3. La profondeur de décharge : La profondeur de décharge (DOD) fait référence à la quantité d'énergie stockée dans la batterie qui est utilisée pendant la décharge. Des DOD élevés peuvent réduire la durée de vie de la batterie.
4. La qualité de fabrication : La qualité des matériaux et des composants utilisés dans la fabrication de la batterie peut affecter sa performance et sa durée de vie.
5. Le vieillissement : Le vieillissement est un processus naturel qui affecte toutes les batteries au lithium, réduisant progressivement leur capacité de stockage d'énergie au fil du temps.³⁰
6. La sécurité : Les batteries au lithium peuvent présenter des risques de sécurité en cas de mauvaise manipulation ou de surchauffe, il est donc important de respecter les consignes de sécurité recommandées.

Il est important de noter que la combinaison de ces facteurs peut affecter de manière complexe les performances et la durée de vie d'une batterie au lithium. Par conséquent, il est important de concevoir des systèmes de stockage d'énergie qui prennent en compte ces facteurs pour maximiser la performance et la durée de vie de la batterie. [31]

II.4.4 Avantage de la batterie Lithium

1. Haute densité énergétique : Les batteries au lithium ont une densité d'énergie plus élevée que les autres types de batteries, ce qui leur permet de stocker plus d'énergie par unité de poids ou de volume.
2. Longue durée de vie : Les batteries au lithium ont une durée de vie plus longue que les autres types de batteries, grâce à leur faible taux d'auto-décharge et à leur capacité de retenir une charge plus longtemps.
3. Faible taux d'autodécharge : Les batteries au lithium ont un taux d'auto-décharge plus faible que les autres types de batteries, ce qui signifie qu'elles perdent moins d'énergie lorsqu'elles ne sont pas utilisées.
4. Temps de charge rapide : Les batteries au lithium peuvent être rechargées plus rapidement que les autres types de batteries, ce qui les rend pratiques pour une utilisation mobile.

5. Respectueuses de l'environnement : Les batteries au lithium ne contiennent pas de métaux lourds nocifs pour l'environnement, comme le plomb et le mercure.

II.4.5 Inconvénients de la batterie lithium :

1. Coût élevé : Les batteries au lithium sont plus coûteuses que les autres types de batteries, en raison de leur technologie avancée et de leur matériau de fabrication.
2. Risques de sécurité : Les batteries au lithium peuvent présenter des risques de sécurité, notamment des risques d'explosion ou d'incendie en cas de mauvaise manipulation ou de surchauffe.
3. Sensibles aux températures extrêmes : Les batteries au lithium peuvent perdre leur capacité de stockage d'énergie lorsqu'elles sont exposées à des températures extrêmes, ce qui peut réduire leur durée de vie.
4. Besoin d'un circuit de protection : Les batteries au lithium doivent être équipées d'un circuit de protection pour éviter une surcharge ou une surchauffe.

En résumé, les batteries au lithium offrent de nombreux avantages en termes de performance et de durée de vie, mais elles présentent également des inconvénients en termes de coût, de sécurité, de sensibilité aux températures extrêmes et d'épuisement des ressources naturelles.

II.4.6 Hacheur dévolteur-survolteur (Buck-Boost)

Le convertisseur dévolteur-survolteur combine les propriétés des deux convertisseurs précédents, il est utilisé comme un transformateur idéal de n'importe quelle tension d'entrée pour n'importe quelle tension de sortie désirée, son schéma de base est illustré par la (figure II.11) [14] :

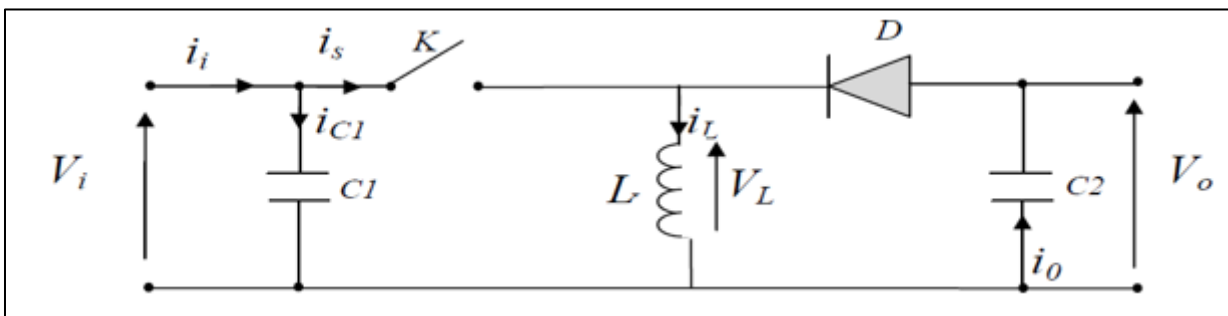


FIGURE II. 11 Schéma de principe d'un convertisseur dévolteur-survolteur

La (figure II.12) montre les deux schémas équivalents du convertisseur dévolteur-survolteur pour les deux cycles deux fonctionnements [14].

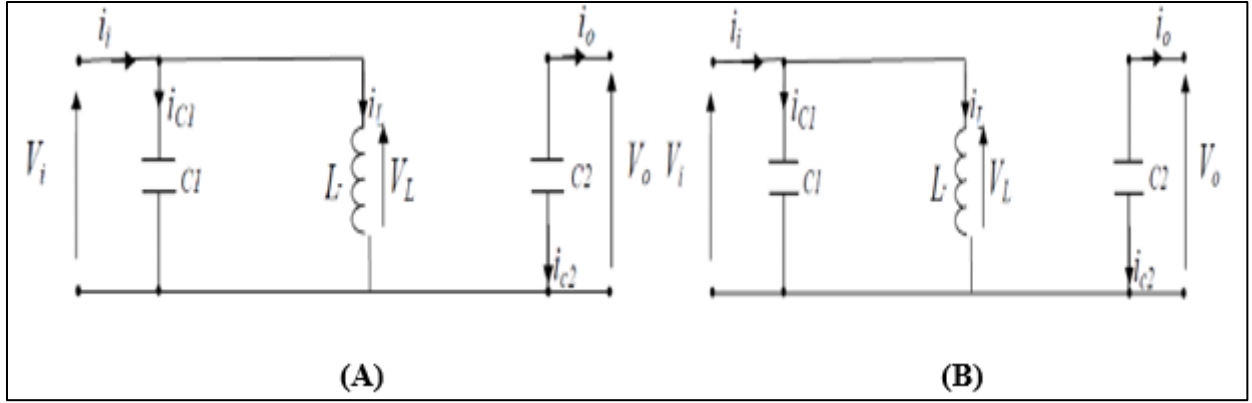


FIGURE II. 12 Schémas équivalents du hacheur survolteur, (a) : K fermé, (b) : K ouvert

En appliquant la loi de Kirchhoff sur les deux circuits équivalents du convertisseur dévolteur-survolteur des deux phases de fonctionnement, on obtient :

Pour la première période $d \cdot T_s$:

$$\begin{cases} I_{c1}(t) = C_1 \frac{dvi(t)}{dt} = I_i(t) - I_L(t) \\ I_{c2}(t) = C_2 \frac{dv0(t)}{dt} = -I_0(t) \\ V_L(t) = L \frac{diL(t)}{dt} = V_i(t) \end{cases} \quad (\text{II.21})$$

Pour la deuxième période $(1 - d) \cdot T_s$:

$$\begin{cases} I_{c1}(t) = C_1 \frac{dvi(t)}{dt} = I_i(t) \\ I_{c2}(t) = C_2 \frac{dv0(t)}{dt} = I_L(t) - I_0(t) \\ V_L(t) = L \frac{diL(t)}{dt} = V_0(t) \end{cases} \quad (\text{II.22})$$

En appliquant la relation sur les systèmes d'équations (I.21) et (I.22), Comme pour le convertisseur dévolteur, on trouve le modèle approximé du convertisseur survolteur [14] :

$$\begin{cases} I_L(t) = \frac{1}{d} (I_i(t) - C_1 \frac{dvi(t)}{dt}) \\ I_0(t) = -(1 - d)I_L(t) - C_2 \frac{dv0(t)}{dt} \\ V_i(t) = \frac{1}{d} (L \frac{diL(t)}{dt} + (1 - d)V_0(t)) \end{cases} \quad (\text{II.23})$$

II.5 CONCLUSION :

Dans ce chapitre, nous avons étudié un système photovoltaïque constituant d'un GPV associé avec un hacheur élévateur de tension contrôlé par un algorithme de type P&O dans le but est d'extraire maximum d'énergie PV pour les différentes données météorologiques et on trouve que Les batteries au lithium sont utilisées pour leur efficacité et leur longévité, et elles sont particulièrement adaptées aux systèmes photovoltaïques en raison de leur faible poids et de leur capacité à stocker une grande quantité d'énergie dans un espace restreint.

Chapitre 3

Gestion énergétique d'un Système PV /batterie

III.1 Introduction

La gestion efficace des batteries est un enjeu crucial dans de nombreux domaines tels que l'automobile, l'aérospatiale et les énergies renouvelables. Les méthodes traditionnelles de contrôle de batterie ont souvent des limites en termes de précision et de réactivité. C'est pourquoi l'utilisation de techniques de contrôle avancées telles que le contrôle par ordinateur et la régulation PI devient de plus en plus courante. Dans ce contexte, une constante mathématique bien connue, le nombre pi, trouve une nouvelle application dans la modélisation et la gestion des batteries à travers le concept de régulation. Cette approche permet une gestion plus fine de la charge et de la décharge des batteries, ce qui peut contribuer à prolonger leur durée de vie et à améliorer leur efficacité énergétique

La stratégie de gestion d'énergie qui sera développée dans le cadre de ce projet de recherche doit permettre au système PV / batterie s'adapter aux variations météorologiques et de la charge [38].

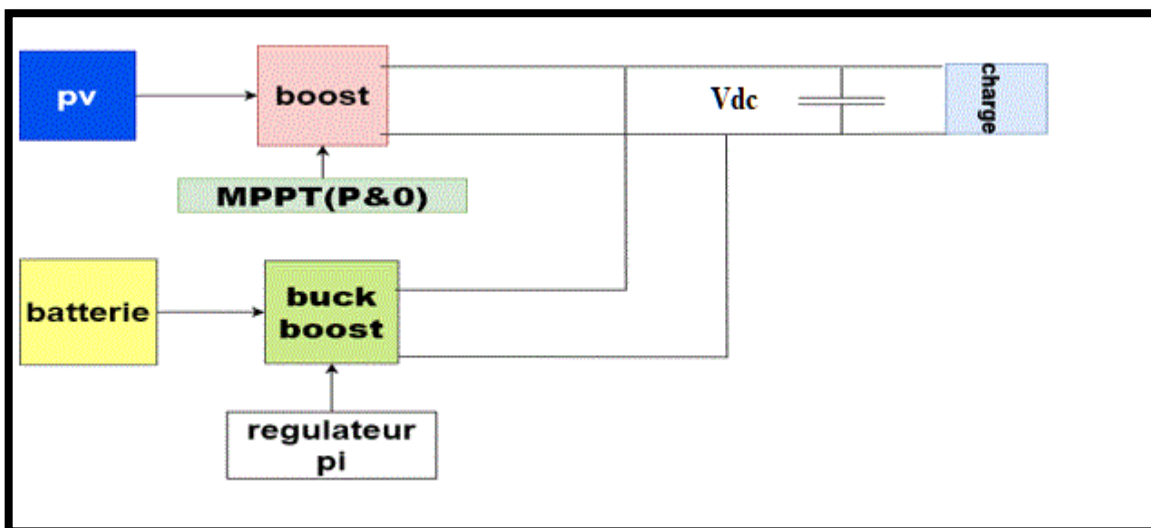


FIGURE III. 1 Schéma globale de la chaîne complète.

III.1.1 L'importance du régulateur PI dans la gestion d'un système photovoltaïque :

Le régulateur PI est également crucial dans la gestion des systèmes photovoltaïques, qui sont des sources d'énergie renouvelable de plus en plus populaires. Les panneaux solaires convertissent l'énergie solaire en électricité, mais la quantité d'énergie produite peut varier en fonction des conditions météorologiques et des changements de charge. Le régulateur PI peut être utilisé pour optimiser la production d'énergie photovoltaïque en ajustant automatiquement les paramètres de contrôle pour maintenir la tension et le courant à des niveaux optimaux. Il peut également être utilisé pour assurer la protection du système en surveillant et en régulant les tensions et les courants afin d'éviter les surtensions et les sous-tensions qui pourraient endommager

le système. De plus, le régulateur PI peut être utilisé pour suivre la trajectoire maximale de puissance (MPPT) du système photovoltaïque, en ajustant la tension et le courant pour maximiser l'efficacité de la conversion d'énergie solaire en électricité. En somme, le régulateur PI joue un rôle important dans la gestion des systèmes photovoltaïques en assurant une production d'énergie stable et efficace, tout en protégeant le système contre les dommages éventuels.

III.1.2 les étape à suivre pour la conception d'un régulateur PI

- ✓ Choisir les paramètres PI appropriés : Les paramètres PI, à savoir les coefficients proportionnel, intégral doivent être choisis avec soin pour assurer la stabilité et la précision du régulateur.
- ✓ Utiliser un échantillonnage approprié : La fréquence d'échantillonnage est un facteur clé dans la conception d'un régulateur PI. Il est important de choisir une fréquence d'échantillonnage suffisamment élevée pour éviter l'aliasing et pour permettre une réponse rapide aux variations du système.
- ✓ Prener en compte la dynamique du système : La réponse du système à la commande du régulateur PI dépend de sa dynamique. Il est important de comprendre la dynamique du système pour concevoir un régulateur PI qui peut répondre aux variations du système.
- ✓ S'assurer de la stabilité du système : La stabilité est un facteur clé dans la conception d'un régulateur PI. Le régulateur doit être conçu de manière à garantir la stabilité du système et à éviter les oscillations indésirables ou le dépassement.
- ✓ Tester et ajuster le régulateur PI : Une fois le régulateur PI conçu, il est important de le tester et de l'ajuster pour s'assurer qu'il fonctionne correctement. Les tests doivent être effectués dans des conditions réalistes pour garantir que le régulateur est capable de répondre aux variations du système.

En résumé, la conception d'un régulateur PI efficace nécessite une compréhension approfondie des paramètres du système, une sélection appropriée des paramètres PI, une fréquence d'échantillonnage appropriée, une considération de la dynamique du système, une garantie de la stabilité du système et des tests et ajustements minutieux [],[].

III.1.3 Synthèse et structure des régulateurs PI

Chaque boucle de régulation est dotée d'un régulateur proportionnel intégral PI classique, présenté sur la figure, il comporte une action proportionnelle qui sert à régler la rapidité avec laquelle la régulation doit avoir lieu et une action intégrale qui sert à éliminer l'erreur statique entre la grandeur régulée et sa propre consigne [12].

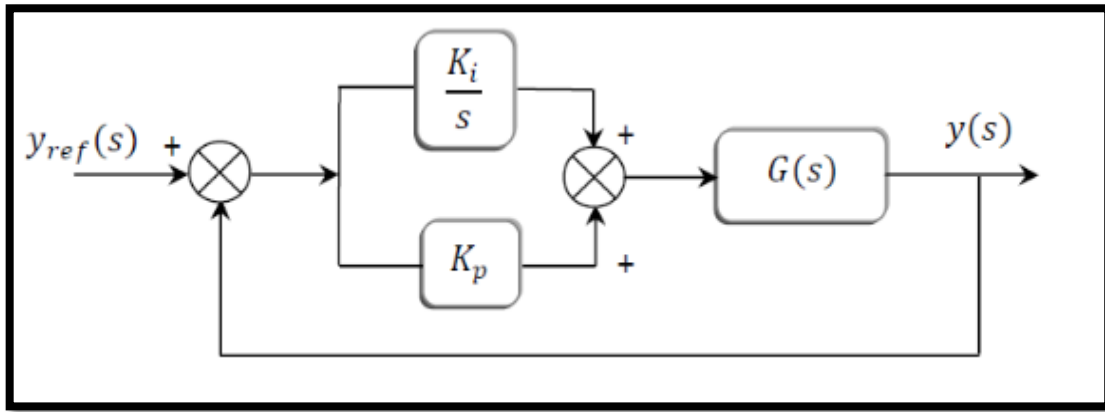


FIGURE III. 2 Schéma de commande utilisant la structure PI

III.1.4 Le Réglage de la tension de bus continue Vdc :

Le réglage du bus continu est alors composé d'une boucle de régulation, permettant de maintenir une tension constante du bus continu, avec un correcteur Proportionnel Intégral et générant la référence du courant à injecter dans le condensateur (*ibat_ref*).

Le schéma de régulateur PI pour régler de tension *Vdc* est représenté sur la Figure suivante :

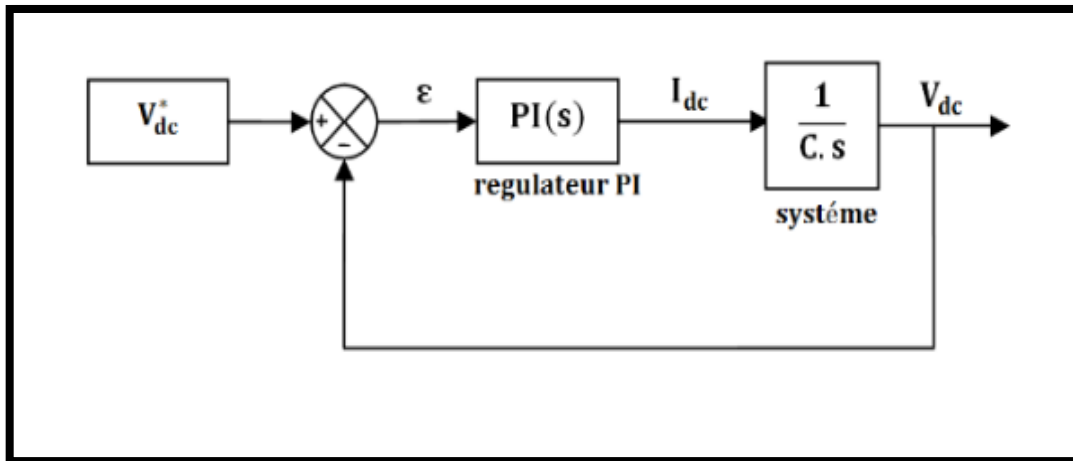


FIGURE III. 3 Schéma de Réglage de la tension de bus continue Vdc

$$I_{dc} = C \frac{dV_{dc}}{dt} \tag{III.1}$$

$$I_{cd} = C S V_{dc}(s) \tag{III.2}$$

$$\frac{V_{dc}}{I_{dc}} = \frac{1}{cs} \tag{III.3}$$

III.1.5 La dimension du régulateur PI

III.1.5.1 La fonction de transfert en boucle fermée est:

$$F_{BF}(s) = \frac{V_{dc}}{V_{dc}} = \frac{F_{BO}(s)}{1-F_{BO}(s)} \tag{III.4}$$

$$\frac{V_{dc}}{V^*_{dc}} = \frac{\frac{K_p \cdot s + K_i}{C \cdot s^2}}{\frac{K_p \cdot s + K_i}{C \cdot s^2}} = \frac{\frac{K_p}{C} \cdot s + \frac{K_i}{C}}{s^2 + \frac{K_p}{C} \cdot s + \frac{K_i}{C}} \quad (III.5)$$

L'équation caractéristique de deuxième ordre peut s'écrire comme suivant :

$$\frac{V_{dc}}{V^*_{dc}} = \frac{\frac{K_p}{C} \cdot s + \omega_n^2}{s^2 + 2\varepsilon\omega_n \cdot s + \omega_n^2} \quad (III.6)$$

Avec :

$$\begin{cases} \omega_n^2 = \frac{K_i}{C} \\ 2\varepsilon\omega_n = \frac{K_p}{C} \end{cases} \quad (III.7)$$

On obtient les équations de paramètres de régulateur PI comme suit :

$$\begin{cases} K_i = \omega_n^2 * C \\ K_p = 2\varepsilon\omega_n * C \end{cases} \quad (III.8)$$

III.2 L'intréré de la gestion :

La gestion d'une batterie alimentée par une plaque photovoltaïque implique de s'assurer que la batterie est chargée efficacement et de manière sûre, tout en maximisant la durée de vie de la batterie.

- **Charge de la batterie :** La plaque photovoltaïque doit être dimensionnée pour fournir suffisamment de courant pour charger la batterie pendant la journée. La charge doit être régulée pour éviter la surcharge de la batterie, ce qui peut entraîner une diminution de sa durée de vie.
- **Contrôle de charge:** Il est important de disposer d'un système de contrôle de charge pour surveiller la tension et la température de la batterie et réguler la charge en conséquence. Cela permettra de prolonger la durée de vie de la batterie en évitant la surcharge ou la sous-charge.
- **Protection contre les sur tensions:** Les batteries peuvent être endommagées par des surtensions, il est donc important de disposer d'un système de protection contre les sur tensions pour éviter toute surcharge.
- **Gestion de la décharge:** Les batteries ne doivent pas être déchargées complètement, car cela peut également réduire leur durée de vie. Il est donc important d'avoir un système de gestion de la décharge qui surveille la tension de la batterie et déconnecte les charges lorsque la tension atteint un niveau critique.
- **Surveillance de la capacité:** La capacité de la batterie peut diminuer avec le temps, il est donc important de surveiller régulièrement la capacité restante de la batterie et de la recharger lorsque cela est nécessaire.

En somme, pour une gestion efficace d'une batterie alimentée par une plaque photovoltaïque,

il faut avoir un système de contrôle et de régulation de la charge, de protection contre les surtensions et de surveillance de la capacité, afin de maximiser la durée de vie de la batterie et d'assurer un fonctionnement fiable.

III.2.1 Algorithme de gestion

L'algorithme de gestion qui est présenté sur la figure (III .3 a pour rôle de contrôler les échanges d'énergie entre les différents composants d'une part mais aussi de réguler le processus de charge/décharge du stockage (stop charge et décharge, La gestion d'énergie entre les différents composants de notre système est assurée par une technique de gestion à base de règles déterministes. Elle est conçue en tenant compte de tous les scénarios de fonctionnement de ce système étudié. L'organigramme de la figure donne le principe de fonctionnement de la stratégie de gestion de l'énergie de notre système [46]. On a initialisé d'abord les paramètres des différents sous-systèmes et les données climatiques (température, éclairement). Ensuite, on a estimé la puissance totale P_{pv} produite par la source principale (PV) et la demande de la charge P_{ch} et la puissance de batterie et surtout l'état de charge de la batterie SOC.

$P_{bat} = P_{pv} - P_{ch}$ Dans la seconde étape, l'algorithme vérifie si la puissance utilisée est supérieure à celle produite. S'il y'a un surplus de consommation il faut faire la décision d'injecter ce surplus dans la batterie ou la charge, est-ce seulement en vérifiant l'état de charge de la batterie. Dans le cas où il y'a un manque d'énergie la décision est prise d'utiliser le contenu de batterie, ceci en vérifiant l'état de charge de batterie.

❖ **$P_{bat} < 0$** Lorsque la batterie fournit de l'énergie (mode décharge). Dans les périodes où les PV ne peuvent pas générer une puissance nécessaire dans la charge (Prend en compte SOC 20% arrêt automatique de déchargement de la batterie).

❖ **$P_{bat} > 0$** Lorsque l'accumulateur reçoit de l'énergie (mode charge). Dans la période où les panneaux photovoltaïques produisent de l'énergie supérieure à la capacité de consommation, ils sont répartis entre consommation et recharger la batterie. (Prend en compte SOC > 80% arrêt automatique de chargement de batterie

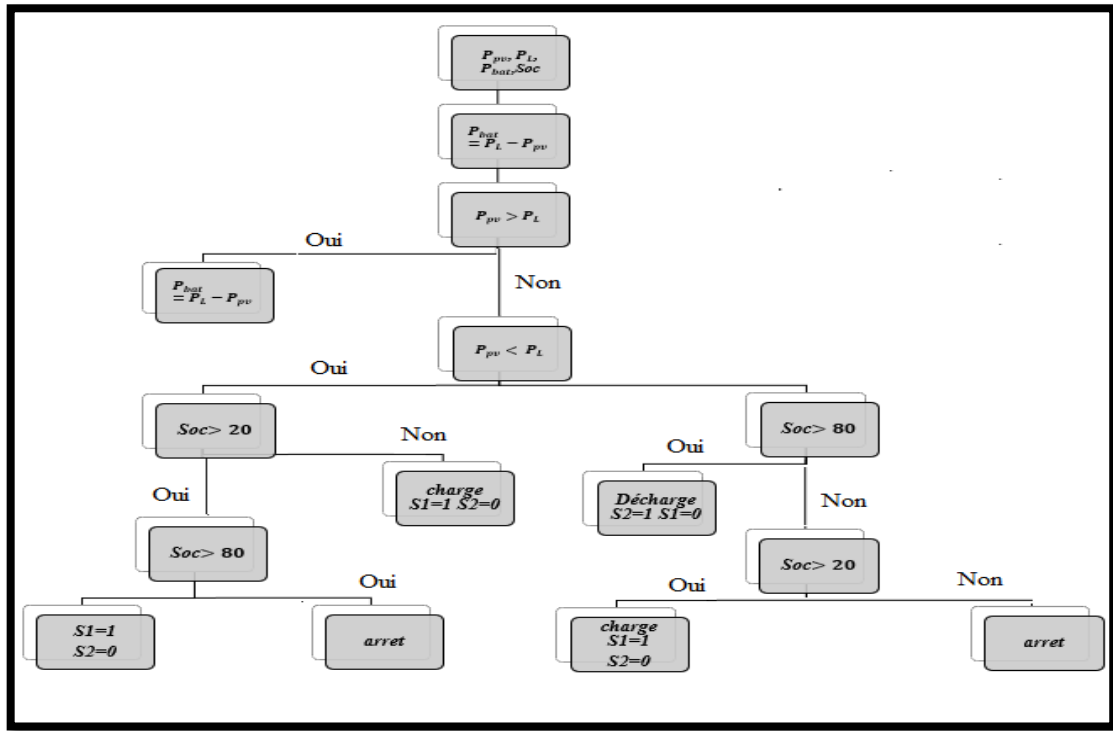


FIGURE III. 4 . L’organigramme de gestion d’énergie

III.3 Résultats de simulation

III.3.1 Irradiation variable

Dans cette partie, nous présentons les résultats de simulation d’un l’état de charge et décharge la batterie type lithum contrôlée par l’organigramme pour une irradiation variable évalué à l’aide du logiciel MATLAB / SimPowerSystem pour une charge constante

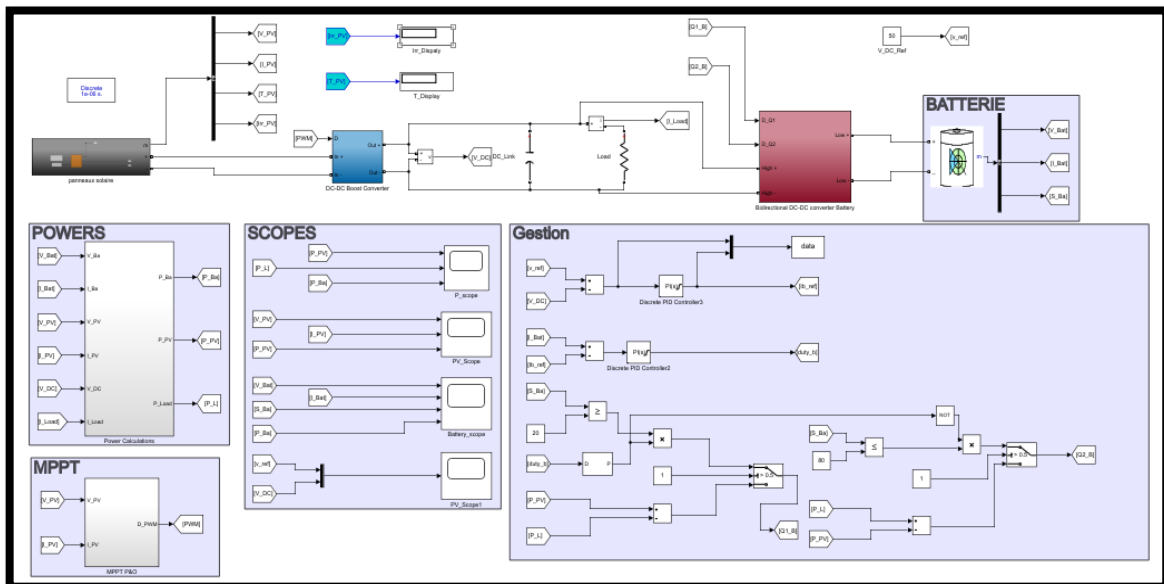


FIGURE III. 5 : Schéma de simulation de la chaîne complète sous une irradiations variable

III.3.2 Interpretation (irradiations variable):

Les figures (III.6) présente l’irradiation variable et les figures (III.6),

(III.7) ,(III.9) ,présentent respectivement les allures des puissances et la figure (III.8) présente l'état de charge (SOC) de système de stockage (batterie).

Entre $t = [0 \ 0.4] \text{ s}$: La puissance demandée par la charge est **supérieure** à la puissance générée par le système PV. Dans ce cas, la batterie commence à se décharger (**mode de décharge**) et le convertisseur fonctionne comme élévateur (boost) pour le but d'assurer la stabilité énergétique.

Entre $t = [0.4 \ 1.2] \text{ s}$: La puissance demandée par la charge est **inférieure** à la puissance générée par le système PV. Dans ce cas, le système de stockage consomme la différence de puissance (mode de charge) et le convertisseur fonctionne comme buck

Entre $t = [1.2 \ 2] \text{ s}$: La puissance demandée par la charge est **supérieure** à la puissance générée par le système PV. Dans ce cas, la batterie commence à se décharger (**mode de décharge**) et le convertisseur fonctionne comme élévateur (boost) pour le but d'assurer la stabilité énergétique.

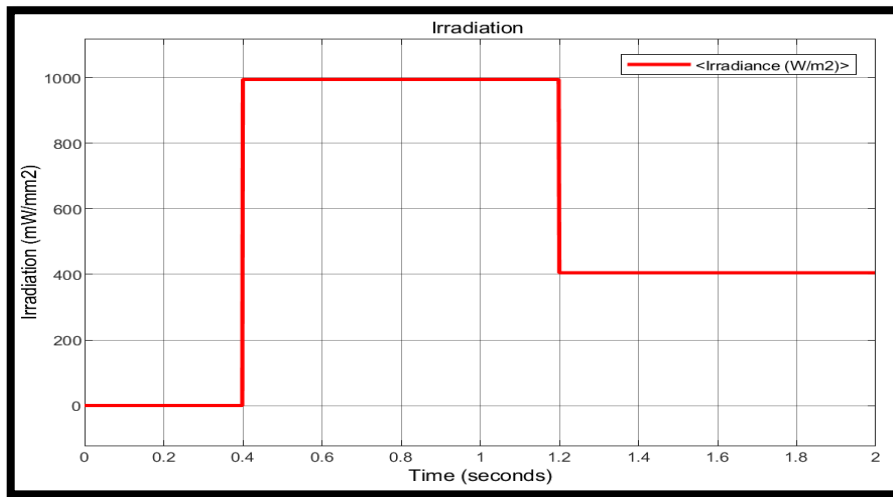


FIGURE III. 6 Irradiation variable

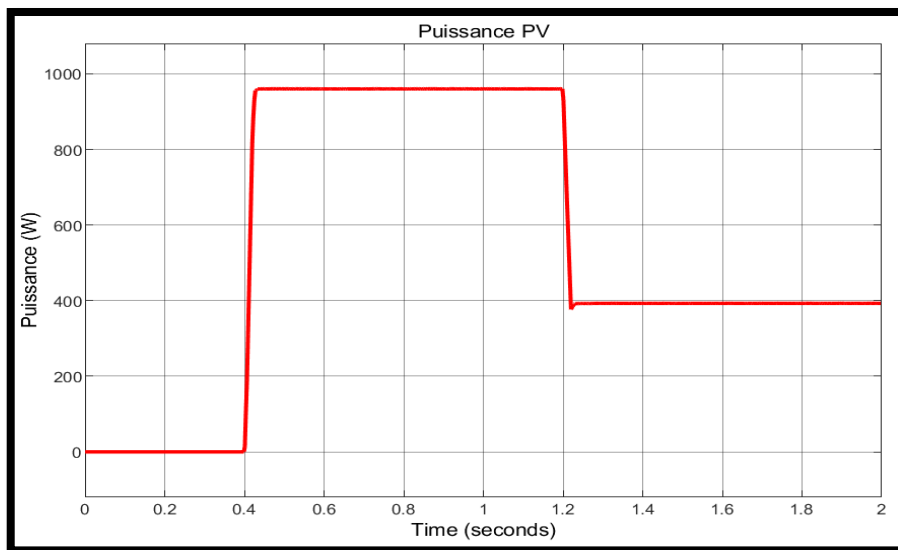


FIGURE III. 7 La puissance photovoltaïque.

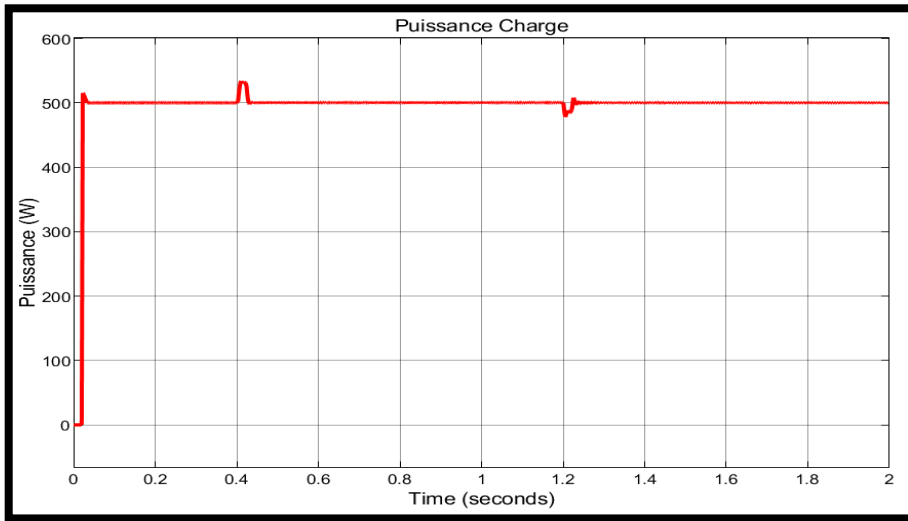


FIGURE III. 8 la puissance de la charge

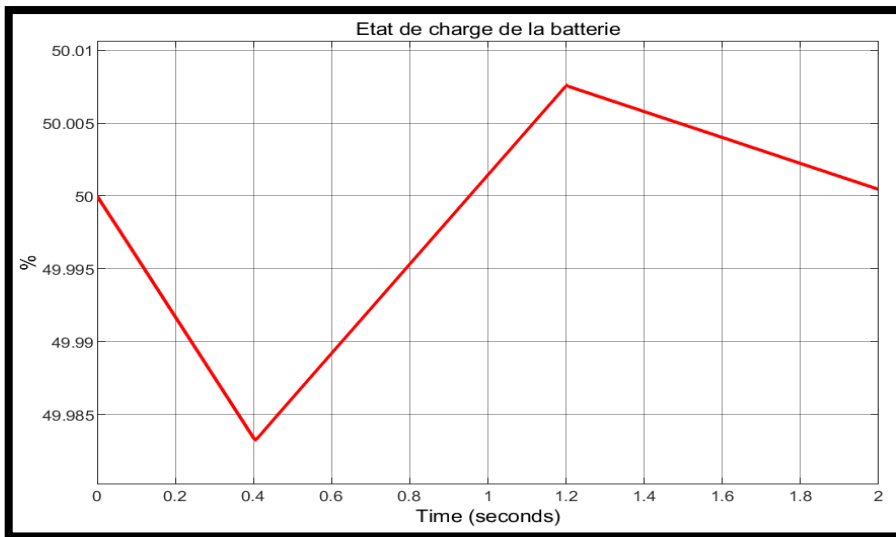


FIGURE III. 9 Etat de charge de la batterie

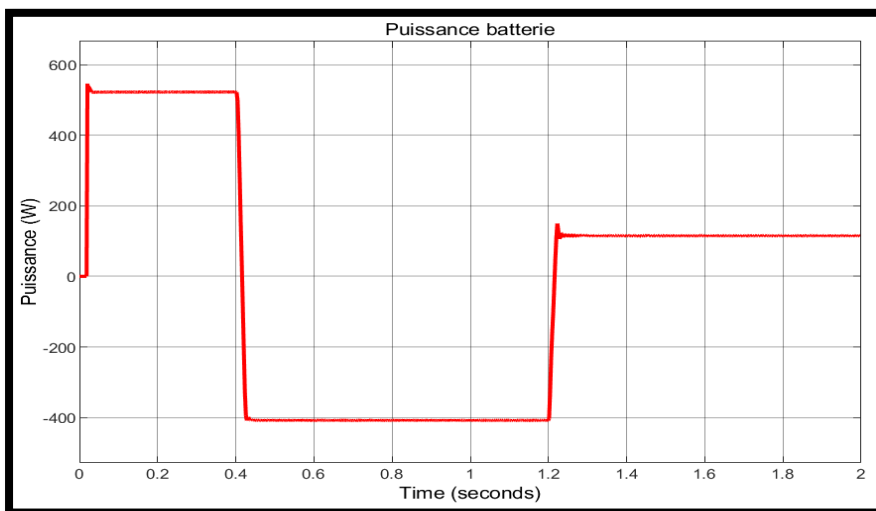


FIGURE III. 10 La puissance de la batterie

III.3.3 Charge variable:

Dans cette partie, nous présentons les résultats de simulation d'un l'état de charge et décharge la batterie type lithum contrôlée par l'organigramme pour une charge variable évalué à l'aide du logiciel MATLAB / SimPowerSystem pour une irradiation constante

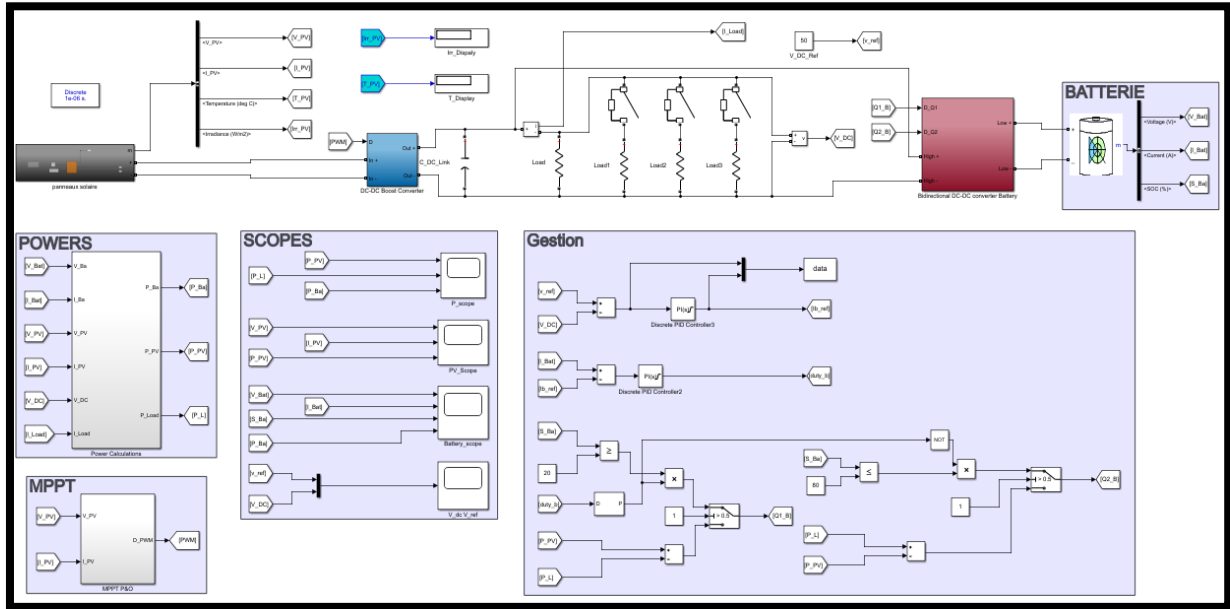


FIGURE III. 11 Schéma de simulation de la chaine complète sous une charge variable

III.3.3.1 Interprétation (Charge variable) :

Les figures (III.11) présente l'irradiation constante et les figures (III.13) montre l'allure de la charge variable et les figures (III.13) et (III.14) présentent respectivement les allures des puissances et la figure (III.15) présente l'état de charge (SOC) de système de stockage (batterie).
 Entre $t = [0-0.4] s$: La puissance demandée par la charge est inférieure à la puissance générée par le système PV. Dans ce cas, le système de stockage consomme la différence de puissance (mode de charge).

Entre $t = [0.4-1.2] s$: La puissance demandée par la charge est supérieure à la puissance générée par le système PV. Dans ce cas, le système de stockage fournit la puissance à la charge (mode de décharge) pour le but d'assurer la stabilité énergétique.

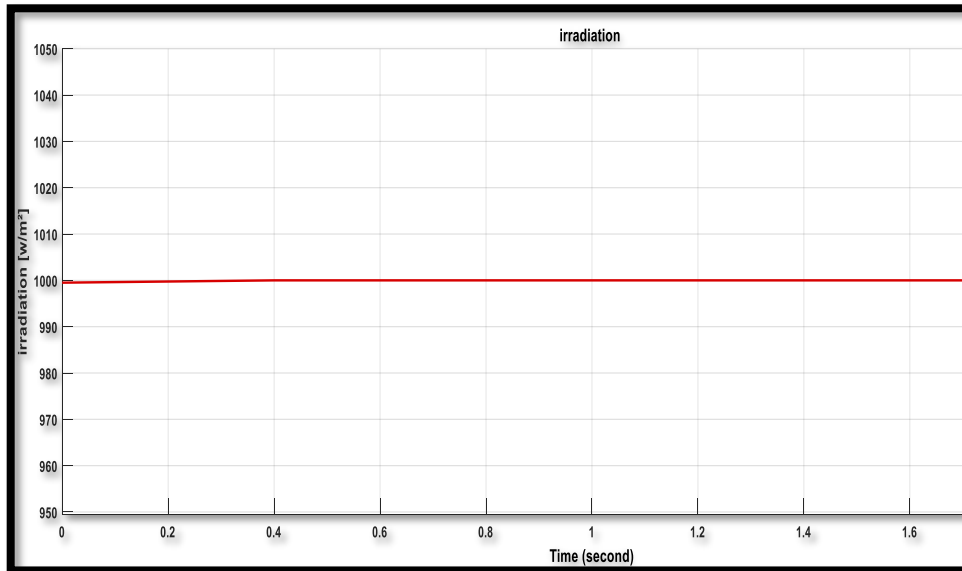


FIGURE III. 12 irradiation constant

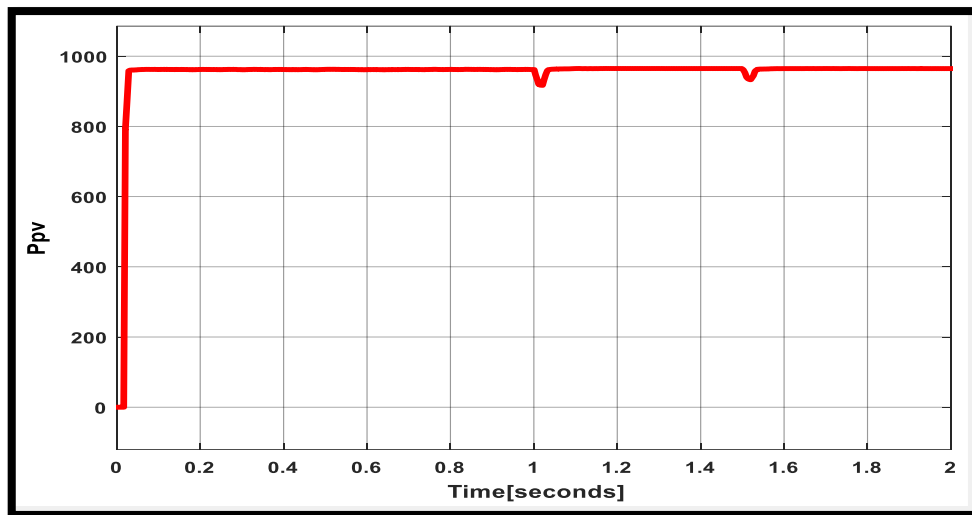


FIGURE III. 13 la puissance photovoltaïque

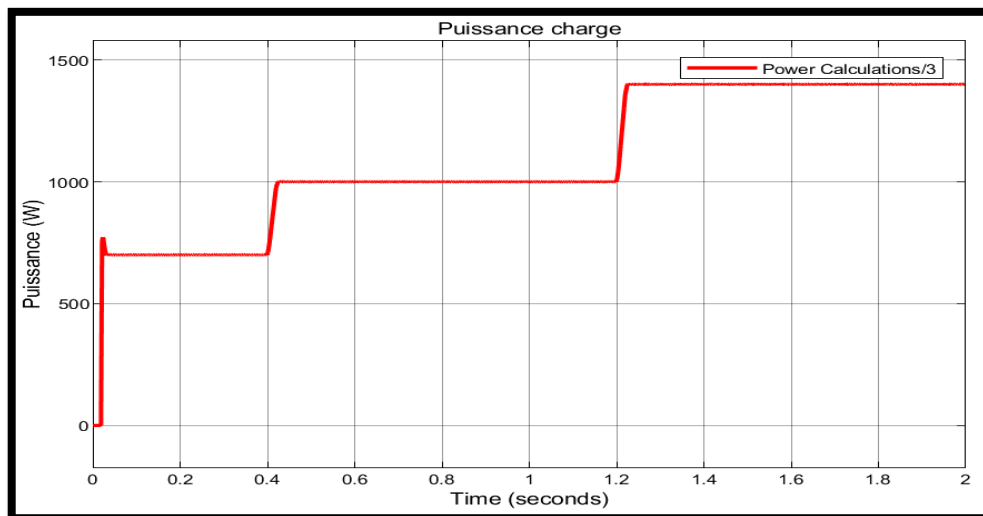


FIGURE III. 14 La puissance de la charge

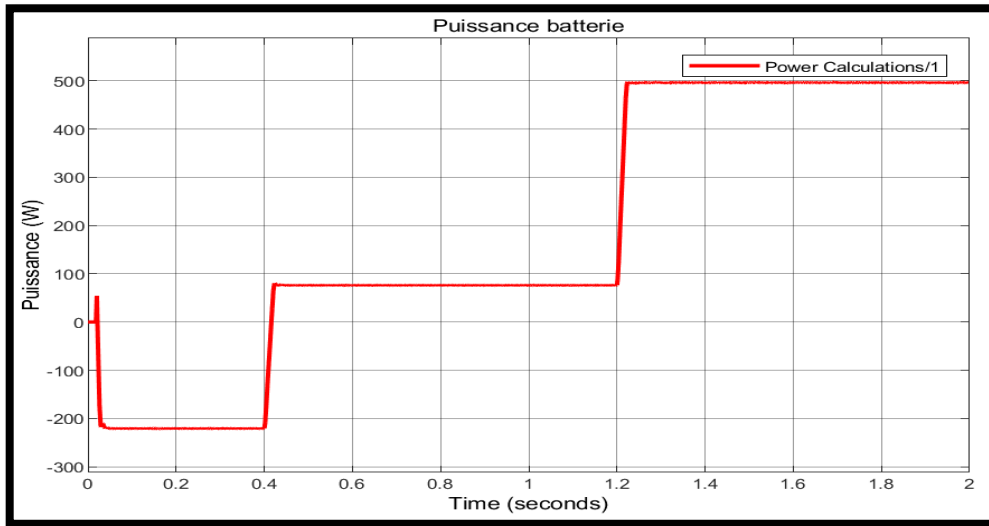


FIGURE III. 15 La puissance de la batterie

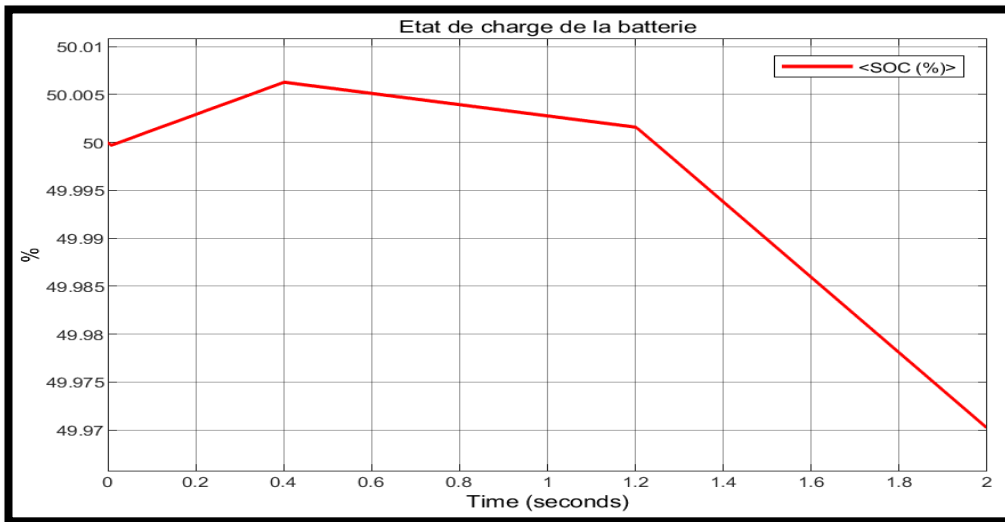


FIGURE III. 16 L'état de charge de la batterie

III.4 Conclusion

Les résultats de simulation de cette étude « la gestion énergétique d'un système PV / batterie » ont montré la bonne qualité de l'énergie PV produite et le bon fonctionnement d'une batterie lithum suivant les différents scenarios tel que irradiation variable et la variation de de charge selon les conditions de l'algorithme energetique prpposé .

Conclusion Générale

IV Conclusion générale

Le travail présenté dans ce mémoire traite le développement d'un algorithme de la gestion énergétique d'un système PV/Stockage.

Dans un premier chapitre, on a donné des généralités et la modélisation du système photovoltaïque et ses différents composants et on a fait référence au stockage énergétique et les technologies de stockage électrochimique.

Dans un deuxième chapitre, on a donné la modélisation des générateurs DC/DC (Buck-Boost) et la commande MPPT « perturbation et observation », nous avons exposé notre attention a été focalisée plus particulièrement au système de stockage par batterie électrochimique type lithium notamment que ce type de technologie est largement utilisée comme un système de stockage dans plusieurs domaines, Ensuite, on a donné la modélisation de la batterie en état de charge et de décharge, et aussi modélisation du hacheur Buck-Boost pour utiliser pour charger et décharger de notre batterie.

Dans le troisième chapitre, on a présenté l'intégration d'un système PV /batterie sous deux scénarios, le premier cas avec une irradiation variable et le deuxième avec la charge variable puis on a présenté un algorithme de gestion qui a pour rôle de gérer l'énergie produite par le générateur photovoltaïque et assure le bon fonctionnement de la batterie (charge/décharge).

D'après les résultats obtenus de la simulation Nous pouvons conclure,

❖ Le convertisseur DC-DC et la commande MPPT effectuent correctement leurs rôles. Le convertisseur fournit dans les conditions optimales une tension à sa sortie supérieure à celle fournie par le générateur PV et La commande MPPT adapte le générateur PV à la charge transférée de la

❖ La gestion énergétique assure le bon fonctionnement et la stabilité de système

Références bibliographiques

Références bibliographiques :

- [1]F. Bouchtu checherfa, “Etude et réalisation d'une centrale photovoltaïque connectée au réseaude distribution électrique BT,” *Mémoire de magister, Ecole National PolytechniqueEI Harrach*, 2004.
- [2]G. Rami, “Contrôle de tension auto adaptif pour des productions décentralisées d'énergie connectées au réseau électrique de distribution,” *Thèse de doctorat L'INP Grenoble*, Novembre 2006.
- [3] N. Abouchabana, « Etude d'une nouvelle topologie buck-boost appliquée à un MPPT », [4]Mémoire de Magistère, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Algérie, 2009. .
- [5]Boualem.Bendib, “Technique conventionnelles et avanccée de poursuite MPPT pour des applications photovoltaïque : étude comparative,”, *mémoire de magister, Université Ferhat Abbes-Sétif, Département d'électronique TS4/6338*, 2007.
- [6]S. Naoual, “Modélisation et extraction automatique des Paramètres d'un générateur,”, *mémoire de magister, Université Ferhat Abbas de Sétif, département d'électrotechnique*, 2010.
- [7]Olivier .Géraud, “Modélisation énergétique et optimisation économique d'un système de production éolien et photovoltaïque couplé au réseau et associé à un accumulateur,”, *Thèse de doctorat en Electrotechnique de l'Ecole Normale Supérieure de Cachan*, 2002.
- [8]M. Belkacem, «Etude et optimisation d'un transfert d'énergie électrique en conversion photovoltaïque par la recherche du point de puissance Maximale», *Mémoire Master, Université de Tlemcen* ,2015
- [9]B .Flèche, D. Delagnes, “énergie solaire photovoltaïque,”, STI ELT, juin 2007, énergie solaire photovoltaïque. [9] Baroud .kendo. li, “Etat de l'art et modélisation des microcentrales,”, *Magister en électrotechnique de l'université mentouri de Constantine*, 2007.
- [10]J. Royer , T. Djiako, E. Schiler and B. Sadasy, “ Le pompage photovoltaïque,”, *Université d'Ottawa*, 1998.
- [11]B. Flèche, D. delagnes, “énergie solaire photovoltaïque,”, STI ELT juin, 2007.
- [12]Y. Pankow, “Etude de l'intégration de la production décentralisée dans un réseau basse tension application au générateur photovoltaïque ,”, *Thèse de Doctorat, centre nationale de recherche technologique de Lille*, 2004.
- [13]Modélisation et simulation d'une module photovoltaïque licence ELM univ BBA. Boulal mohamed amine.
- [14]MEFLAH AISSA « Modélisation et commande d'une chaine de pompage photovoltaïque » Thème de Magister, UNIVERSITE ABOU BEKR BELKAID – TLEMCCEN 2012 [26].
- [15]Reynaud. Jean-François, “Recherches d'optimums d'énergies pour charge/décharge d'une batterie à technologie avancée dédiée à des applications photovoltaïques”, *Thèse*

Doctorat, Université Toulouse III, Le :4 Janvier 2011.

[16] S. Chikha, “Optimisation de la puissance dans les systèmes photovoltaïques,” Mémoire.

[17] Bernardi, D., E. Pawlikowski, and J. Newman, A general energy balance for battery systems. *Journal of the electrochemical society*, 1985. 132(1): p. 5-12.

[18] Alain. Bilbao. Learreta, “Réalisation de commandes MPPT numériques,” Diplôme ingénieur technique industriel, septembre 2006.

[19] Nouar. Aoun, “Etude et modélisation des différents modèles de la cellule photovoltaïque établis sur base de valeurs nominales,” *Mémoire de magister en physique, université mentouri constantine, Alger*, 2010.

[20] M.N.Mchalikh and CH.Hmada , “Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque en fonctionnement autonome et connecté au réseau,” *Mémoire de Master Université Kasdi Merbah–Ouargla* 2013.

[21] Shepherd, C. M., Design of primary and secondary cell. An equation describing battery discharge. *Journal of the Electrochemical Society*, 1965. 112(7): p. 657-664. 138..

[22] Lee, K.-J., et al., Three dimensional thermal-, electrical-, and electrochemical-coupled model for cylindrical wound large format lithium-ion batteries. *Journal of Power Sources*, 2013. 241: p. 20-32. 137.

[23] B. Faiza, “étude et simulation d’une commande mppt pour système PV,” *Diplôme Master, Université Mohamed Boudiaf - M’sila*, 2015 – 2016.

[24] Khan, M., M. Swierczynski, and S. Kaer, Towards an ultimate battery thermal management system: a review. *Batteries*, 2017. 3(1): p. 9

[25] Mémoire fin d’étude master 2, “Réalisation d’un convertisseur DC/DC dans une chaîne de conversion d’énergie photovoltaïque,” Université d’Ain Baida 2017. GOAR Noureddine et MAHMOUDI Abdelkader

[26] Vincent. Barth, “ dipyrrométhènes métallisés (Co, Ni, Cu) et Dipyrrométhènes : de nouveaux matériaux organiques pour la conversion photovoltaïque de l’énergie solaire,” *Thèse de doctorat de chimie moléculaire, Université pierre et marie*, 2013.

[27] N. Abouchabana, “ Etude d’une nouvelle topologie buck-boost appliquée à un MPPT,”

Mémoire de Magistère, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, 2009.

[28] OUABDELKADER Katia, MERSEL Houria, « Modélisation et Contrôle d’un Système Photovoltaïque Connecté au Réseau », mémoire de master , , UNIVERSITE de abderrahmane mira de bejaia, 2014/2015

[29] Mémoire fin d’étude master 2 Pour l’obtention du diplôme de Master Filière : Automatique Spécialité : Automatique et informatique industrielle « Etude comparative de certaines méthodes MPPT appliquées pour les panneaux solaires » université Abderrahmane Mira Faculté de la Technologie 2020/2021. Réalisée par DAHMANI Hanane et ABDLHAK

Lynda.

[30] Mémoire de fin d'études « Réalisation d'un convertisseur DC/DC dans une chaîne de conversion d'énergie photovoltaïque », université Ain el Beida le : Juin 2017.

[31]. S. Chikha, "Optimisation de la puissance dans les systèmes photovoltaïques,"
Mémoire

de Magistère, université de OEB, 2011/2012.

[31]. M.S. Amamra, " Optimisation de la production d'un générateur Photovoltaïque,"
Thèse master université de Ouargla, 2015.

[32]. S. ABOUDA, « Contribution à la commande des systèmes photovoltaïques : application aux systèmes de pompage » *Thèse de doctorat, cotutelle de l'Université de Reims Champagne-Ardenne et de l'Université de Sfax, Avril 2015.*

[33]H. Abbes, H. Abid, K. Loukil, A. Toumi, M. Abid, " Etude comparative de cinq algorithmes de commande MPPT pour un système photovoltaïque,"
Université de Sfax, Tunisie, 2013.

[34]MEFLAH AISSA « Modélisation et commande d'une chaîne de pompage photovoltaïque » Thème de Magister, UNIVERSITE ABOU BEKR BELKAID – TLEMCEM 2012 [26].

[35] DIAB Yasser, « ÉTUDE ET MODELISATION DES SUPERCONDENSATEURS : APPLICATIONS AUX SYSTEMES DE PUISSANCE », Thèse Doctorat, Université de Damas, Syrie 2009.

[36] Jérémy.D, Bruno. J, Lionel. Sé, Corinne. A « Dimensionnement multi-objectif d'une association batterie – super condensateur pour une application photovoltaïque » article, May 2016, Toulouse, France. hal-01316502

[37] : N. Abouchabana, « Etude d'une nouvelle topologie buck-boost appliquée à un MPPT »,Mémoire de Magistère, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Algérie, 2009.

[38] M. Belkacem, «Etude et optimisation d'un transfert d'énergie électrique en conversion photovoltaïque par la recherche du point de puissance Maximale», Mémoire Master, Université de Tlemcen ,2015

[39] Nishad Mendis,« Management of Battery-Supercapacitor Hybrid Energy Storage and Synchronous Condenser for Isolated Operation of PMSG Based Variable-Speed Wind Turbine Generating Systems »,article, IEEE TRANSACTIONS ON SMART GRID, VOL. 5, NO. 2, MARCH 2014

.[39] Bati E.B et Prosper Gbaha et Kamenan Blaise Koua, Magloire Paul Ekoun Koffi, « Dimensionnement et Gestion de l'Energie au Sein d'un Système Hybride de Production d'Energie », article, Laboratoire de Mécanique et Sciences des Matériaux, Yamoussoukro, Côte d'Ivoire,2018

Annexe

Paramètres du panneau photovoltaïque sont:

Résistance en série : $R_s = 0.196$

Résistance en parallèle : $R_p = 31.6334$

Nombre des panneaux en parallèles : $N_{pp} = 4$ Nombre des panneaux en séries : $N_{ss} = 2$ Le photo-courant généré : $I_{pv} = 61$ A Courant maximal : ; $I_{mp} = 7.1$ A

Tension maximale : $V_{mp} = 311$ V

L'insolation nominale : $G = 1000$ [W/m²]

La température de la jonction dans les conditions nominales : $T = 293$ [K]

Caractéristiques de la choisie sous Matlab/Simulink :

Capacité de batterie=50 F

Résistance de Batterie : $R = 0.017$ Ω Tension de batterie : $V_{bat} = 24$ V Nombre des capacités en série : $N_s = 6$

Nombre des capacités en parallèles : $N_p = 10$ Voltage initial=50 V

La capacité du condensateur de sortie :

$$C = \frac{I_s \alpha T}{\Delta V_s} = 300e-6 \text{ F}$$

L'inductance : $1e-3$ H