



La République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la
Recherche Scientifique



Université Saad Dahlab de Blida 1
Faculté de Technologie
Département des énergies renouvelables

Mémoire

Présenté pour l'obtention du diplôme de

MASTER

Spécialité : Conversion Photovoltaïque

Par

KHELFI Abdessalam

DAHMANE Othman

Thème :

***Modélisation Et Commande Intelligente D'un Chargeur De Batterie A
Usage Photovoltaïque.***

Déposé le 13 /07/2021 devant le jury composé de :

Abdelkader Hamid

Grade/ USBD-Blida

Président

DOMAZE Toufik

Grade/ USBD-Blida

Examineur

DEGLA Aicha

MRB/ CDER-l'EPST

Encadreur

BOUKENOUI Rachid

Grade/ USBD-Blida

Co-Encadreur

Année Universitaire 2020-2021

ملخص

يقدم هذا العمل عنصر تحكم لشاحن بطارية MPPT شمسي مع مقارنة بين تقنيتين MPPT أحدهما كلاسيكي من خلال طريقة Perturb و Observe وطريقة ذكية أخرى تعتمد على الشبكات العصبية. يتم تضمين شاحن البطارية في نظام مستقل الضوئية، ويتم تنفيذ المحاكاة والتحكم في النظام تحت بيئة Matlab / Simulink .

كما تتم مقارنة أداء النظام وفقا لتغير الغلاف الجوي. وأظهرت نتائج المحاكاة أن خوارزمية MPPT للشبكة العصبية أداء أفضل في ظل التغيرات في الإشعاع الشمسي وهذا يساهم مباشرة في الأداء السليم للتحكم الشمسي والبطارية.

الكلمات المفتاحية: بطارية, نظام كهروضوئي مستقل , وحدة تحكم MPPT , الشبكة العصبية

Abstract

This work presents a control for a solar MPPT battery charger with a comparison between two MPPT techniques one classical by the Perturb and Observe method and another intelligent method based on neural networks. The battery charger is included in a stand-alone photovoltaic system; the simulation and control of the system are performed under the Matlab/Simulink environment.

The performance of the system is also compared according to the atmospheric change. The simulation results showed that the neural network MPPT algorithm performs better under changes in solar irradiation and this contributes directly to the proper functioning of the solar controller and the battery.

Keywords: battery, stand-alone PV system, MPPT regulator, neural network.

Résumé

Ce travail présente une commande pour un chargeur de batterie solaire MPPT avec une comparaison entre deux techniques de MPPT une classique par la méthode perturbe and observe et une autre méthode intelligente basé sur les réseaux de neurones. Le chargeur de batterie est inclus dans un système photovoltaïque autonome, la simulation et la commande du système sont effectuées sous l'environnement Matlab/Simulink.

Les performances du système sont également comparées selon le changement atmosphérique. Les résultats de la simulation ont montré que l'algorithme de MPPT par réseau de neurones à de meilleures performances lors des changements de l'irradiation solaire et cela à contribue directement pour le bon fonctionnement du régulateur solaire et pour la batterie.

Mot clé : batterie, système PV autonome, régulateur MPPT, réseau de neurones.

ABDESSALAM KHELFI

Dédicaces

Je dédie ce travail qui n'aura jamais pu voir le jour sans les soutiens indéfectibles et sans limite de mes chers parents qui ne cessent de me donner avec amour le nécessaire pour que je puisse arriver à ce que je suis aujourd'hui.

Que dieux vous protège et que la réussite soit toujours à ma portée pour que je puisse vous combler de bonheur.

Je dédie aussi ce travail à :

Mes sœurs : Messaouda, Fatima Zohra, Nora, Anfall.

Mon oncle : Slimane.

Tous mes cousins et cousines : Otmane, Ismail, Mohamed...

Tous mes amis, mes collègues : Hossam Ala Eddine, Ahmed, Omar, Soufyane, Abdelhamid, Abdessalam, Mourad, Belkacem, abdelrahamen, Nadir, Mustapha, Moussab

Et tous ceux qui m'estiment.

OTHMAN DAHMANE

Dédicaces

À Ma chère mère qui est ma source de bonheur et qui m'a entourée d'amour et de tendresse.

Mon cher père pour son soutien inlassable et qui s'est sacrifié pour moi.

Sans oublier mes frères et mes sœurs.

A tous mes camarades et mes amis en particulier Maali Asma, Kadri Sofiane, Ghoul Abdelhamid, Rahmouni Abdessalam, MEKLOUT Yanis.

Remerciements

Nous tenons à remercier le chef de département pour l'opportunité de réaliser ce travail dans notre département.

Nous remercions le président et les membres du jury pour avoir accepté et jugé ce travail.

*Nous remercions profondément notre promotrice, **Dr.DEGLA Aicha**, pour avoir accepté de diriger notre travail et pour nous avoir guidés tout au long de la thèse pour ses conseils, ses critiques et ses attitudes exemplaires tout au long de la réalisation de ce travail de recherche.*

Nos vifs remerciements vont également aux membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre recherche en acceptant d'examiner notre travail et de l'enrichir par leurs propositions

Enfin, nous tenons à remercier tous les membres de notre famille pour leur soutien et leur appui moral. Nous leur serons reconnaissants pour le reste de notre vie.

Nous tenons à exprimer notre profonde reconnaissance et nos sincères remerciements à toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à l'avancement de notre travail de recherche.

Sommaire

RESUME.....	I
DEDICACES	II
REMERCIEMENTS.....	III
SOMMAIRE.....	IV
LISTE DES FIGURES	VI
LISTE DES TABLEAUX.....	VII
NOMENCLATURE.....	VIII
INTRODUCTION GENERALE	1
CHAPITRE 1 : ETAT DE L'ART SUR LES REGULATEURS DE CHARGE DE BATTERIE	2
1.1. INTRODUCTION.....	2
1.2. ÉTAT DE L'ART SUR LES TECHNIQUES DE CHARGE DE BATTERIE DANS UN SYSTEME PV AUTONOME.....	2
1.3. REGULATEUR DE CHARGE	4
1.4. SCHEMA DE BASE D'UN REGULATEUR DE CHARGE	4
1.5. PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT :	4
1.6. TYPE DE REGULATEUR DE CHARGE.....	5
1.6.1. Les caractéristiques du régulateur de charge série	5
1.6.2. Les caractéristiques du régulateur de charge shunt PWM	6
1.6.3. Les caractéristiques du régulateur de charge MPPT.....	6
1.7. LES DIFFERENTES TECHNIQUES DE CHARGE DES BATTERIES	7
1.7.1. Courant constant (CC) :	7
1.7.2. Tension constante (CV) :	7
1.7.3. Courant constant - Tension constante (CC-CV) :	7
1.7.4. Chargement par impulsion (PC) :	8
1.7.5. Charge réflexe ou charge à impulsion négative (NPC).....	8
1.7.6. Trickle Charge ou Taper-Current (TC) :	8
1.7.7. Charge flottante (FC) :	9
1.8. ÉTAPES DE CHARGE D'UN CONTROLEUR DE CHARGE	9
1.8.1. Etape de charge à courant constant (Bulk).....	9
1.8.2. Etape de charge à tension constante	9
1.8.3. Etape d'entretien (Float)	9
1.9. LES DIFFERENTES TECHNOLOGIES DES REGULATEURS DE CHARGE.....	10
1.9.1. Le régulateur de charge solaire STECA PR 3030 12 / 24 volts – LCD :	10
1.9.2. Régulateur solaire à trois fonctions morningstar Tirstar :	11
1.9.3. Régulateur de charge solaire MPPT 15 A :	13
1.9.4. Le contrôleur solaire TriStar MPPT :	14
1.10. CONCLUSION	16
CHAPITRE 2 : MODELISATION DU SYSTEME PHOTOVOLTAÏQUE AUTONOME... 17	
2.1. INTRODUCTION.....	17
2.2. SYSTEME PHOTOVOLTAÏQUE.....	17
2.3. CHAMPS PHOTOVOLTAÏQUES	18
2.3.1. Effet photovoltaïque.....	18
2.4. CONVERTISSEUR DC-DC BOOST.....	22

2.4.1. Principe de fonctionnement	23
2.4.2. Modèle mathématique du boost	23
2.4.3. Commande du boost	24
2.4.4. Calcul du rapport de conversion	24
2.4.5. Modélisation et simulation d'un convertisseur DC- DC Boost sous MATLAB	25
2.5. CONVERTISSEUR DC-DC BIDIRECTIONNEL	27
2.5.1. Modes de fonctionnement	28
2.6. BATTERIE AU LITHIUM-ION	29
2.6.1. La modélisation sous MATLAB de la batterie	31
2.7. CONCLUSION	34
CHAPITRE 3 : CONTROLE DU SYSTEME DE STOCKAGE.....	35
3.1. INTRODUCTION :	35
3.2. COMMANDE MPPT	35
3.3. ALGORITHMES DE SUIVI DU POINT DE PUISSANCE MAXIMALE (MPPT).....	35
3.3.1. Perturbation et observation (P and O) MPPT	35
3.3.2. Réseau de neurones artificiels ANN MPPT.....	36
3.3.3. Comparaison de la méthode ANN et de la méthode P and O avec plusieurs scénarios	38
3.4. CONCLUSION	42
CONCLUSION GENERALE	43
REFERENCES.....	44

Liste des figures

Chapitre 1

FIGURE 1- 1 : LE SCHEMA DE BASE D'UN REGULATEUR DE CHARGE	4
FIGURE 1- 2 : LE SCHEMA EQUIVALENT DE REGULATEUR SERIE [5].....	5
FIGURE 1- 3 : LE SCHEMA EQUIVALENT DE REGULATEUR SHUNT [5].....	6
FIGURE 1- 4 : LE SCHEMA EQUIVALENT DE REGULATEUR MPPT [5].....	7
FIGURE 1- 5 : PROFIL DE CC/CV [7].....	8
FIGURE 1- 6 : RELATION ENTRE LE COURANT ET LA TENSION PENDANT LES TROIS PHASES DU CYCLE DE CHARGE. [4].....	10
FIGURE 1- 7 : REGULATEUR STECA PR 3030 12 / 24 VOLTS – LCD L. [8]	11
FIGURE 1- 8 : REGULATEUR MORNINGSTAR TRISTAR. [10]	12
FIGURE 1- 9 : REGULATEUR MPPT 15 A. [11]	14
FIGURE 1- 10 : REGULATEUR TRISTAR MPPT. [12].....	15

Chapitre 2

FIGURE 2.1 : SCHEMA SYNOPTIQUE DU SYSTEME PV	18
FIGURE 2.2 : SCHEMA D'UNE CELLULE ELEMENTAIRE	19
FIGURE 2.3 : CIRCUIT EQUIVALENT D'UNE CELLULE PHOTOVOLTAÏQUE	20
FIGURE 2.4 : SCHEMA DE SIMULATION D'UNE CELLULE PHOTOVOLTAÏQUE	21
FIGURE 2.5 : CARACTERISTIQUE I-V ET P-V DU CHAMP PV POUR UNE IRRADIATION DE 1000 W/M ² ET T=25°C.....	22
FIGURE 2.6 : SCHEMA DE BASE DU CIRCUIT DU CONVERTISSEUR BOOST[16].....	22
FIGURE 2.7 : SCHEMA ELECTRIQUE DU CONVERTISSEUR BOOST PROPOSE	25
FIGURE 2.8 : LA VARIATION DE TENSION D'ENTREE ET DE SORTIE DU BOOST EN FONCTION DE TEMPS.	26
FIGURE 2.9 : LA VARIATION DE LA PUISSANCE D'ENTREE ET DE SORTIE DU BOOST EN FONCTION DE TEMPS ...	27
FIGURE 2.10 : SCHEMA DE CIRCUIT DU SYSTEME PHOTOVOLTAÏQUE AVEC STOCKAGE UTILISANT UN CONVERTISSEUR DC DC BIDIRECTIONNEL.	28
FIGURE 2.11 : LE MASQUE DE BLOC DU MODELE DE BATTERIE LITHIUM-ION (SIMPOWERSYSTEMS) [27].....	31
FIGURE 2.12 : LE MODELE DE BATTERIE - SCHEMA FONCTIONNEL DES SOUS-SYSTEMES DANS MATLAB SIMULINK, QUI MET EN ŒUVRE UN MODELE GENERIQUE DE BATTERIE LITHIUM-ION [27,28].	31
FIGURE 2.13 : DECHARGE DE LA BATTERIE LITHIUM-ION AU COURANT DE DECHARGE NOMINAL[29]	32

Chapitre 3

FIGURE 3-1 : ORGANIGRAMME DE L'ALGORITHME P AND O	36
FIGURE 3-2 : ARCHITECTURE D'UN RESEAU DE NEURONES ARTIFICIELS TYPIQUE.....	37
FIGURE 3-3 : MODELE SIMULINK POUR LA METHODE ANN	38
FIGURE 3-4 : CIRCUIT SIMULE DE PV MPPT PAR L'ALGORITHME P AND O	38
FIGURE 3-5 : CIRCUIT PV SIMULE MPPT PAR L'ALGORITHME NN	39
FIGURE 3-6 : PROFIL INCREMENT DE L'ECLAIREMENT SOLAIRE A 25°C.....	39
FIGURE 3-7 : PUISSANCE DU CHAMP PV PAR DEUX TECHNIQUES DE MPPT ; P AND O ET NN.	40
FIGURE 3-8 : COURANT DE CHARGE DE LA BATTERIE.	40
FIGURE 3-9 : (A) TENSION DE LA BATTERIE ;(B) SOC DE LA BATTERIE.	41
FIGURE 3-10 : PUISSANCE DU CHAMP PV PAR NN.....	41
FIGURE 3-11 : COURANT DE CHARGE DE LA BATTERIE.	41
FIGURE 3-12 : (A) TENSION DE LA BATTERIE ;(B) SOC DE LA BATTERIE.	42

Liste des tableaux

Chapitre 1

TABLEAU 1-1 : PRESENTE LA CARACTERISTIQUE DE REGULTEUR DE CHARGE SOLAIRE STECA PR 3030 12 / 24 VOLTS – LCD.....	10
TABLEAU 1-2 : PRESENTE LA CARACTERISTIQUE DE REGULTEUR DE CHARGE SOLAIRE A TROIS FONCTIONS MORNINGSTAR TIRSTAR LCD.....	11
TABLEAU 1-3 : PRESENTE LA CARACTERISTIQUE DE REGULTEUR DE CHARGE SOLAIRE MPPT 15 A.	13
TABLEAU 1-4 : PRESENTE LA CARACTERISTIQUE DE REGULTEUR DE CHARGE SOLAIRE TriSTAR MPPT.....	14

Chapitre 2

TABLEAU 2-1 : PARAMETRES ELECTRIQUES DE PANNEAUX PV ETUDIE	21
TABLEAU 2-2 : EXEMPLE DES TENSIONS RECOMMANDEES POUR UNE INSTALLATION PV POUR DIFFERENTES PUISSANCES CRETES [26].	31

NOMENCLATURE

<i>symbole</i>	<i>signification</i>	<i>unité</i>
V_{oc}	La tension en circuit ouvert	[V]
I_{sc}	Courant de court-circuit	[A]
K_i	Le coefficient de température de court-circuit.	[/]
K_v	Le coefficient de température en circuit ouvert.	[/]
T	La température.	[°C]
V_{oc}	La tension en circuit ouvert	[V]
G	L'irradiation solaire.	[W/m ²]
G_n	L'irradiation solaire nominale.	[W/m ²]
C	Capacité de stockage	[Ah]
C_{jr}	Consommation journalière requise	[Wh]
T	Autonomie	[h]
E	Potentiel de la batterie	[V]
E_0	Tension constante de la batterie	[V]
k	Constante de polarisation	[V / Ah]
Q	Capacité de la batterie	[Ah]
i	Courant de la batterie	[A]
$i_t = \int idt$	Capacité actuelle de la batterie	[Ah]
R	Résistance interne par unité de surface de la cellule	[Ω]
A	Amplitude de la zone exponentielle	[V]
B	Inverse de la constante de temps de la zone exponentielle	[Ah ⁻¹]
U_{acc}	Tension de l'accumulateur	[V]
η	Rendement de l'accumulateur	[%]
N_{bs}	Nombre de batteries en série	[/]
U_u	Tension d'utilisation	[V]
U_{bat}	Tension de la batterie	[V]
N_{bp}	Nombre de batteries en parallèle	[/]
C_{tot}	Capacité totale de l'accumulateur	[Ah]
C_u	Capacité utile	[Ah]
D	Le rapport cyclique.	[/]
f_s	La fréquence du mosfet.	[Hz]
ΔV	La limite de tension tolérable.	[V]
ΔI	La limite de courant tolérable.	[V]
R	La résistance de la charge.	[Ω]

<i>Abréviation utilisées</i>	
PV	Panneau Photovoltaïque.
GPV	Générateur Photovoltaïque.
MLI	Modulation de la Largeur d'impulsion.
PPM	Le point de puissance Maximale.
MPPT	Maximum Power Point Tracking
P&O	La perturbation et l'observation.
ANN	Réseau de neurone artificiel.
SOC	Etat de charge de batterie.
CC	Courant constant.
CV	Tension constante.
CC-CV	Courant constant tension constante.
PC	Charge par impulsions.
NPC	Charge réflexe ou charge par impulsions négatives
TC	Charge de ruissellement ou courant conique.
FC	Charge flottante
<i>DOD</i>	Profondeur de décharge de la batterie
DC	Courant Continu
ISC	Courant de court-circuit

<i>Indices et exposants</i>	
N	Electron
T	trou

Introduction Générale

Des progrès significatifs ont été réalisés ces dernières années dans la recherche et le développement des systèmes d'énergie renouvelables tels que les systèmes d'énergie éolienne, houlomotrice et solaire. Parmi ces ressources, l'énergie solaire est considérée aujourd'hui comme l'une des sources d'énergie renouvelable les plus fiables, les plus disponibles au quotidien et les plus respectueuses de l'environnement.

Dans le système photovoltaïque autonome, le système est conçu pour fonctionner indépendamment du réseau électrique et est généralement conçu et dimensionné pour alimenter certaines charges électriques en courant continu et/ou alternatif. Des batteries sont utilisées pour stocker de l'énergie sous forme de courant continu produite par les modules photovoltaïques (PV), afin de l'utiliser pendant la nuit ou pendant les jours sans soleil. Le courant continu produit par les batteries peut être utilisé immédiatement pour faire fonctionner certaines charges à faible tension continue, telles que des ampoules ou des réfrigérateurs, ou il peut être converti par un onduleur en tension alternative pour faire fonctionner les charges alternatives qui constituent la plupart des appareils. Comme la puissance de sortie d'un panneau solaire varie en fonction des conditions météorologiques, l'activité gratifiante du système autonome consiste à déterminer la taille optimale du panneau solaire et de la batterie pour répondre à la demande de la charge. Cependant, les systèmes PV souffrent généralement de leur faible efficacité et de leur coût élevé. Afin de surmonter ces inconvénients, la puissance maximale doit être extraite du panneau PV en utilisant des techniques MPPT pour optimiser l'efficacité du système PV global.

Dans ce mémoire, une méthode de contrôle de suivi du point de puissance maximale (MPPT) utilisant un les réseaux de neurones (NN) pour un système photovoltaïque est présentés.

Le travail présenté dans ce mémoire traitera trois parties essentielles :

Premier chapitre : dans ce chapitre, nous présentons un état de l'art sur les régulateurs de charge de batterie pour un système photovoltaïque autonome ainsi que leur principe de fonctionnement.

Deuxième chapitre : Dans le second chapitre une modélisation de tous les composants qui constitue le système étudié a été effectuée.

Troisième chapitre : dans ce chapitre une commande du chargeur de batterie sous l'environnement Matlab/Simulink a été effectuée, nous présentons aussi une comparaison entre deux techniques de MPPT en utilisant deux algorithmes ; un algorithme classique et un autre intelligent. Les résultats ont été expliqués et simulés dans différentes conditions atmosphériques.

Chapitre 1 : Etat de l'art sur les régulateurs de charge de batterie

1.1. Introduction

Les panneaux solaires convertissent l'énergie lumineuse en électricité pendant toute la durée de l'ensoleillement, l'excès de l'électricité produite sera stocker pour le besoin en dehors de la durée de production, les batteries présentent une solution de stockage infaillible l'utilisation de ce dispositif est très importante dans les installations photovoltaïques autonomes. Elles procèdent un nombre de charge et de décharge qui s'appelle le cycle. Pour suivre l'état de charge il faut utiliser un appareil qui va contrôler la charge de ce dernier c'est ce qu'on appelle le régulateur.

Dans ce chapitre nous présentons un état de l'art sur les techniques de charge de batterie dans un système PV autonome une revue des techniques de contrôle de la charge des batteries pour les systèmes photovoltaïques. Ainsi son principe de fonctionnement, ses caractéristique technique aussi les différentes techniques du contrôle de charge solaire et les étapes de charge d'un contrôleur-

1.2. État de l'art sur les techniques de charge de batterie dans un système PV autonome

Beaucoup de recherches intensives et continues sur la conception et la mise en œuvre des régulateurs des chargeurs solaires pour améliorer leurs performances tels que l'efficacité, augmenter leur vitesse du point de puissance maximale et réduire la période de charge. Une nouvelle technique MPPT a été introduite. Elle présente des améliorations significatives dans le suivi du point de puissance maximale grâce à l'emploi de la recherche binaire au lieu de l'utilisation de la technique de recherche linéaire dans les méthodes MPPT traditionnelles. En outre, une revue des différentes stratégies, d'algorithmes et de méthodes pour mettre en œuvre un système de contrôle de charge intelligent.

Parmi ces travaux on peut citer Goli P et Shireen W ont proposé une stratégie de contrôle basée sur la détection de la tension du lien CC pour une station de charge intelligente alimentée par le PV. Ce système a été conçu pour charger les véhicules électriques hybrides rechargeables (PHEV) à partir de la production photovoltaïque connectée au réseau, ou du service public ou les deux, il introduit une approche pour l'estimation de la tension de circuit ouvert en fonction des paramètres du réseau électrique le modèle équivalent de cette approche était basée sur l'algorithme récursif du filtre de Kalman pour estimer dynamiquement l'état de charge d'une batterie. Bendib B, Krim F, Belmili H, Almi MF et Boulouma S ont présenté une méthode intelligente de MPPT utilisant un contrôle par logique floue pour le photovoltaïque autonome. De plus, un MPPT basé sur un contrôleur flou adaptatif pour les systèmes photovoltaïques il a démontré une évaluation de la performance de différents types d'algorithmes MPPT sous ombrage partiel. FathyAhmed a présenté une approche modified artificiel bee colony basé pour atténuer les pertes de puissance

dans le module PV sous l'effet d'ombrage partiel. Rizzo Santi Agatino et Scelba Giacomo ont proposé une méthode MPPT basée sur un réseau neuronal artificiel (ANN). Il a fait face au compromis entre le nombre de scansions caractéristiques présélectionnées de la puissance à la tension, la taille du ANN et sa précision de prédiction. Deshkar Shubhankar Niranjan, Dhale Sumedh Bhaskar, Mukherjee Jishnu Shekar, Babu T Sudhakar et Rajasekar N ont discuté d'une méthode basée sur un algorithme génétique pour reconfigurer les connexions électriques entre les panneaux afin d'aller chercher le MPP optimal. De plus, un contrôleur de charge intelligent pour prolonger la durée de vie des batteries. Il a discuté de la nécessité et les avantages d'un tel contrôleur de charge et a appliqué des tests sur un prototype. Nguyen Thanh-Tuan, Kim Hyung Won, Lee Geun Hong et Choi Woojin ont proposé

Un chargeur solaire rapide et peu coûteux en utilisant un convertisseur Buck avec un processeur de signal numérique. Le travail a été testé en utilisant Elgar Terra comme simulateur de panneau solaire pour vérifier la faisabilité et la validité du système et de son algorithme de contrôle. De plus, la conception et le développement d'un contrôleur de charge solaire basé sur un microcontrôleur a présenté une conception de chargeur PV basé sur MPPT. En outre, un contrôleur MPPT avec des algorithmes de contrôle pour le panneau solaire rotatif, qui augmente l'efficacité du véhicule électrique hybride rechargeable (PHEV) en utilisant des panneaux solaires rotatifs. Ce contrôleur MPPT mécatronique double est adapté au système PHEV. En outre, un contrôleur de charge de batterie solaire conçu qui combine les contrôles MPPT et de surtension en une seule fonction de contrôle. Il a été démontré que le contrôleur conçu a une bonne réponse transitoire avec seulement un petit dépassement de tension. Alors qu'a conçu un contrôleur MPPT analogique pour un système solaire qui utilise le courant de charge pour obtenir une puissance de sortie maximale du panneau solaire. En outre, la modélisation et la conception du contrôle du système de chargeur PV utilisant un convertisseur Buck-Boost. Ce contrôleur a été conçu pour équilibrer le flux de puissance du module PV vers la batterie et la charge de sorte que la puissance PV soit utilisée efficacement. La batterie a été chargée en trois étapes de charge. Harish A et Prasad MVD ont proposé une technique permettant d'extraire la puissance maximale d'un panneau photovoltaïque pour charger la batterie Ce contrôleur de charge MPPT peut être utilisé pour utiliser la puissance maximale de sortie des panneaux solaires au lieu d'investir dans un certain nombre des panneaux solaires. En outre, une interface RS485 a été incluse à fins de surveillance. Alors qu'a introduit un convertisseur de puissance de type Buck pratique pour le système PV pour une application de stockage d'énergie basée sur un algorithme MPPT à tension constante. Les résultats de simulation et expérimentaux démontrent l'efficacité et la validité du système proposé. En outre, un contrôleur de charge solaire MPPT efficace a été présenté pour augmenter l'efficacité du transfert de puissance par rapport aux systèmes à connexion directe, réduisant ainsi la taille et le coût du panneau PV. Un contrôleur d'interface périphérique (PIC) basé sur un contrôleur de charge solaire pour batterie, les limites des contrôleurs sont la lenteur de la réponse de suivi, la faible précision et l'erreur importante en régime permanent, l'oscillation autour de la MPP et le temps de charge important, la dépendance au type de batterie et aussi au niveau de tension de charge. Les sections suivantes présentent la conception, la mise en œuvre et l'évaluation du contrôleur de charge proposé, montrant comment il conserve avec succès les bonnes caractéristiques des contrôleurs traditionnels et résout les inconvénients et les limitations. Les nouvelles fonctionnalités ajoutées telles que la surveillance à distance et les capacités d'administration. [1]

1.3. Régulateur de charge

Est un système automatique dont la fonction principale est d'assurer le contrôle de l'état de charge de la batterie c'est-à-dire éviter la surcharge et la décharge profonde. Quand la batterie est complètement chargée. Le régulateur se déconnecte du système PV. [2]

Le principe est de diminuer de façon automatique l'injection du courant dans la batterie quand celle-ci atteint sa pleine sa charge. Et de recharger la batterie durant les phases d'ensoleillement et de non utilisation.

1.4. Schéma de base d'un régulateur de charge

Le régulateur de charge est associé au générateur photovoltaïque et à la batterie, il contrôle la tension et le courant du panneau solaire pour charger les batteries solaires, assurant ainsi une protection contre les surcharges et la décharge profonde et d'optimiser à partir du champ photovoltaïque est en cours d'utilisation. Sa fonction est cruciale car il affecte directement sur la durée de vie de la batterie. Voir le schéma de principe du régulateur sur **la Figure 1.1**.

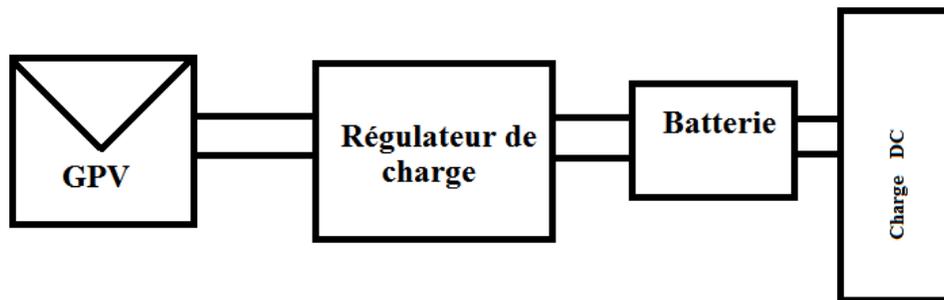


Figure 1- 1 : Le schéma de base d'un régulateur de charge

1.5. Principe de fonctionnement :

- Tension de régulation maximale : C'est la valeur de la tension nominale maximum que le régulateur permet d'appliquer à la batterie.
- Intervalle d'hystérésis supérieur c'est la différence entre la tension régulée maximale et la tension que le régulateur laisse passer tout le courant généré par le panneau solaire. Pour la valeur de tension intermédiaire, le régulateur laisse passer une partie du courant généré par le panneau photovoltaïque, qui diminue à mesure que la tension aux bornes de la batterie s'approche de la valeur de régulation maximale. [3]
- Tension de déconnexion : Tension à laquelle les charges des consommateurs sont automatiquement déconnectées pour éviter une décharge excessive de la batterie. [3]
- Intervalle d'hystérésis inférieur : Il s'agit de la différence entre la tension de déconnexion et la tension à laquelle les consommations sont autorisées à se reconnecter à la batterie. [3]

Le régulateur de charge il a deux fonctionnements protégé la batterie contre la surcharge lorsque la batterie est complètement chargée, elle coupera le courant circulant du panneau solaire à la batterie et protéger la batterie contre la décharge profonde lorsque les utilisations sont connectées à la sortie du régulateur de charge, elle déconnecte les utilisations lorsque la puissance de la batterie est inférieure au seuil d'état de charge critique de la batterie.

Le régulateur de charge protéger les panneaux solaires photovoltaïques contre les retours de charges électriques, contre de court-circuit et protéger la sonde de batterie (Protection thermique).

1.6. Type de régulateur de charge

Il existe trois groupes principaux de régulateurs de charge les plus utilisé dans le domaine photovoltaïque qui ces sont :

- Le régulateur de charge série
- Le régulateur de charge shunt PWM
- Le régulateur MPPT

1.6.1. Les caractéristiques du régulateur de charge série

Les régulateurs séries qui incorporent un interrupteur entre le générateur et la batterie pour arrêter la charge. Ces types de régulateurs sont connectés en série entre les panneaux et la batterie parce qu'ils ne dissipent pas la chaleur par effet de joule ils peuvent être préférablement petits et peuvent être montés à l'intérieur.

D'autres modèles de contrôleur de ce même caractère, sont utilisés dans les grandes installations détournent le courant des panneaux d'autres circuits lorsque les batteries sont chargées pour utiliser cette énergie pour d'autres utilisations.

D'autres modèles débranchent automatiquement les panneaux solaires ou les groupes de panneaux photovoltaïques à mesure que la tension de l'accumulateur augmente, ne laissant passer que le courant nécessaire. [4] Voir le schéma du régulateur de charge séries sur la **Figure 1.2.**

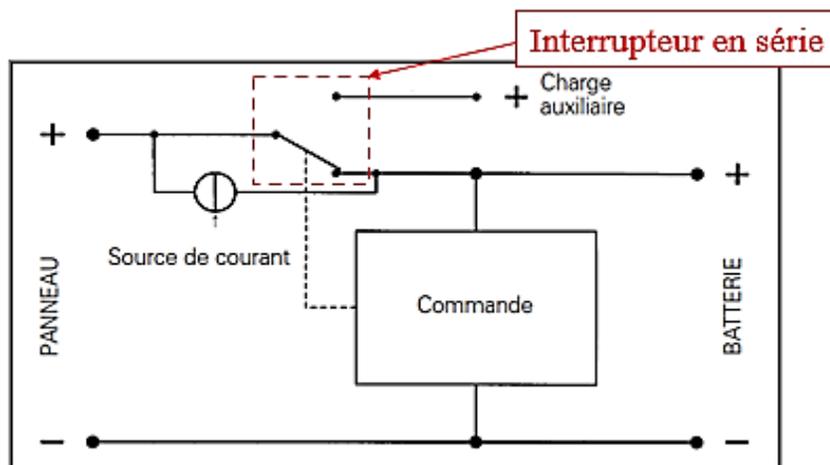


Figure 1- 2 : Le schéma équivalent de régulateur série [5].

1.6.2. Les caractéristiques du régulateur de charge shunt PWM

Le régulateur shunt est un interrupteur en parallèle avec le générateur pour couper la charge, ce qui impose la présence d'une diode de blocage dans le régulateur.

Ce régulateur présente une solution efficace pour charger une batterie à tension constante en ajustant le rapport cycle des commutateurs (MOSFET). Dans le contrôleur de charge PWM, le courant du panneau solaire diminue en fonction de l'état de la batterie et des besoins de charge. Lorsque la tension de la batterie atteint la valeur de contrôle définie, l'algorithme PWM réduit lentement le courant de charge, mais la charge transmet toujours la puissance maximale à la batterie dans les plus brefs délais. La tension fournie par le générateur PV sera réduite par le contrôleur PWM à une valeur proche de la valeur de la batterie. Il est défini comme un commutateur qui relie le panneau solaire à la batterie.

Lorsque le commutateur est fermé, le panneau et la batterie seront presque à la même tension. En supposant qu'une batterie soit déchargée, la tension de chargement initiale sera d'environ 12V et, en supposant une perte de tension de 0,7 V sur le câble et le contrôleur, le panneau sera de 12.7 V. La tension augmentera lentement avec l'état de charge de la batterie. Lorsque la tension d'absorption est obtenue, le contrôleur PWM commence à déconnecter et à reconnecter le panneau pour éviter toute domination. Voir le schéma du régulateur de charge parallèle sur la Figure 1.3. [5].

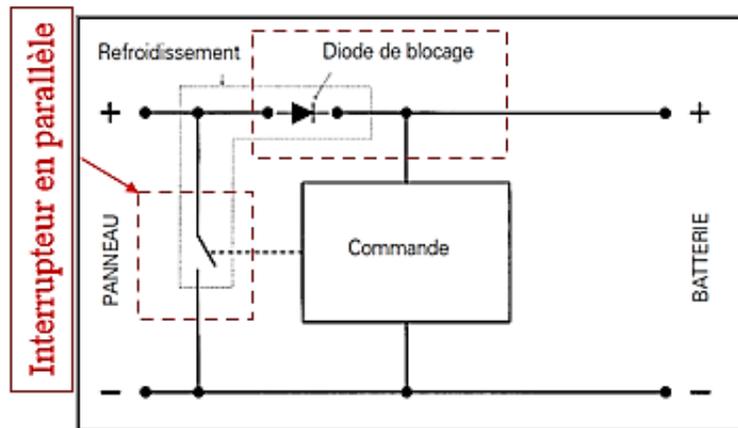


Figure 1- 3 : Le schéma équivalent de régulateur shunt [5].

1.6.3. Les caractéristiques du régulateur de charge MPPT

Le contrôleur de charge MPPT le plus utilisé et le plus efficace par une efficacité d'environ 30% à 40% à basse température. Il est plus développé, plus chère et présente de nombreux avantages par rapport au contrôleur de charge PWM, Il diminue la tension du panneau solaire à la tension de charge de la batterie. Il ajustera sa tension d'entrée pour obtenir le maximum de puissance des panneaux solaires, puis convertit cette énergie pour répondre aux différentes exigences de tension de la batterie et de la charge. Ce contrôleur est un convertisseur DC/DC qui convertit l'énergie à haute tension en énergie à basse tension. Par conséquent, si la tension de sortie est inférieure à la tension d'entrée, le courant de sortie sera supérieur au courant d'entrée, de sorte que le produit $P = VI$ resté constant. Ainsi, pour tirer le maximum d'énergie des panneaux solaires, le contrôleur de charge doit pouvoir sélectionner le point de courant-tension idéal dans le courbe courant-tension : le point de puissance maximale. MPPT fait exactement cela. La tension d'entrée

du contrôleur PWM est en principe égale à la tension de la batterie connectée. [4] Voir le schéma du régulateur de charge MPPT sur la Figure 1.4.

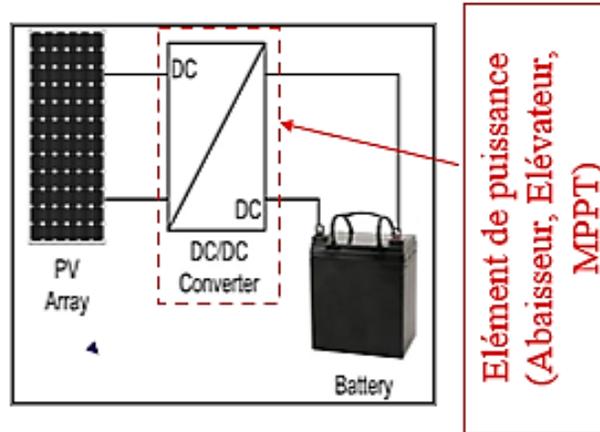


Figure 1- 4 : Le schéma équivalent de régulateur MPPT [5].

1.7. Les différentes techniques de charge des batteries

L'objectif principal de l'utilisation des différentes techniques du contrôle de charge et l'augmentation de SOC avec considération des performances de la batterie, le temps de charge, la protection de la batterie contre la surcharge ou la décharge profonde et l'augmentation de la durée de vie. Afin de contrôler efficacement la charge de la batterie plusieurs méthodes du contrôle ont été développées parmi ces méthodes on a : courant constant (CC), tension constante (CV), charge en deux étapes (c'est-à-dire CC-CV), charge par impulsions (PC), charge réflexe ou charge par impulsions négatives (NPC), charge de ruissellement ou courant conique (TC), et charge flottante (FC). [6]

1.7.1. Courant constant (CC) :

Cette méthode consiste à charger la batterie avec un courant constant. Cette méthode limite le courant pour éviter une surintensité de la charge initiale. La valeur de la tension dépendra du courant de charge, l'un des avantages est la facilité de calcul du temps de charge et du SOC. Comme la tension n'est généralement pas contrôlée, cela peut provoquer une surcharge de la batterie et une augmentation de la température, entraînant une dégradation de la durée de vie de la batterie [6].

1.7.2. Tension constante (CV) :

Cette méthode est couramment utilisée pour charger la batterie en appliquant une tension constante sur ses bornes. Pendant la phase initiale de la charge, le courant de charge est élevé. Lorsque la tension de la batterie atteint la limite de tension fixée par le chargeur, le courant de charge diminue. Ce type de contrôle est utilisé dans les applications qui nécessitent des périodes de charge prolongées pour atteindre la charge complète. Comme il nécessite un long temps de charge, il peut provoquer des élévations de température et une dégradation de la durée de vie de la batterie [6].

1.7.3. Courant constant - Tension constante (CC-CV) :

Cette méthode de charge est également connue sous le nom de méthode en deux étapes, car elle combine à la fois la CC et la CV. Le CC est appliqué au stade initial de la charge jusqu'à ce que la

tension de la batterie atteigne une tension prédéfinie. Dans un deuxième temps, la méthode de charge passe en CV pour maintenir la tension de la batterie, afin d'éviter toute surtension. Des recherches antérieures ont montré que la méthode de charge CC-CV est la plus efficace pour la charge des batteries, quel que soit le type de batterie, et qu'elle est également la méthode de contrôle la plus utilisée. Cependant, sa vitesse de charge et son efficacité sont très faibles. De plus, le CC-CV n'est pas adapté à la charge rapide, car l'étape de charge CV prolonge le temps de charge, ce qui entraîne une augmentation de la température de la batterie et une réduction de son cycle de vie [6].

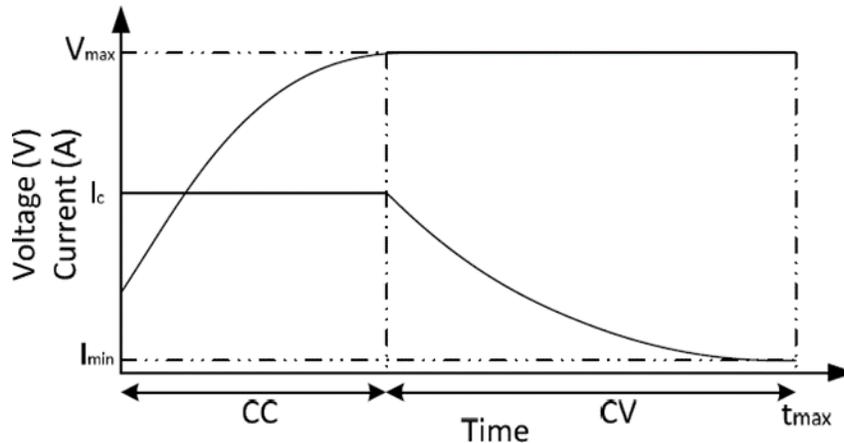


Figure 1- 5 : Profil de CC/CV [7]

1.7.4. Chargement par impulsion (PC) :

Cette méthode de charge consiste à appliquer périodiquement un courant pulsé à la batterie. Les batteries sont complètement déchargées et rechargées périodiquement dans ce qu'on appelle une charge d'égalisation. Cela permet à la tension de la batterie de devenir plus stable. Dans cette méthode de charge, il est important de prendre en compte la fréquence de charge, le pic d'impulsion et la largeur d'impulsion, car ils sont liés à la capacité et au temps de charge. Cette méthode peut réduire la polarisation pour empêcher l'augmentation de la température de la batterie. Le point faible de cette méthode de charge est sa complexité [6].

1.7.5. Charge réflexe ou charge à impulsion négative (NPC)

Il s'agit d'une amélioration du PC. Le concept d'application de la charge réflexe a commencé avec les brevets de W. Burkett & J. Bigbee et W. Burkett & R. Jackson en 1971. La NPC suit cette séquence de charge : une impulsion de charge positive, une période de repos (sans charge) et une impulsion de décharge. Cette méthode permet d'éliminer la polarisation, ce qui réduit l'augmentation de la température. Cependant, elle peut également réduire l'efficacité de la charge [6].

1.7.6. Trickle Charge ou Taper-Current (TC) :

Cette méthode consiste à fournir à la batterie une charge CC continue à un taux faible (environ C/100). Elle est conçue pour compenser l'autodécharge de la batterie. Cette méthode permet de charger la batterie jusqu'à 100% en utilisant un courant de charge très faible. Elle est généralement utilisée pour les applications de batteries de démarrage, d'éclairage ou d'allumage (SLI), mais elle ne convient pas aux batteries susceptibles d'être endommagées par une surcharge [6].

1.7.7. Charge flottante (FC) :

Cette méthode implique une charge de CV réglée à une valeur juste suffisante pour terminer la charge de la batterie ou pour maintenir la charge complète de la batterie. Cette méthode est utilisée pour les batteries stationnaires, principalement les batteries aux plomb-acide. Ces méthodes traditionnelles de contrôle de la charge ont été intégrées dans des onduleurs commerciaux tels que Victron Energy et la technologie solaire Sunny Island, entre autres. Cette dernière contrôle la charge de la batterie en trois phases : CC (phase I/phase bulk), phase CV (phase d'absorption/phase Vo) et phase de charge flottante/V [6].

1.8. Etapes de charge d'un contrôleur de charge

1.8.1. Etape de charge à courant constant (Bulk)

Dans cette étape, la batterie accepte tout le courant délivré par le panneau solaire. La valeur de ce courant sera égale au courant de court-circuit (ISC) du générateur solaire. Au cours de la phase bulk du cycle de charge, la tension augmente progressivement jusqu'au niveau de bulk pendant que les batteries consomment le courant maximum. Lorsque le niveau de tension bulk est atteint, la phase d'absorption commence. [4]

1.8.2. Etape de charge à tension constante

Pendant cette phase, la tension est égale au niveau de la tension Bulk pendant une durée spécifiée, tandis que le courant diminue progressivement à mesure que les batteries se chargent. Ceci permet d'éviter une surchauffe et un dégazage excessif de la batterie. Le courant diminue à des niveaux sécuritaires pendant que la batterie se charge complètement. [4]

1.8.3. Etape d'entretien (Float)

Quand une batterie est complètement chargée, le fait de descendre au niveau du float va donner un taux de charge de maintenance très faible tout en réduisant le chauffage et le dégagement de gaz d'une batterie complètement chargée. Lorsque la batterie est complètement rechargée, il ne peut plus y avoir de réactions chimiques et tout le courant de charge est transformé en chaleur et en gazage. Le flotteur a pour but de protéger la batterie contre les surcharges à long terme. Après la phase d'absorption, la tension est abaissée jusqu'au niveau de maintenance. Ceci est généralement pour une batterie 12V et les batteries consomment un petit courant d'entretien. Voir la relation entre le courant et la tension pendant les trois phases du cycle de charge sur la Figure 1.5. [4]

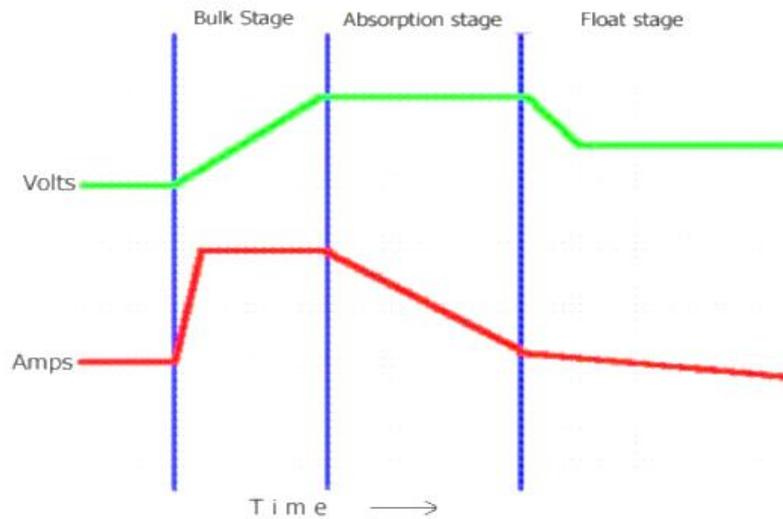


Figure 1- 6 : Relation entre le courant et la tension pendant les trois phases du cycle de charge. [4]

1.9. Les différentes technologies des régulateurs de charge

1.9.1. Le régulateur de charge solaire STECA PR 3030 12 / 24 volts – LCD :

Tableau 1-1 : présente la caractéristique de régulateur de charge solaire STECA PR 3030 12 / 24 volts – LCD.

Le régulateur	Caractéristique		Création
STECA PR 3030 12 / 24 volts	Courant de court-circuit max en entrée de modules	30 A	2004
	Courant de sortie max du consommateur	30A	
	Consommation du régulateur	12mA	
	Tension finale de charge	14.4V (28.8V)	
	Tension de charge rapide	14,7V (29.4V)	
	Température ambiante de fonctionnement	: -10°C / +50°C	
	Température ambiante de fonctionnement	16/25 mm ²	
	Raccordement (non fourni)	14,7V (29.4V)	
	Poids	350g	
	Dimensions	L x l x h 187 x 96 x 44	

Source : [8]

Voir une photo de régulateur STECA PR 3030 12 / 24 volts – LCD I sur la figure 1.6.



Figure 1- 7 : régulateur STECA PR 3030 12 / 24 volts – LCD I. [8]

1.9.2. Régulateur solaire à trois fonctions morningstar Tirstar :

Tableau 1-2 : présente la caractéristique de régulateur de charge solaire à trois fonctions morningstar Tirstar LCD.

Le régulateur	Caractéristique		Création	
	Courant nominal solaire, de charge ou de dérivation	45A-60A	Débit de 2018	
	Tension du circuit	12V-48V.		
	Précision	Précision en : 12/24V ≤0,1% ±50mV en 48V ≤0,1% 00mV.		
	Tension minimale de fonctionnement	9V		
	Tension solaire maximale V_{oc}	125 V		
	Courant nominal solaire, de charge ou de dérivation	45A-60A.		
	Consommation Régulateur	Régulateur		<20mA
		Compteur		7,5mA
	Température ambiante de fonctionnement	Régulateur		-40°C à 60°C
		Compteur		-40°C à +60°C
	Température d'entreposage	-55°C à +85°C.		
	Humidité	100% (sans condensation).		

Source : [8]

Voir une photo de régulateur morningstar Tristar sur la figure 1.7.



Figure 1- 8 : régulateur morningstar Tristar. [10]

1.9.3. Régulateur de charge solaire MPPT 15 A :

Tableau 1-3 : Présente la caractéristique de régulateur de charge solaire MPPT 15 A.

Le régulateur	Caractéristique	
MPPT 15A Victron Energie	Tension nominale batteries	12V ou 24V – détection automatique.
	Courant de charge :	15A.
	Puissance PV max	200W en 12V, 400W en 24V.
	Autoconsommation	10mA.
	Rendement max	98%.
	Phase d' « absorption » (V):	14, 4 / 28,8V.
	Phase de « floating » (V):	13, 8 / 27,6V.
	Algorithme de charge	Plusieurs étapes adaptatives.
	Compensation en température	-16mV/°C/Cellule batterie.
	Température de fonctionnement	-30°C à 60°C avec ajustement de la puissance max au-delà de 40°C.
	Refroidissement	convection naturelle.
	Humidité	Max 100%.
	Taille des terminaux/connecteurs	6mm ² / AWG2.
	Indice de protection IP	IP43, IP22.
Poids	0,5 kg.	
Dimensions	100 x 113 x 40mm.	

Source : [11]

Voir une photo de régulateur MPPT 15 A sur la figure 1.8.



Figure 1-9 : Régulateur MPPT 15 A. [11]

1.9.4. Le contrôleur solaire TriStar MPPT :

Tableau 1-4 : Présente la caractéristique de régulateur de charge solaire TriStar MPPT.

Le régulateur	Caractéristique	
Tristar MPPT	Courant batterie maximum	30 Ampères 45 Ampères 60 Ampères.
	Puissance d'exploitation nominale	12 Volt 400 Watts 600 Watts 800 Watts 24 Volt 800 Watts 1200 Watts 1600 Watts 48 Volt 1600 Watts 2400 Watts 3200 Watts TS-MPPT-30, 45 and 60
	Coefficient	Coefficient
	Plage	-30 °C à +80 °C.
	Points de consigne	Absorption, flottage, égalisation, HVD.
	Rendement optimum	99%.
	Tension nominale système	12, 24, 36 or 48 volts CC.
	Tension maximale en circuit ouvert PV	150 volts CC.
	Fourchette de tension de fonctionnement de la batterie	8 à 72 volts CC.

Autoconsommation maximum	2.7 Watts.
Protection contre les surtensions transitoires	4500 Watts/port.
Fourchette de tension de fonctionnement de la batterie	8 à 72 volts CC.
Protection contre les surtensions transitoires	4500 Watts/port.
Algorithme de charge	Algorithme de charge 4 niveaux.
Niveaux de charge Normal	absorption, flottage, égalisation.
Température	-40 °C à +45 °C.
Température de stockage	-55 °C à +100 °C.
Humidité	100 % sans condensation.

Source : [12]

Voir une photo de régulateur Tristar MPPT sur la figure 1.9.



Figure 1- 10 : Régulateur TriStar MPPT. [12]

1.10. Conclusion

Le régulateur solaire représente comme un moyen d'assurer le contrôle de l'état de charge de la batterie pas de surcharge ni décharge trop profonde et aussi il assure une adaptation entre les panneaux solaires et les utilisations en essayant de placer le point de fonctionnement au point de puissance maximale dans les deuxième chapitre nous avons faire un modalisation de chaque élément de système photovoltaïque comme le champs photovoltaïque ,convertisseur buck-boost et la modalisation de batterie.

Chapitre 2 : Modélisation du système photovoltaïque autonome

2.1. Introduction

L'énergie renouvelable joue un rôle important dans la production d'électricité. Diverses sources d'énergie renouvelables, telles que l'énergie solaire est utilisées pour produire de l'électricité. Cette énergie est directement convertie en énergie électrique grâce à des modules solaires photovoltaïques (PV). Les systèmes photovoltaïques autonomes sont utilisés dans les zones qui ne sont pas facilement accessibles ou qui n'ont pas accès à un réseau électrique. Ils utilisent généralement des batteries pour le stockage d'énergie. Lors de l'utilisation de batteries, des régulateurs de charge sont inclus, qui éteignent les modules PV lorsque les batteries sont complètement chargées et éteignent la charge au cas où les batteries se déchargeraient en dessous d'une certaine limite. Les batteries doivent avoir une capacité suffisante pour stocker l'énergie produite pendant la journée pour une utilisation dans la nuit et pendant les périodes d'intempéries. Dans ce chapitre une modélisation de tous les éléments qui constituent le système PV sera présentée.

2.2. Système photovoltaïque

Le système PV étudié, illustré sur la **Figure 2.1**, est composé de cinq panneaux connectés en parallèles avec une puissance total de 1066 WP, chaque module a un courant maximum de 7.35 A et une tension maximal de 29 V. Pour maximiser la puissance produite par les panneaux solaires, un contrôleur qui suivi le point de puissance maximale (MPPT). Un convertisseur Boost sert à augmenter la tension des panneaux pour atteindre une tension égale à 48 V. Le régulateur MPPT consiste en un convertisseur DC-DC bidirectionnel pour assurer la charge et la décharge des batteries connecté en parallèle avec les modules PV, en dérivation avec la sortie du convertisseur une batterie au Lithium de 24V/50Ah.

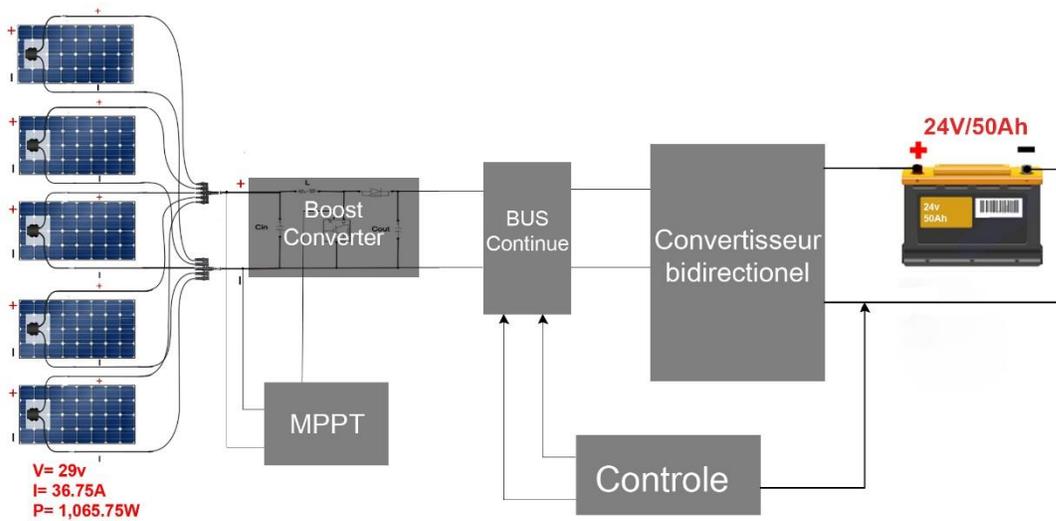


Figure 2.1 : Schéma synoptique du système PV

2.3. Champs photovoltaïques

Les cellules photovoltaïques sont basées sur un phénomène physique appelé effet photovoltaïque, qui implique l'établissement d'une force électromotrice lorsque la surface de la cellule est exposée à la lumière. La tension générée peut varier de 0,3 à 0,7 V, en fonction des matériaux utilisés et de leur disposition. [13]

2.3.1. Effet photovoltaïque

L'effet photovoltaïque est le processus de conversion de l'énergie sous forme de photons émis par le soleil en énergie électrique à l'aide de composants semi-conducteurs appelés cellules solaires. Cela peut être fait en trois étapes :

- Absorbe les photons de la lumière du soleil.
- Convertissez l'énergie reçue par les photons en énergie électrique.

- Collectez les particules dans le circuit externe. La cellule PV est constituée de deux couches de silicium, une couche est dopée P et l'autre couche est dopée N pour former une jonction PN avec une barrière. Lorsque les photons sont absorbés par le semi-conducteur, ils transfèrent de l'énergie aux atomes de la jonction PN, de sorte que les électrons (charge N) et les trous (charge P) créent une différence de potentiel entre les deux couches.

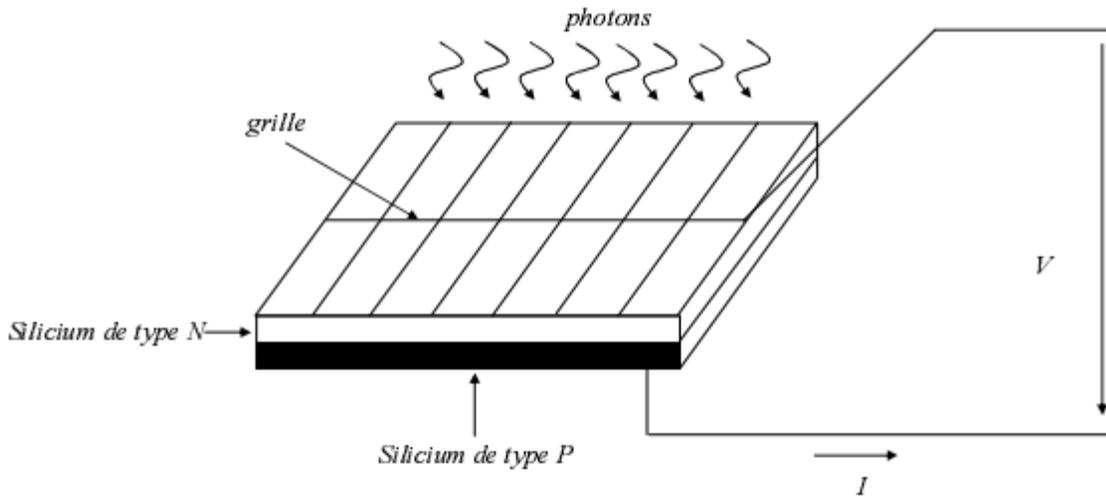


Figure 2.2 : Schéma d'une cellule élémentaire

Cette différence de potentiel peut être mesurée entre la connexion de la borne positive et la borne négative de la cellule. À courant nul, la tension maximale de la cellule est d'environ 0,6 V, ce que l'on appelle la tension en circuit ouvert V_{oc} . Lorsque les bornes de la cellule sont court-circuitées, le courant maximum apparaît. Il est appelé courant de court-circuit I_{sc} , et sa hauteur dépend du niveau d'éclairage.

Le champ PV se compose de modules connectés en série et en parallèle pour obtenir la puissance requise. Chaque module lui-même est composé de cellules. Pour la modélisation du champ PV, nous commencerons par l'élément de base qui est la cellule. Aujourd'hui, il existe plusieurs modèles électriques de cellule : Nous avons un modèle à diode, un modèle à deux diodes et un modèle à trois diodes. Le modèle à une diode offre un bon compromis entre la simplicité et la précision : il semble parfaitement adapté à nos recherches. Le modèle se compose d'une photo courant, d'une diode, d'une résistance parallèle et d'une résistance série, comme le montre la **Figure 2.3**. L'équation de la caractéristique tension-courant de la cellule solaire est donnée par la formule (2.1). [14]

$$I = I_{ph} - I_0 \left[\exp\left(\frac{V + R_s I}{v_t a}\right) - 1 \right] - \frac{V + R_s I}{R_p} \quad (2.1)$$

- I_{ph} est le photo-courant.
- I_0 le courant de saturation.
- R_s la résistance série de la cellule.
- R_p la résistance parallèle de la cellule.
- a le facteur d'idéalité de la diode.
- V_t est la tension thermique.

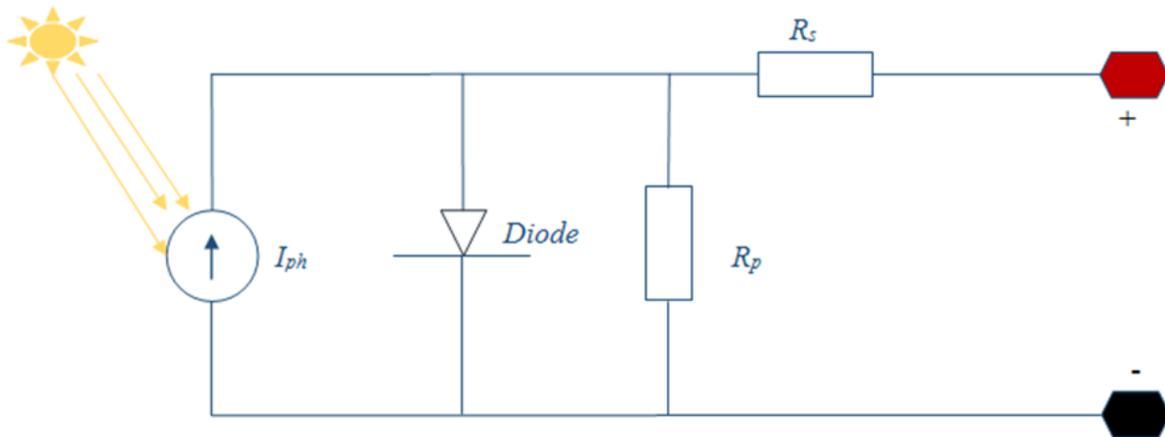


Figure 2.3 : Circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque

Les expressions du photo-courant et du courant de saturation sont données par les équations (2.2) et (2.3) :

$$I_{ph} = (I_{sc} + K_i dT) \frac{G}{G_n} \quad (2.2)$$

$$I_0 = \frac{I_{sc} + K_i dT}{\exp\left(\frac{V_{oc} + K_v dT}{V_t^a}\right) - 1} \quad (2.3)$$

- I_{sc} est le courant de court-circuit.
- K_i le coefficient de température de court-circuit.
- K_v le coefficient de température en circuit ouvert.
- T la température.
- V_{oc} la tension en circuit ouvert.
- G l'irradiation solaire.
- G_n est l'irradiation solaire nominale.

L'équation de la caractéristique tension-courant du champ PV est donnée par l'équation (2.4).

$$I = N_{pp} I_{ph} - N_{pp} I_0 \left[\exp\left(\frac{V + (R_s N_{ss} / N_{pp})^l}{V_t^a}\right) - 1 \right] - \frac{V + (R_s N_{ss} / N_{pp})^l}{R_p N_{ss} / N_{pp}} \quad (2.4)$$

N_{pp} et N_{ss} sont respectivement le nombre de module en parallèle et en série.

Pour résoudre cette équation on utilise le block 'Algébriques Contraint' qui est intégré dans la bibliothèque 'Simulink/Math Opération'

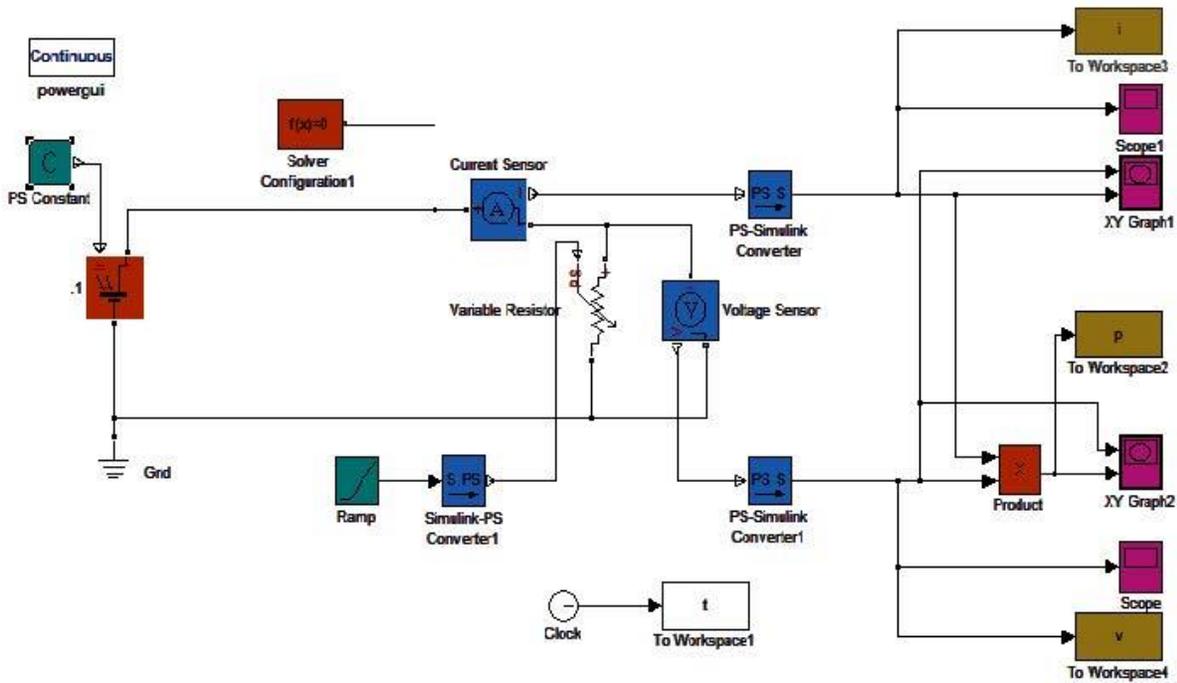


Figure 2.4 : Schéma de simulation d'une cellule photovoltaïque

Tableau 2-1 : Paramètres électriques de panneaux PV étudiée

Module Spécifications	
Manufacturer	1Soltech
Model	1STH-215-P
Cell type	Monocristallin
Nominal power Pmax[W]	213.15W
Open circuit voltage Voc[V]	36.3
Short circuit current I _{cc} [A]	7.84
Voltage at maximum power V _{mpp} [V]	29
Current at maximum power I _{mpp} [A]	7.35
Number of cell	60
Temperature coefficient of Voc(%/C°)	-0.36099
Temperature coefficient of Isc (%/C°)	0.102

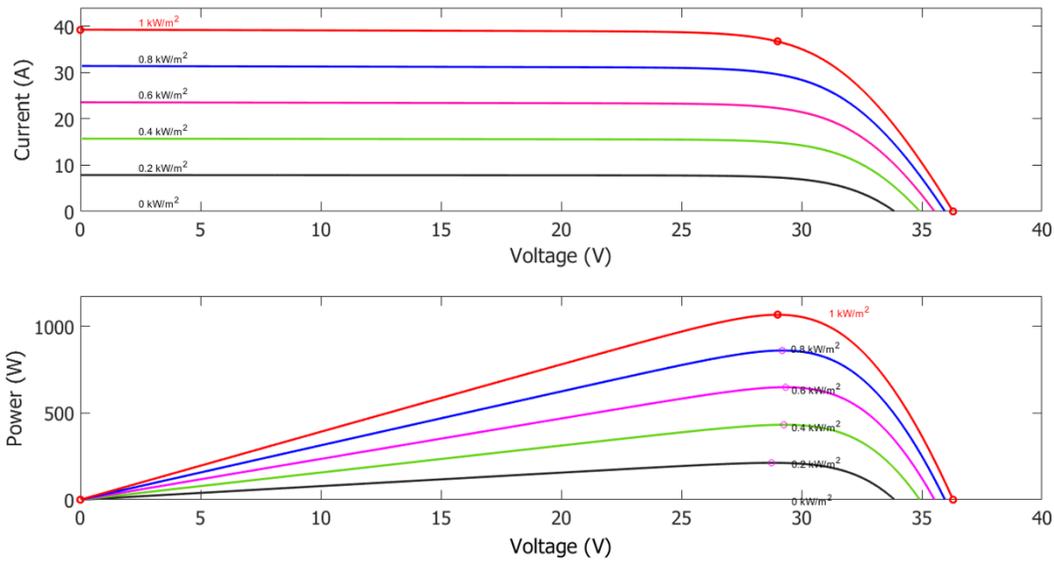


Figure 2.5 : Caractéristique I-V et P-V du champ PV pour une irradiation de 1000 W/m^2 et $T=25^\circ\text{C}$

2.4. Convertisseur dc-dc boost

Pour pouvoir augmenter la tension du champ photovoltaïque, on a besoin d'un convertisseur DC-DC boost, aussi appelé Hacheur. Pour ce type de convertisseur, la gamme de puissance que l'on peut traiter s'étend de 1500 W. Cependant, l'apparition de composants de puissance sans cesse plus performants permet d'envisager le traitement de puissances plus élevées.

NB : Les convertisseurs DC-DC sont utilisés dans les systèmes d'énergie solaire pour adapter la source DC variable (panneau PV) à la charge qui demande en général une tension DC constante. La valeur maximale de la tension de sortie d'une cellule photovoltaïque est égale à la tension de seuil de la jonction qui la constitue (tension très petite). C'est pour cela que, la structure la plus utilisée à la sortie des panneaux solaires est : le hacheur parallèle ou hacheur élévateur ou encore « boost converter » en anglais.[15]

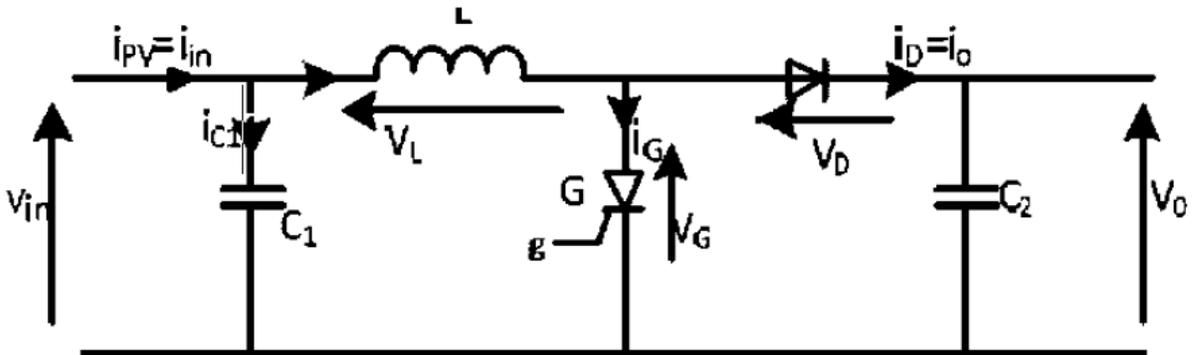


Figure 2.6 : Schéma de base du circuit du convertisseur boost[16]

2.4.1. Principe de fonctionnement

Quand l'interrupteur G est commandé pour la fermeture, le circuit est séparé en deux parties (à cause de la diode) : à gauche, la source (courant IP , entrant) charge l'inductance L (notons qu'au régime permanent, la décharge du condensateur C_1 de grande capacité peut être négligée) ; à droite, le condensateur C_2 permet de maintenir la tension V_0 aux bornes de la charge. Quand l'interrupteur G s'ouvre, le condensateur chargé à la tension V_{in} et pouvant maintenant être considéré comme une source de tension en entrée ainsi que l'énergie emmagasinée dans l'inductance L vont ensemble alimenter le circuit à droite à travers la diode qui entre aussitôt en conduction, jusqu'à ce que le courant i_1 s'annule et tend à s'inverser.

2.4.2. Modèle mathématique du boost

Soient:

- g: la commande de l'interrupteur G tel que G est fermé si $g=1$ et G est ouvert si $g = 0$;

- h : la variable qui modélise la conduction ($h = 1$) ou non ($h = 0$) de la diode D ,

Ainsi, si $i_D = (1-g) \times i_L < 0$, alors $sh=0$ sinon (la diode s'ouvre) $h=1$ (la diode conduit).

- Lorsque $g = 1$ (interrupteur fermé), $t \in [0; DT]$

Le système est régi par les équations suivantes :

$$i_{c1}(t) = C_1 \frac{dV_{in}}{dt} = i_{in} - i_L(t) \quad (2.5)$$

$$i_{c2}(t) = C_2 \frac{dV_0}{dt} = -i_0 \quad (2.6)$$

$$v_L = L \frac{di_L(t)}{dt} = v_i(t) \quad (2.7)$$

Lorsque $g = 0$ (interrupteur est ouvert), $t \in [DT; T]$

Le système est régi par les équations suivantes :

$$i_{c1}(t) = C_1 \frac{dV_i(t)}{dt} = i_{in}(t) - i_L(t) \quad (2.8)$$

$$i_{c2}(t) = C_2 \frac{dV_0(t)}{dt} = -i_L(t) - i_0(t) \quad (2.9)$$

$$v_L(t) = L \frac{di_L(t)}{dt} = V_i(t) - V_0(t) \quad (2.10)$$

Si nous utilisons les fonctions de connexion g et h , le hacheur Boost idéal peut alors être modélisé en utilisant les équations suivantes :

$$i_s = \left[(1 - g) i_L \right] \times h \quad (2.11)$$

$$L \frac{di_i}{dt} = [V_{in} - (1 - g) \times V_0] \times h \quad (2.12)$$

$$C_1 \frac{dV_{in}}{dt} = i_{pv} - i_L \quad (2.13)$$

En général, pour adapter ce modèle à la réalité, on ajoute au modèle précédent la résistance interne de l'inductance R_L [17]; (l'équation 2.12) devient alors:

$$L \frac{di_i}{dt} = [V_{in} - R_L i_L - (1 - g) \times V_0] \times h \quad (2.14)$$

2.4.3. Commande du boost

Très souvent, le hacheur est commandé à fréquence fixe avec variation du rapport cyclique ; le rapport cyclique (noté D ou a) étant égale au temps d'ouverture de l'interrupteur G divisé par la période.

2.4.4. Calcul du rapport de conversion

À partir des (équations 2.5 à 2.7), on a pendant la première partie de la période ($g=1$) :

$$\begin{cases} i_{c1} = I - I_L \\ i_{c2} = -I_L \\ v_L = V_i \end{cases} \quad (2.15)$$

Pendant la deuxième partie ($g=0$) :

$$\begin{cases} i_{c1} = I_{in} - I_L \\ i_{c2} = I_L - I_0 \\ v_L = V_{in} - V_0 \end{cases} \quad (2.16)$$

La moyenne d'une variable x sur une période Test donnée par :

$$x(t) = \frac{1}{T_s} \int_t^{t+T} x(\tau) d\tau = \frac{1}{T} \left[\int_t^{t+\alpha T} x|_{[0, \alpha T]}(\tau) d\tau + \int_{t+\alpha T}^{t+T} x|_{[\alpha T, T]}(\tau) d\tau \right] \quad (2.17)$$

Si nous considérons un mode de conduction continu ou MCC (le courant ne s'annule pas dans l'inductance) L'application d'une moyenne sur les équations (15) et (16) nous permet d'écrire :

$$\begin{cases} i_{c1}(t) = \alpha(I_{in} - I_L) + \alpha'(I_{in} - I_L) = 0 \\ i_{c2}(t) = \alpha(-I_0) + \alpha'(I_L - I_0) = 0 \\ v_L(t) = \alpha V_{in} + \alpha'(V_{in} - V_0) = 0 \end{cases} \quad (2.18)$$

De l'équation (18), on peut alors tirer le rapport de conversion en MCC:

$$M(\alpha) = \frac{V_0}{V_{in}} = \frac{1}{\alpha'} = \frac{1}{1-\alpha} \quad (2.19)$$

On distingue deux modes fonctionnement du hacheur boost :

Le mode de conduction continu (MCC) et le mode de conduction discontinu (MCD).

Le MCC présente l'avantage majeur d'avoir une ondulation plus petite que le MCD.

Le mode de conduction continu est sélectionné selon le choix judicieux de la valeur de l'inductance d'entête du convertisseur L . Dans notre cas nous avons considéré le premier mode de conduction.

Puisque dans notre cas la tension en sortie du hacheur est fixe (bus continu), le contrôle de la tension aux bornes du générateur PV se fera au travers le rapport cyclique à fréquence fixe par la formule :

$$V_{PV} = V_{Bus} \times (1 - D) \quad (2.20)$$

2.4.5. Modélisation et simulation d'un convertisseur DC- DC Boost sous MATLAB

Le convertisseur boost est également appelé convertisseur step-up. Habituellement utilisé pour convertir une faible tension d'entrée en une tension de sortie élevée. Il se compose d'une source de tension d'entrée continue V_A , d'une inductance L , d'un interrupteur, d'une diode et de deux condensateurs C_{pv} et C_{boost} . La **Figure 2.7** montre le schéma électrique du convertisseur boost proposé.

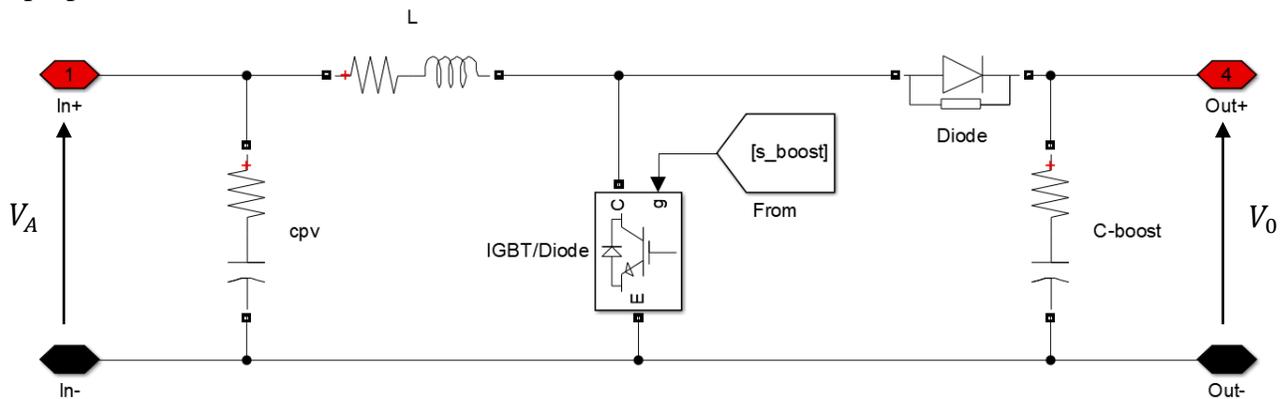


Figure 2.7 : Schéma électrique du convertisseur boost proposé

La relation entre la tension d'entrée V_A et de sortie V_0 du convertisseur est donnée par l'équation :

$$V_0 = \frac{V_a}{1-D} \quad (2.21)$$

L'expression de la capacité

$$C = \frac{DV_0}{f_s R \Delta V} \quad (2.22)$$

L'expression de l'inductance du filtre

$$C = \frac{V_A D}{f_s \Delta I} \quad (2.23)$$

Avec :

D est le rapport cyclique.

f_s La fréquence du mosfet.

ΔV la limite de tension tolérable.

ΔI la limite de courant tolérable.

R la résistance de la charge. [18]

Contrairement à la plupart des convertisseurs de la littérature, le convertisseur fourni comporte deux capacités C_{in} et C_{out} , qui ont pour effet de réduire (ou de lisser) respectivement l'ondulation de tension d'entrée et de sortie du convertisseur. De même, la fréquence du mosfet utilisée dans la littérature est généralement de 50 kHz, et pour notre travail, nous choisissons 100 kHz, car il peut obtenir une faible capacité et une faible inductance, ce qui contribue à la qualité de la tension et du courant de sortie.

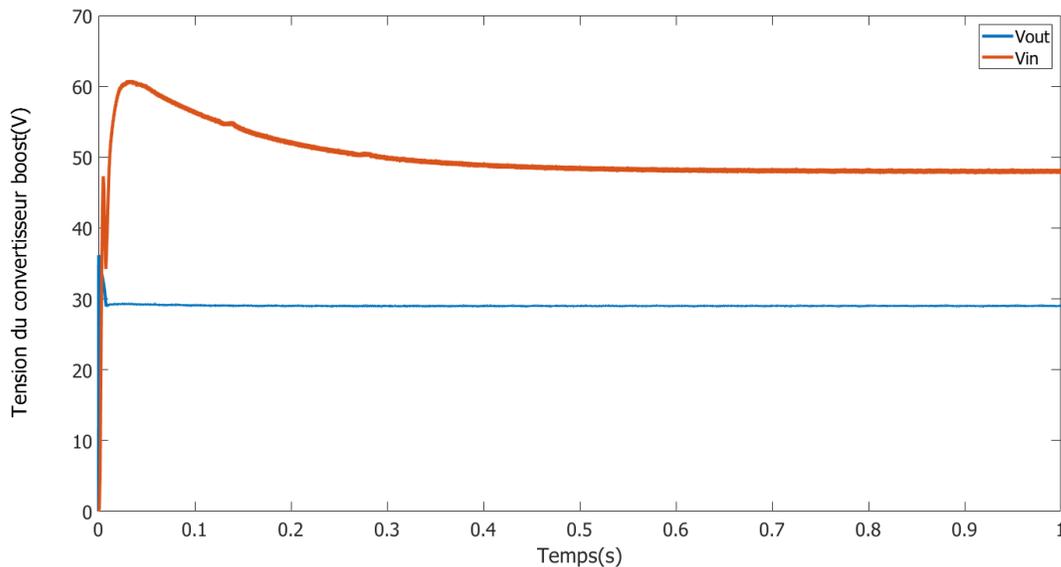


Figure 2.8 : La variation de tension d'entrée et de sortie du boost en fonction de temps.

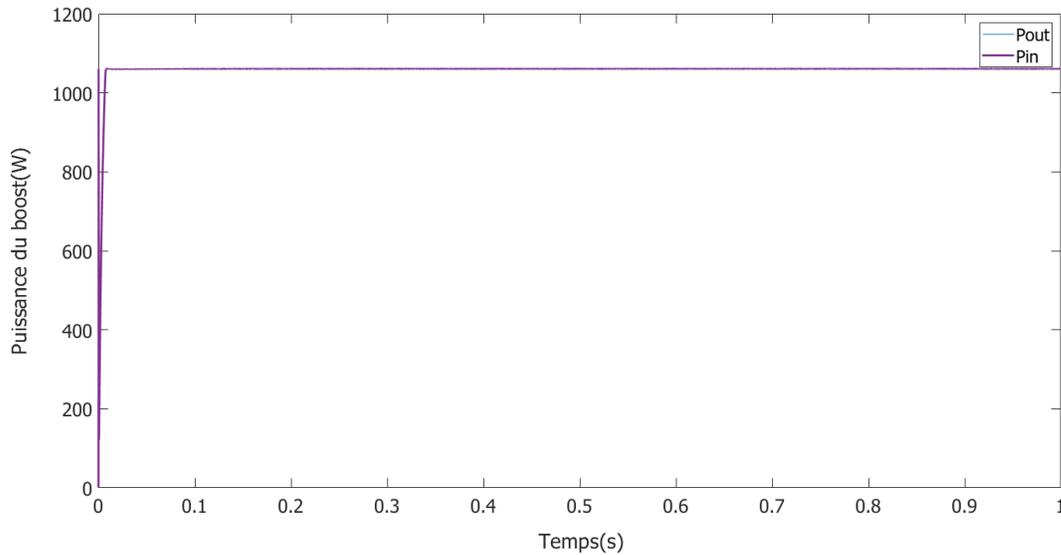


Figure 2.9 : La variation de la puissance d'entrée et de sortie du boost en fonction de temps

La courbe de variation en fonction du temps du signal à la sortie du convertisseur boost obtenue dans la simulation Matlab/Simulink, est illustrée sur la **Figure 2.8**. La tension à la sortie du module photovoltaïque est de 29V, qui est augmentée à 52V en utilisant un convertisseur boost. La valeur du courant à la sortie du module photovoltaïque est de 40A et la valeur du courant qui traverse la résistance de charge dans le convertisseur boost est de 30A.

2.5. Convertisseur DC-DC bidirectionnel

Les convertisseurs DC-DC bidirectionnels sont utilisés pour effectuer le processus de transfert de puissance entre deux sources de courant continu dans les deux sens. Ils sont largement utilisés dans diverses applications. Un convertisseur DC-DC bidirectionnel est un élément important des systèmes solaires photovoltaïques autonomes pour l'interface avec le système de stockage par batterie. Le circuit est exploité de telle sorte qu'un commutateur, une inductance couplée et trois diodes sont utilisés pour une opération d'élévation afin d'augmenter la tension de la batterie pour qu'elle corresponde à la haute tension du bus continu. L'autre commutateur, la diode restante et l'inducteur simple sont utilisés pour le fonctionnement en abaissement afin de charger la batterie à partir de l'énergie PV excédentaire. Le rendement élevé du convertisseur est obtenu en optimisant les composants utilisés pour chaque étape. Le convertisseur DC-DC bidirectionnel avec un taux de puissance élevé joue un rôle clé dans le système de stockage d'énergie, alors qu'il convertit la tension DC ou le courant DC pour la batterie de stockage d'énergie. Le convertisseur DC-DC bidirectionnel fonctionne à tout moment comme un convertisseur buck ou boost. Il fonctionne comme un convertisseur buck pour charger la batterie tandis qu'il fonctionne comme un convertisseur boost [19-21] pour fournir de l'énergie de la batterie vers la charge.

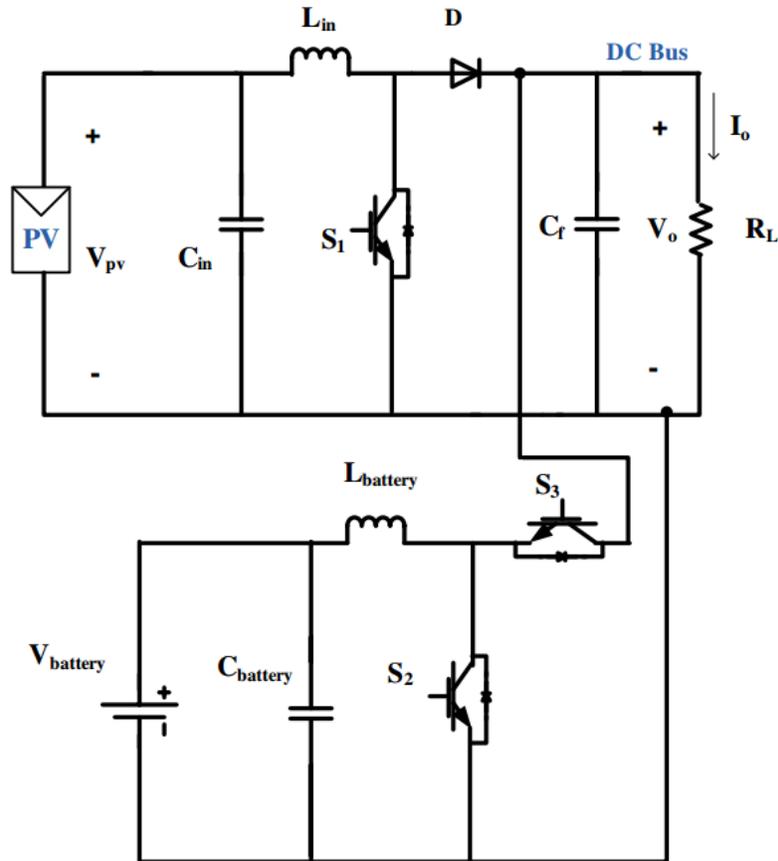


Figure 2.10 : Schéma de circuit du système photovoltaïque avec stockage utilisant un convertisseur DC DC bidirectionnel.

La source de tension PV est immédiatement suivie d'un étage de convertisseur boost alimenté par un contrôleur MPPT qui augmentera la tension PV jusqu'à la tension de bus CC souhaitée en extrayant une puissance maximale du système PV à chaque instant de fonctionnement. Il est ensuite suivi de deux IGBT et d'une batterie servant de source secondaire. Le fonctionnement du convertisseur DC-DC bidirectionnel est effectué par ces deux IGBTs qui sont contrôlés par deux contrôleurs différents. Un contrôleur qui fournit le signal de commande pour l'opération Boost et l'autre fournit le signal de commande pour l'opération Buck. Il fonctionne comme un convertisseur buck pour charger la batterie grâce aux actions de commutation effectuées par le commutateur S_3 . D'autre part, son fonctionnement en convertisseur boost est dicté par les actions de commutation du commutateur S_2 [22], [23].

2.5.1. Modes de fonctionnement

Le système photovoltaïque avec stockage à l'aide de batterie a quatre modes de fonctionnement différents basés sur la quantité d'énergie fournie par les panneaux PV qui dépend de l'irradiation et de la température [24].

Mode 1 : Le premier mode de fonctionnement est déclenché lorsque la puissance générée par le système PV est inférieure à la puissance demandée par la charge, qui peut être une simple charge résistive ou une charge triphasée ou le réseau (c'est-à-dire $P_{PV} < P_{load}$) et que le système de batterie est également profondément déchargé.

Mode 2 : Le deuxième mode de fonctionnement est activé lorsque $P_{PV} < P_{load}$ mais que la batterie est chargée et peut également fournir de l'énergie. À ce stade de fonctionnement, la batterie fournit une alimentation de secours en même temps que l'énergie PV tant que la batterie n'est pas entièrement déchargée. Les panneaux PV alimentent la charge autant que possible avec l'algorithme MPPT activé. Tandis que la batterie fournit une puissance complémentaire en fonctionnant en mode boost du convertisseur bidirectionnel buck/boost.

Mode 3 : Lorsque $P_{PV} > P_{load}$ et que la batterie n'est pas complètement chargée, ce mode est activé. Pendant ce mode de fonctionnement, les panneaux PV fournissent non seulement de l'énergie à la charge sous le contrôle du point de puissance maximale, mais l'énergie excédentaire produite par les panneaux PV est également utilisée pour charger la batterie. Pendant ce mode, la batterie est chargée par le mode de fonctionnement buck du convertisseur buck/boost bidirectionnel.

Mode 4 : Dans ce mode de fonctionnement, $P_{PV} > P_{load}$ et la batterie est entièrement chargée. Pendant ce mode, les panneaux PV fournissent de l'énergie à la charge sous le contrôle du point de puissance maximale et il est également garanti que les batteries restent en état de charge complète grâce à une charge à tension constante, de sorte que la batterie ne subisse aucune sorte d'autodécharge.

2.6. Batterie au lithium-ion

Les batteries utilisées avec les panneaux solaires sont des batteries à décharge lente (appelée aussi batterie solaire). Ces batteries sont spécifiquement conçues pour les applications solaires. Elles n'ont pas les mêmes caractéristiques qu'une batterie de voiture par exemple, elles se déchargent plus progressivement et supportent mieux les décharges fréquentes peu profondes.

Pour une installation solaire, la capacité d'une batterie solaire est exprimée en Ampères Heure (Ah) ce qui signifie le débit total d'énergie de la batterie dans une situation donnée (5 heures, 10 heures, etc.). Les données nécessaires à la détermination de la capacité de la batterie en plus de l'énergie totale journalière sont : son rendement, sa tension nominale, sa profondeur de décharge et son autonomie.

Les principales propriétés d'une batterie sont sa tension V , exprimée en (V) et sa capacité C ou Q_{cell} en (Ah). Le produit de ces deux valeurs est une mesure de la quantité d'énergie contenue dans la batterie. Dans une source de tension idéale, la tension devrait demeurer constante en tout temps, jusqu'à ce que la batterie soit complètement déchargée, et ce peu importe la demande de courant. Ainsi l'autonomie d'une batterie devrait pouvoir se calculer directement par l'équation (2.24), où t_{auto} est le temps de décharge et I est le courant demandé [25].

$$t_{auto} = \frac{Q_{cell}}{I} \quad (2.24)$$

Or, les batteries au lithium n'adoptent pas un comportement idéal, car leur tension ne reste pas constante tout au long de la décharge. On a longtemps estimé l'autonomie réelle d'une batterie par la loi de Peukert (équation (2.24)). Le $b < 1$ est une constante propre à chaque type de batterie, tenant compte de la diminution de la capacité en fonction du courant débité et doit être obtenu expérimentalement.

La relation de Peukert (voir l'équation (2.24)) ne tient pas compte de la température, et ne permet pas de calculer la tension de la batterie. C'est l'utilisation des batteries dans les appareils électroniques portables qui a amené les électrotechniciens à s'intéresser à la modélisation des batteries.

Si on néglige les pertes, la capacité de stockage d'un accumulateur en (Ah) est donc donnée par :

$$C(Ah) = \frac{C_{jr} \times T}{U_{acc} \times \eta \times DOD} \quad (2.25)$$

$$N_{bs} = \frac{U_u}{U_{bat}} = \text{Nombre de batteries en série} \quad (2.26)$$

$$N_{bp} = \frac{C_{tot}}{C_u} = \text{Nombre de batteries en parallèle} \quad (2.27)$$

Avec :

C : Capacité de stockage (Ah)

C_{jr} : Consommation journalière requise (Wh)

T : Autonomie (h)

U_{acc} : Tension de l'accumulateur

η : Rendement de l'accumulateur

DOD : Profondeur de décharge de la batterie

N_{bs} : Nombre de batteries en série

U_u : Tension d'utilisation

U_{bat} : Tension de la batterie

N_{bp} : Nombre de batteries en parallèle

C_{tot} : Capacité totale de l'accumulateur

C_u : Capacité utile

Afin de ne pas endommager la batterie, Le régulateur permet de protéger la batterie en limitant un certain seuil minimum pour éviter les décharges profondes et un seuil maximum pour éviter les surcharges au niveau des batteries. Néanmoins la connaissance de quelques règles ou informations est nécessaire avant l'utilisation des batteries :

- Il est recommandé par exemple de bien vérifier que le cyclage est clairement indiqué par le fabricant, car ce dernier indique la durée de vie de la batterie.
- La détermination de la tension de stockage [26] il est conseillé de se fier au (tableau 2-2) ci-dessous, car plus le besoin d'énergie est élevé, plus on doit utiliser une tension élevée afin de diminuer les pertes.
- Le montage des batteries se fait en série ou en parallèle pour augmenter la tension ou la capacité respectivement.
- Plus la rapidité de la décharge n'est importante, plus la capacité réelle de la batterie ne sera faible.
- Par exemple une batterie de 50Ah en C100 aura réellement une capacité de 50 Ah si la décharge prend 100 heures.

Tableau 2-2 : exemple des tensions recommandées pour une installation PV pour différentes puissances crêtes [26].

Puissance de l'installation PV	Tension recommandée
De 0 à 800 Wc	12V
De 800 à 1600 Wc	24V
Au-dessus de 1600 Wc	48V

2.6.1. La modélisation sous MATLAB de la batterie

Le logiciel Matlab/Simulink est utilisé pour la modélisation de la batterie. Des packs de batteries et des véhicules électriques dans différents modes de conduite.

Dans l'éditeur graphique Simulink de Matlab, un modèle générique de batterie Lithium-Ion selon le modèle de Shepherd modifié est développé et vérifié (voir **Figure 2.10**) [27]. Elle est modélisée comme une source de tension contrôlée dépendant de l'état de charge réel de la batterie (SOC).

L'idée de cette conception est l'utilisation d'une procédure simple pour obtenir les paramètres d'entrée du modèle de batterie (illustré à la **Figure 2.11**) à partir des données du catalogue du fabricant de la batterie. Dans le modèle, en fonction des modes de fonctionnement, il existe différentes fonctions pour la dépendance de la tension de la batterie.

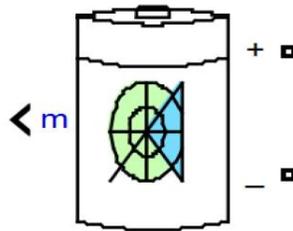


Figure 2.11 : Le masque de bloc du modèle de batterie Lithium-Ion (SimPowerSystems) [27]

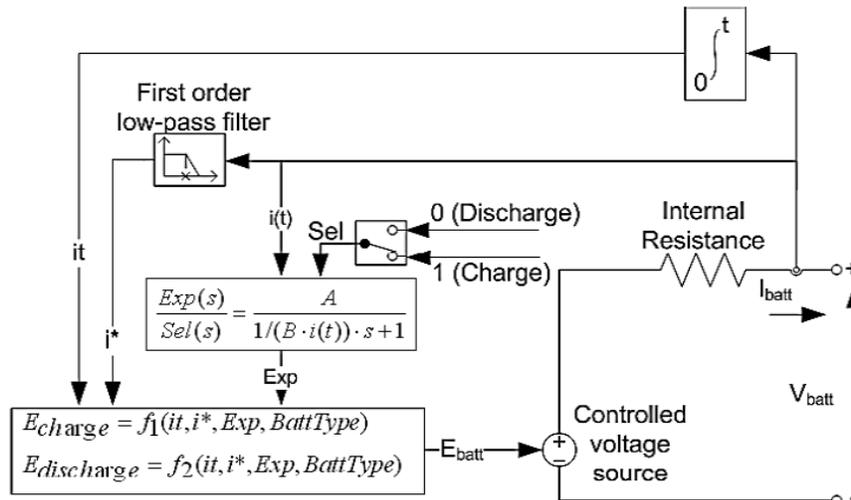


Figure 2.12 : Le modèle de batterie - schéma fonctionnel des sous-systèmes dans MATLAB Simulink, qui met en œuvre un modèle générique de batterie Lithium-Ion [27,28].

La **Figure 2.12** montre les caractéristiques de décharge typiques d'une batterie Lithium-Ion. Les caractéristiques peuvent être séparées en trois zones. La zone exponentielle qui représente le

dépassement de la tension de la batterie au-dessus de la valeur nominale. Le point de fonctionnement de la batterie se trouve dans cette zone durant une période d'établissement d'une valeur stationnaire du courant de décharge après le mode de batterie à vide.

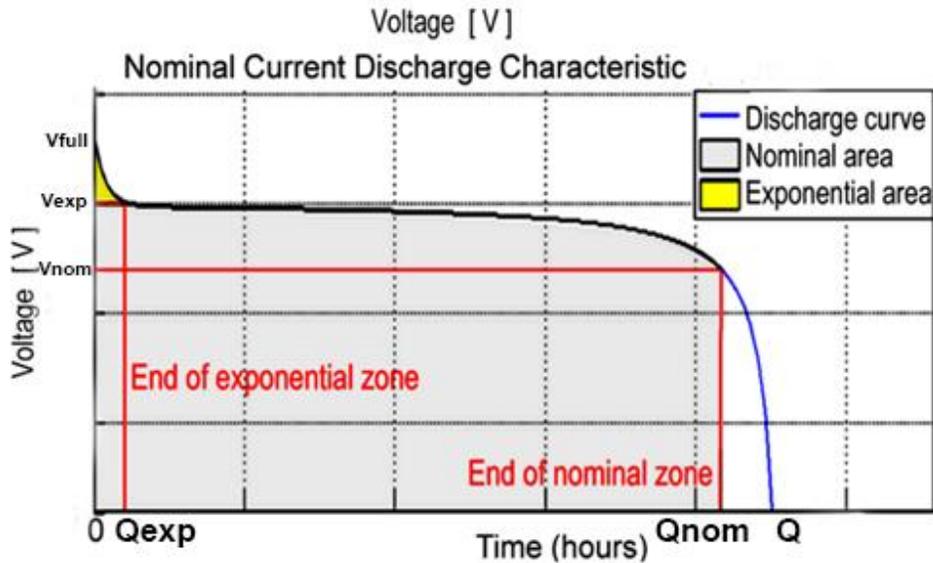


Figure 2.13 : Décharge de la batterie Lithium-Ion au courant de décharge nominal[29]

La chute de potentielle pendant la décharge peut être divisée en trois parties :

- (a) une chute de potentiel se produisant que dans la partie initiale de la décharge entre V_{full} et V_{exp} .
- (b) une chute de potentiel due à la résistance interne entre V_{exp} et V_{nom} .
- (c) une chute de potentiel due à la polarisation entre V_{nom} et 0.

La densité de courant du matériau actif à tout moment pendant une décharge est définie par les deux conditions suivantes :

- Au début de la décharge, la densité de courant apparente est égale à i .
- A tout moment t pendant la décharge, la densité de courant est directement proportionnelle aux ampères par gramme de matière active non utilisée.

Shepherd dans les années soixante [29], développa une équation du potentiel cellulaire E lors de la décharge d'une batterie représentée par l'équation (2.28).

$$E = E_0 - K \left(\frac{Q}{Q - i_t} \right) i - Ri \quad (2.28)$$

Lorsqu'on évalue mathématiquement l'équation (2.28), un ensemble de courbes est obtenu, (courbe de Shepherd), qui représente le potentiel E en fonction de la quantité d'électricité correspondante. Cependant, une chute de tension au début de la décharge de la batterie n'est pas incluse dans l'équation (2.28) Cette chute initiale est plus ou moins rapide et est représentée sur la même courbe par une ligne pointillée. Par conséquent, un autre terme doit être ajouté pour corriger la différence de potentiel entre le potentiel en trait continu, calculé à partir de l'équation (2.28) et la ligne en pointillé qui représente le potentiel de décharge réel. Il a été constaté expérimentalement que l'expression $Ae^{Bt/Q}$, ou A et B sont des constantes empiriques, donne une évaluation de la chute

potentielle initiale adéquate dans la plupart des situations. Lorsque ce terme est ajouté à l'équation (2.28), l'équation finale devient :

$$E = E_0 - K \left(\frac{Q}{Q - i_t} \right) i + A e^{-Bi_t/Q} - Ri \quad (2.29)$$

Cette équation est notamment utilisée dans le modèle générique de batterie fourni dans Matlab/Simulink *Sim Power Systems* [27].

Où

E : Potentiel de la batterie (V)

E_0 : Tension constante de la batterie (V)

k : Constante de polarisation (V / Ah)

Q : Capacité de la batterie (Ah)

i : Courant de la batterie (A)

$i_t = \int idt$: Capacité actuelle de la batterie (Ah)

R : Résistance interne par unité de surface de la cellule (Ω)

A : Amplitude de la zone exponentielle (V)

B : Inverse de la constante de temps de la zone exponentielle (Ah^{-1})

L'équation de la tension de la batterie en charge et en décharge est donnée par [30] :

Équation en décharge :

$$(i^* > 0) E_{bat}(i_t, i^*, i) = E_0 - K \frac{Q}{Q - i_t} i^* - K \frac{Q}{Q - i_t} i_t + A \times \exp(-B \times i_t) \quad (2.30)$$

Équation en charge :

$$(i^* < 0) E_{bat}(i_t, i^*, i) = E_0 - K \frac{Q}{Q - 0.1i_t} i^* - K \frac{Q}{Q - i_t} i_t + A \times \exp(-B \times i_t) \quad (2.31)$$

Où i^* : est le courant filtré (A)

E_{bat} : Tension de la batterie (V)

A la fin de la décharge, le terme exponentiel dans l'équation (2.30) est négligeable en valeur et la tension finale ou de coupure est [29] :

$$E = E_0 - K \left(\frac{Q}{Q - i_t} \right) i - Ri \quad (2.32)$$

- **L'état de charge (SOC):**

Des pertes d'énergie surviennent lors du chargement d'une batterie. L'efficacité de la batterie diminue encore lorsque la batterie vieillit ou si elle n'est pas entretenue correctement. L'état de charge de la batterie en Wh est classiquement calculé par l'intégration de la puissance [31] à l'aide de la formule suivante :

$$SOC(i) = \int_{t-1}^t I_{bat}(t) \cdot V_{bat}(t) dt \quad (2.33)$$

Une version discrétisée du SOC est donnée par [31] [32] :

$$SOC(t+1) = SOC(i) \left(1 + \sigma \cdot \frac{\Delta t}{24} \right) - P_{bat} \cdot \Delta t \cdot \eta_{bat}(t) \quad (2.34)$$

Où Δt est la période d'échantillonnage, σ est le coefficient d'autodécharge de la batterie, I_{bat} et V_{bat} sont respectivement le courant et la tension de la batterie et η_{bat} est l'efficacité relative au courant en charge et son inverse en décharge.

- **L'état de décharge (SOD)**

L'état de décharge est donné par [33] où i est le courant de la batterie et Q_{max} sa capacité maximale :

$$SOD(t) = \frac{\int_0^t i(t) dt}{Q_{max}} \cdot 100\% \quad (2.35)$$

Profondeur de décharge (DOD)

$$DOD = 1 - SOC \quad (2.36)$$

- **L'état de santé (SOH)**

L'état de santé d'une batterie se définit comme le rapport, entre sa capacité totale à l'instant t et sa capacité totale mesurée à l'état neuf. Ceci donne une donnée quantitative sur les pertes des performances de l'accumulateur en termes de capacité [34].

2.7. Conclusion

Le solaire fournit une source d'énergie propre et il est prometteur à court et à long terme. Il présente une solution rentable pour alimenter les utilisateurs isolés et largement utilisés dans les applications autonomes.

Dans ce chapitre une présentation globale du système photovoltaïque a été effectuée suivie par le modèle mathématique des différentes parties du système PV étudié ainsi que leur principe de fonctionnement et leur structure. Dans le chapitre suivant la commande du régulateur de charge pour la batterie sera mise en exergue et validée selon plusieurs scénarios.

Chapitre 3 : Contrôle du système de stockage

3.1. Introduction :

L'énergie produite par l'énergie PV dépend des conditions environnementales comme l'irradiation solaire et la température, ces conditions influent directement sur le point de puissance maximale des systèmes, pour suivre ce point, plusieurs algorithmes MPPT ont été développés jusqu'à présent, et ces algorithmes varient en termes d'application, de complexité, et de précision des capteurs ainsi que le coût. Parmi eux, la méthode P and O a attiré l'attention des chercheurs en raison de sa simplicité. Cependant, sa déviation par rapport à la MPP en cas de changement rapide de l'irradiation solaire, et le problème d'oscillation dans les états stables est inévitable. Une nouvelle approche des systèmes MPPT consiste à appliquer des systèmes intelligents artificiels, tels que les réseaux de neurones artificiels ANN, comme contrôleur MPPT ou comme partie d'un système MPPT intégré. Par conséquent, de nombreux algorithmes ANN ont été développés à cette fin, qui sont différents sur certains aspects tels que les capteurs requis et les variables d'entrée et de sortie ANN.

Ce chapitre présente une comparaison des performances de deux méthodes MPPT conventionnelles (P and O et ANN) dans deux conditions d'irradiation solaire différentes, ainsi que le contrôle du chargeur de batterie MPPT.

3.2. Commande MPPT

La commande MPPT, 'Maximum Power Point Tracking', est une commande essentielle pour un fonctionnement optimal du système photovoltaïque. Le principe de cette commande est basé sur la variation automatique du rapport cyclique α en l'amenant à la valeur optimale de manière à maximiser la puissance délivrée par le panneau PV. Pour cette raison, on va présenter et étudier par la suite les algorithmes de commande les plus populaires.

3.3. Algorithmes de suivi du point de puissance maximale (MPPT)

3.3.1. Perturbation et observation (P and O) MPPT

La méthode MPPT P and O est fréquemment utilisée en raison de sa facilité d'implémentation. Dans ces méthodes, la tension du PV est échantillonnée pour contrôler la position du point de fonctionnement du PV sur la courbe caractéristique et le déplacer vers le point optimal, en perturbant la tension de fonctionnement du PV ou le rapport cyclique α du convertisseur. **La Figure 3-1** montre l'organigramme de la méthode P and O, où V_{ref} est la tension ou le signal de courant du module PV. Si la perturbation de la tension ou du courant de fonctionnement du module ou du rapport cyclique du convertisseur en résulte une augmentation de la puissance de sortie, la perturbation suivante se poursuivra dans la même direction, sinon, la direction sera inversée pour déplacer la puissance de fonctionnement vers le MPP.

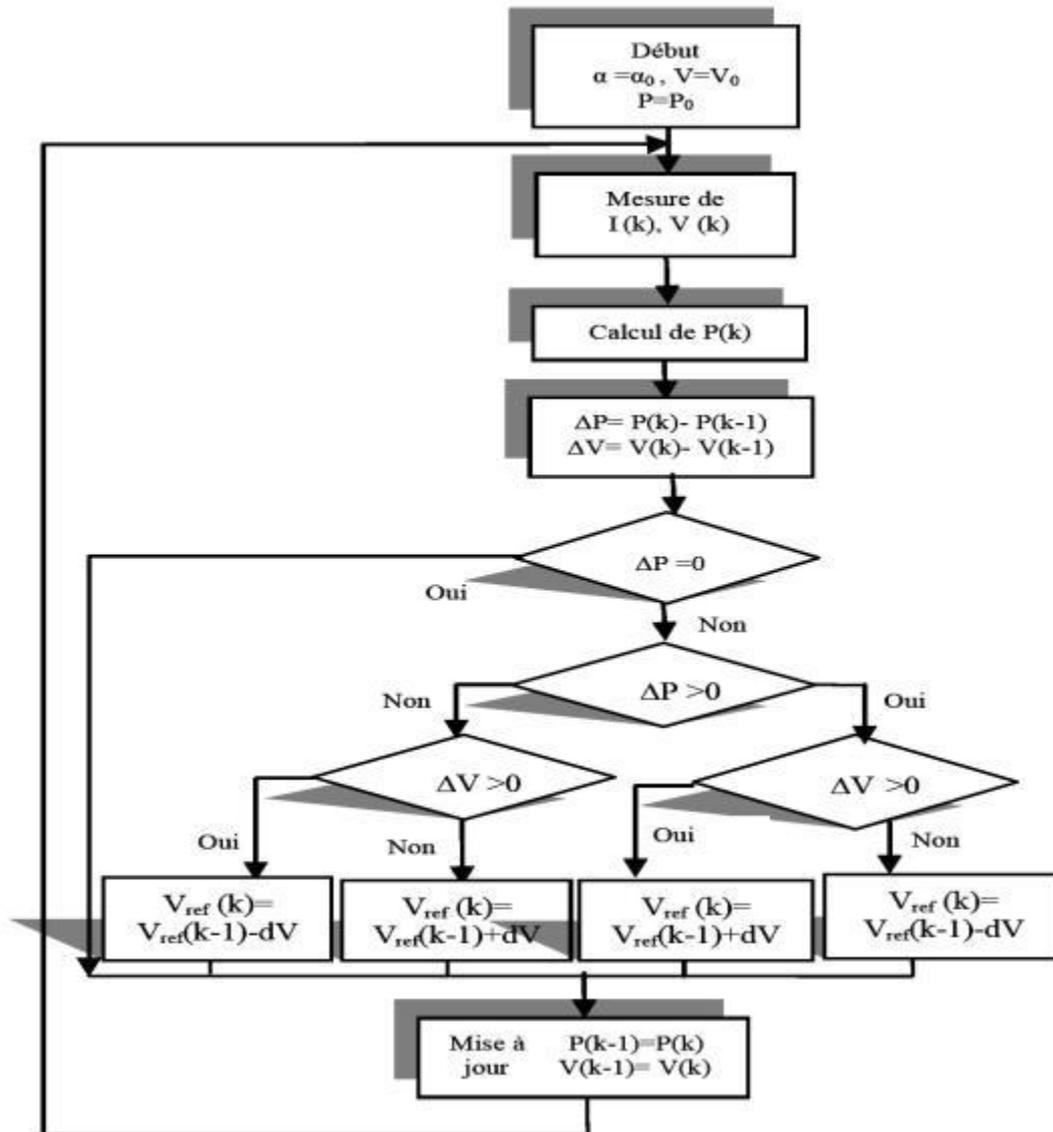


Figure 3-1 : Organigramme de l'algorithme P and O

Bien que plusieurs algorithmes adaptatifs modifiés de P and O ont été proposés pour améliorer les performances de la méthode conventionnelle de P and O, l'oscillation autour du MPP en cas de changement lent de l'irradiation et le mauvais suivi du MPP précis en cas de changement rapide de l'irradiation restent des inconvénients pour ces méthodes.

3.3.2. Réseau de neurones artificiels ANN MPPT

Un réseau neuronal artificiel est constitué d'un certain nombre d'éléments de traitement interconnectés appelés neurones, par analogie avec les neurones du cerveau humain. Les neurones sont connectés par des liens de poids ajustables pour transmettre des signaux à d'autres neurones. La figure 3-2 montre les connexions d'un ANN typique.

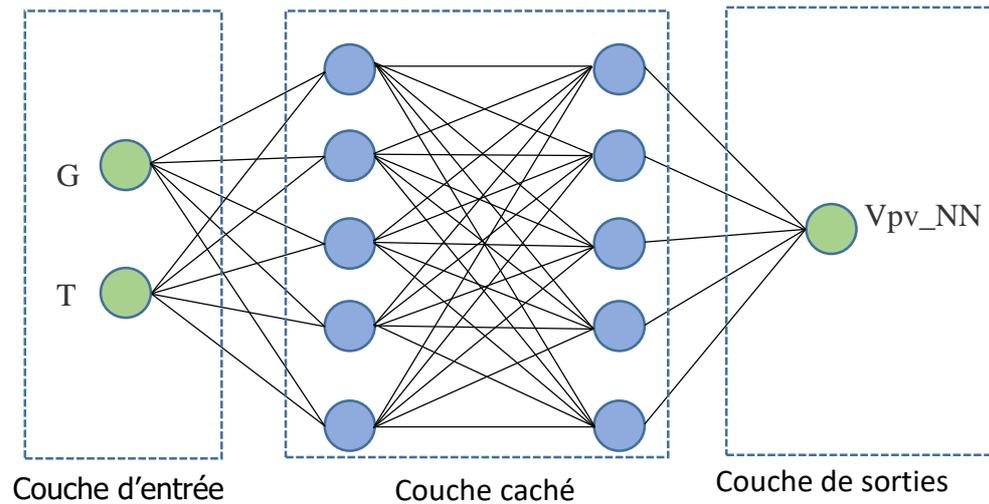


Figure 3-2 : Architecture d'un réseau de neurones artificiels typique

Pour l'apprentissage, un ensemble d'entrées et de sorties (cible) est nécessaire. Chaque neurone calcule le niveau d'activation des signaux qui lui sont liés, par une fonction d'activation définie pour la couche correspondante, et l'envoie à la couche suivante comme sortie. En comparant la sortie et la cible, l'erreur est calculée à chaque itération. Cette procédure est répétée jusqu'à ce que l'erreur soit réduite à la valeur désirée.

Dans les applications MPPT, certains algorithmes ANN utilisent deux capteurs de rayonnement et de température, et fournissent directement le cycle de service du convertisseur. Dans d'autres algorithmes, deux capteurs de rayonnement et de température sont utilisés pour trouver les points optimaux de tension et de courant, et deux capteurs de tension et de courant sont utilisés pour les suivre par un autre contrôleur, après que l'ANN les ait trouvés.

Le réseau neuronal utilisé pour ce travail est une architecture de type perceptron multicouche (MLP). Trois couches : d'entrée, de sortie et cachée sont utilisées dans ce travail. La couche cachée utilise une fonction d'activation sigmoïde tangente, tandis que la couche de sortie utilise une fonction linéaire. La fonction de performance du réseau est l'erreur quadratique moyenne (mse) qui est donnée par l'équation (3.1) ci-dessous :

$$E_{mse} = \sum_{k=1}^N [t(k) - o(k)]^2 \quad (3.1)$$

où $t(k)$ désigne la cible à l'échantillon k , $o(k)$ est la sortie à l'échantillon k et N est le nombre de modèles d'apprentissage. .

Dans ce travail, le contrôleur MPPT se compose de deux étapes. Dans la première étape, l'ANN est entraîné à l'aide de MATLAB pour identifier les points optimaux de tension et de courant (V_{pm} , I_{pm}), et dans la deuxième étape, un autre contrôleur est utilisé pour localiser le MPP en modifiant le cycle de service du boost, en utilisant l'équation (3.2) :

$$D = 1 - \sqrt{\frac{R_{in}}{R_o}} = 1 - \sqrt{\frac{v_{pm} / I_{pm}}{R_o}} \quad (3.2)$$

où D est le rapport cyclique du convertisseur boost, R_{in} est l'impédance d'entrée du convertisseur boost, et R_o est l'impédance de sortie du convertisseur boost. Le schéma fonctionnel de l'algorithme ANN est présenté à la figure 3-3.

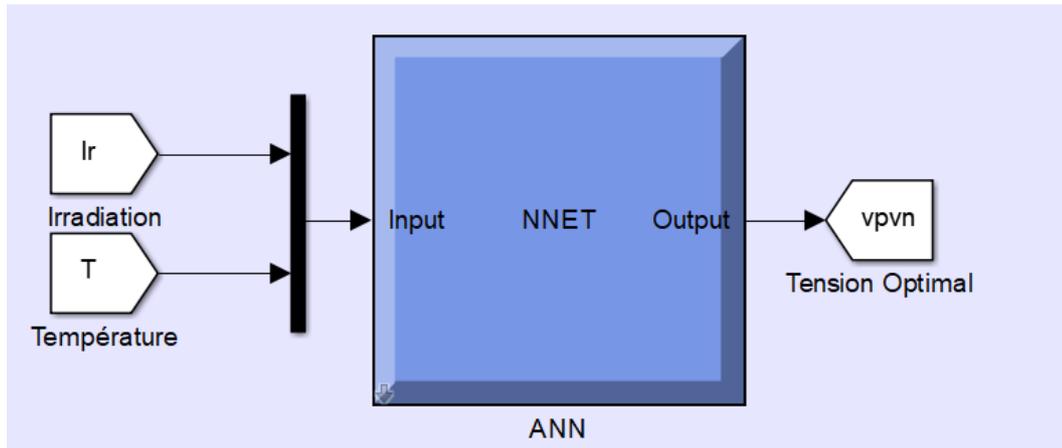


Figure 3-3 : Modèle simulink pour la méthode ANN

3.3.3. Comparaison de la méthode ANN et de la méthode P and O avec plusieurs scénarios

Pour valider l'étude énoncée dans les chapitres précédents, un système PV autonome a été relié à un convertisseur boost DC et un convertisseur bidirectionnelle simulé à l'aide de MATLAB-SIMULINK. Deux stratégies MPPT sont conçues et appliquées au système PV simulé, le premier est l'algorithme P and O, le circuit simulé est présenté dans la Figure 3-4. Le deuxième modèle est le système PV MPPT en utilisant le réseau neuronal présenté dans la Figure 3-5.

Afin d'estimer l'acte des MPPT selon l'algorithme P and O et l'algorithme ANN, deux cas d'entrées aux modèles simulés dans La Figure 3-4 et la Figure 3-5 sont appliquées :

- Température constante 25°C et changement incrément de l'irradiation. La figure 3-6 montre les résultats de la structure PV MPPT par le contrôleur ANN.
- Température constante 25°C et changement décroissant de l'irradiation.

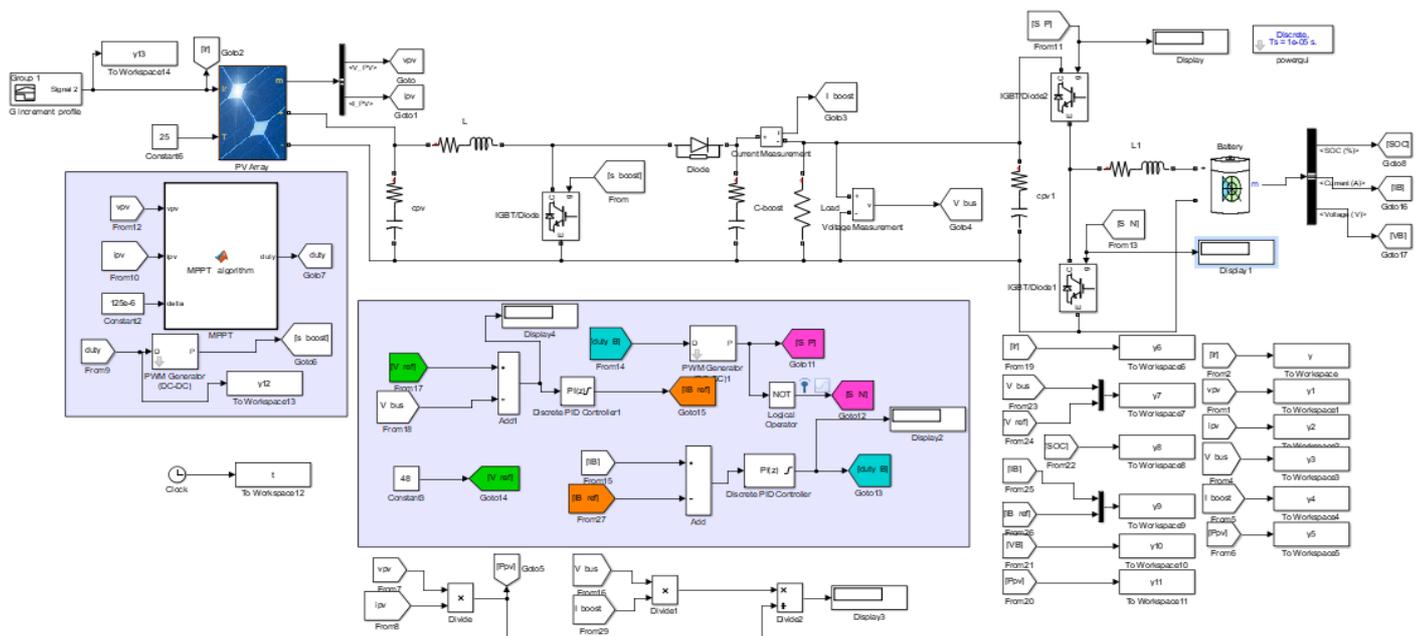


Figure 3-4 : Circuit simulé de PV MPPT par l'algorithme P and O

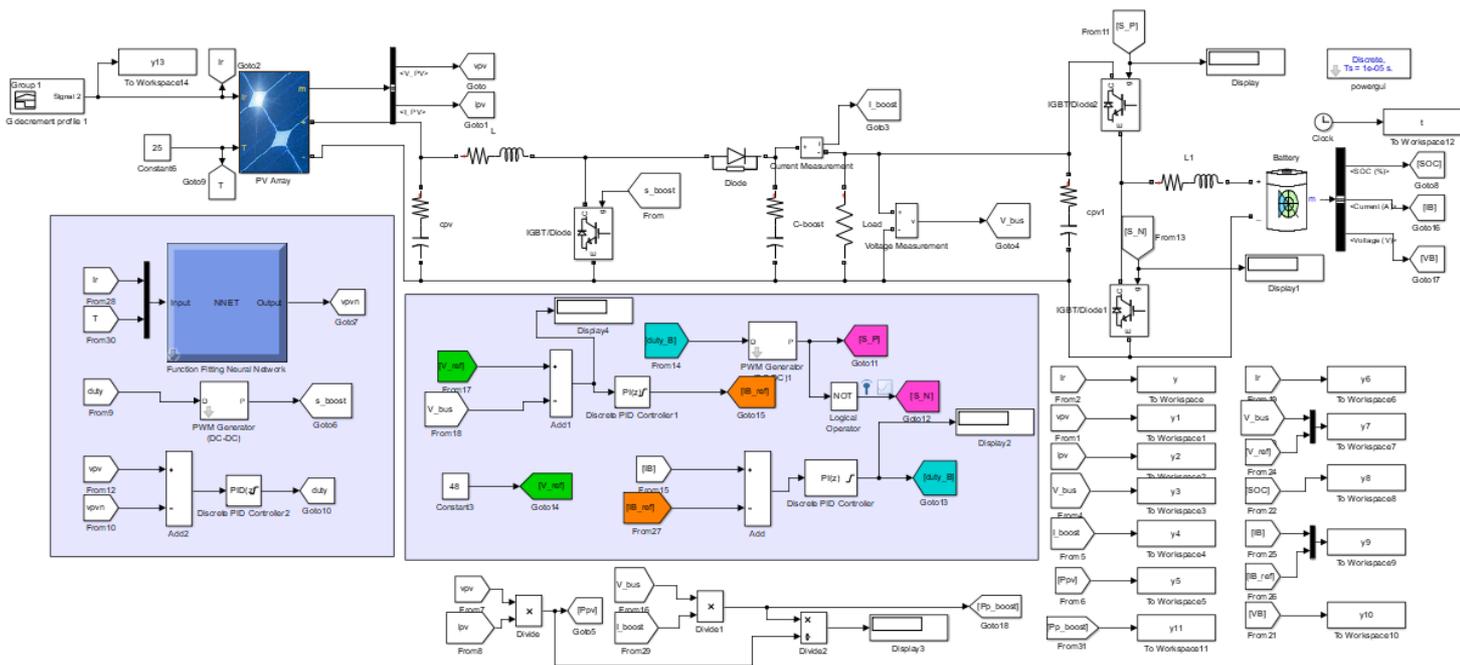


Figure 3-5 : Circuit PV simulé MPPT par l'algorithme NN

Scénario 1 : profil incrément de l'éclairement solaire, T=25°C

Ce scénario présente un profil de l'éclairement solaire incrément qui varie entre 200 à 1000 W/m² voir la Figure 3-6.

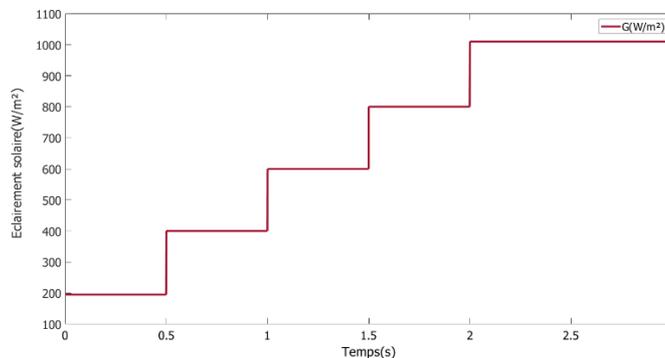


Figure 3-6 : profil incrément de l'éclairement solaire à 25°C.

L'évolution de la puissance du champ PV en utilisant l'algorithme de réseaux de neurone a présenté de meilleurs résultats par rapport à l'algorithme de MPPT par la méthode P and O, voir la Figure 3-7. On remarque que les ondulations autour du point de puissance ont réduit.

Comme le montrent la figure 3-7, MPPT par l'algorithme ANN permet de suivre rapidement le MPP en régime permanent avec un faible dépassement du pic est noté en cas de variation brusque de l'irradiation solaire, MPPT par l'algorithme P and O a permis également de suivre le MPP en régime permanent mais avec un grand dépassement du pic est noté en cas de changement de l'irradiation. De plus, L'algorithme par ANN présente de faibles oscillations autour de MPP, par rapport à simulé par la méthode P and O, ces perturbations vont

augmenter les pertes de puissance. Ces résultats ont prouvé que MPPT en utilisant le NN proposé est meilleur et plus robuste par rapport au MPPT par la méthode P and O.

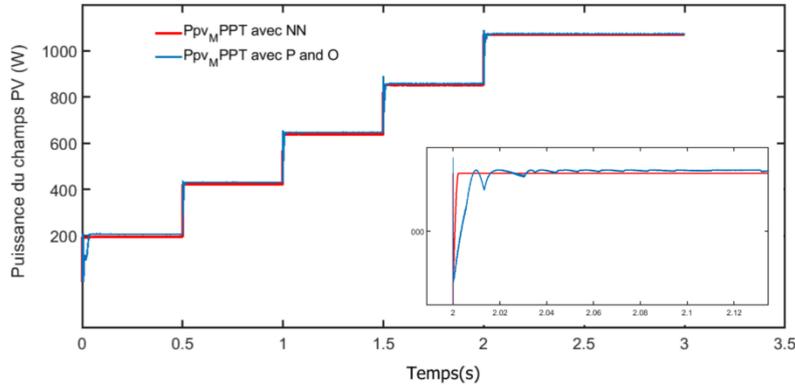


Figure 3-7 : puissance du champ PV par deux techniques de MPPT ; P and O et NN.

La batterie est contrôlée par un convertisseur bidirectionnel Buck- boost, pour assurer la charge et la décharge de la batterie (le coté Buck du convertisseur assure la charge par contre le coté boost assure la décharge).

Deux boucles de contrôles qui contrôlent le courant de charge de la batterie et une autre boucle pour contrôler la tension du bus continue qui doit être égale à 48V.

Durant notre travaille on a considéré que le mode de charge est définit par un courant négatif et lorsque le courant de charge est positif synonyme que la batterie est entrain de déchargée. Voir la **Figure 3-7** qui illustre l'évolution du courant de charge de la batterie.

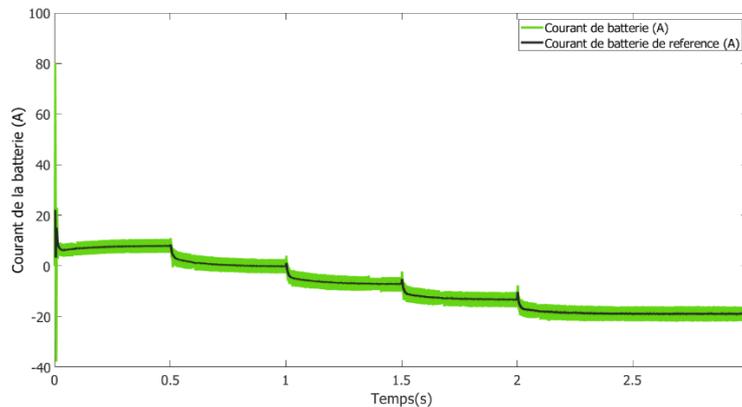


Figure 3-8 : Courant de charge de la batterie.

La tension et l'état de charge de la batterie sont deux paramètres très significatifs qui traduisent l'évolution de la charge de la batterie (voir la **Figure 3-9**).

D'après les **Figures 3-8** et **3-9** on remarque que le régulateur assure la charge de la batterie avec l'augmentation de l'éclairement solaire lorsque G dépasse 200W/m² la batterie commence à se charger.

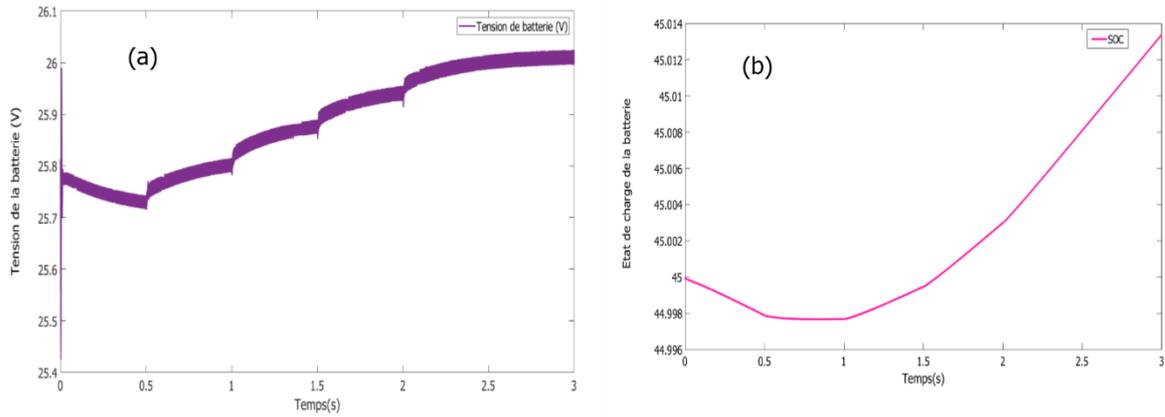


Figure 3-9 : (a) tension de la batterie ;(b) SOC de la batterie.

Scénario 2 : profil décrément de l'éclairement solaire, T=25°C

L'évolution de la puissance du champ PV à montrer de bons résultats comme le montre la Figure 3-10 suivante.

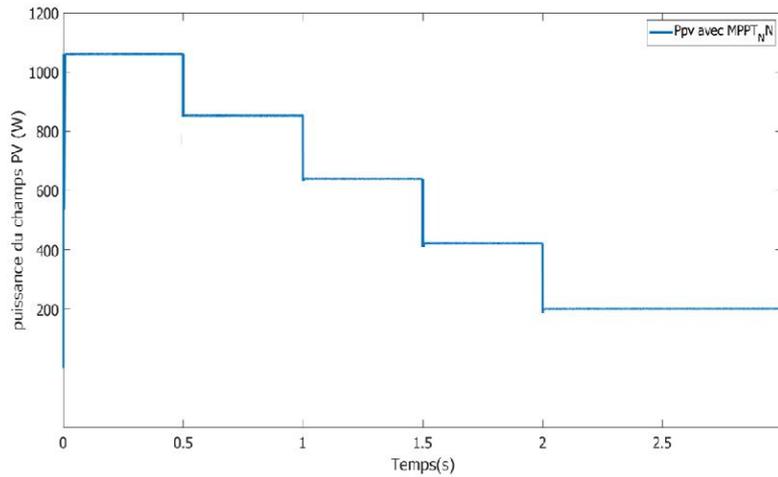


Figure 3-10 : puissance du champ PV par NN.

En début de ce scénario l'éclairement est maximale et commence à se diminuer en fonction du temps, on remarque que la batterie commence à se chargé lorsque l'éclairement est entre 1000 W/m² et 200W/m² en dessous de cette valeur la batterie se décharge (voir la Figure 3-11).

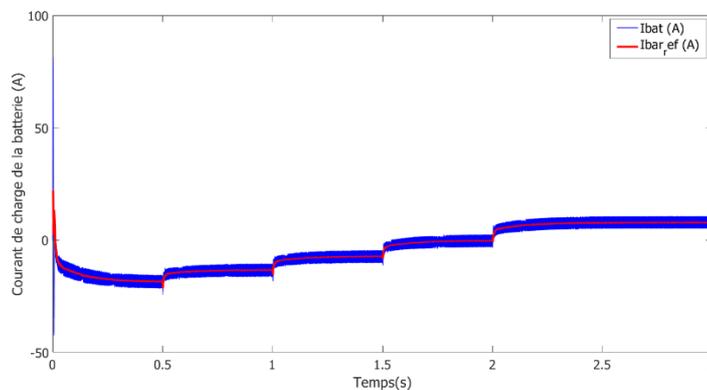


Figure 3-11 : Courant de charge de la batterie.

On remarque clairement la phase de charge et de décharge de la batterie par rapport au scénario 2 voir la **Figure 3-12** la batterie commence à se décharger lorsque l'éclairement solaire est inférieur à 200W/m^2 .

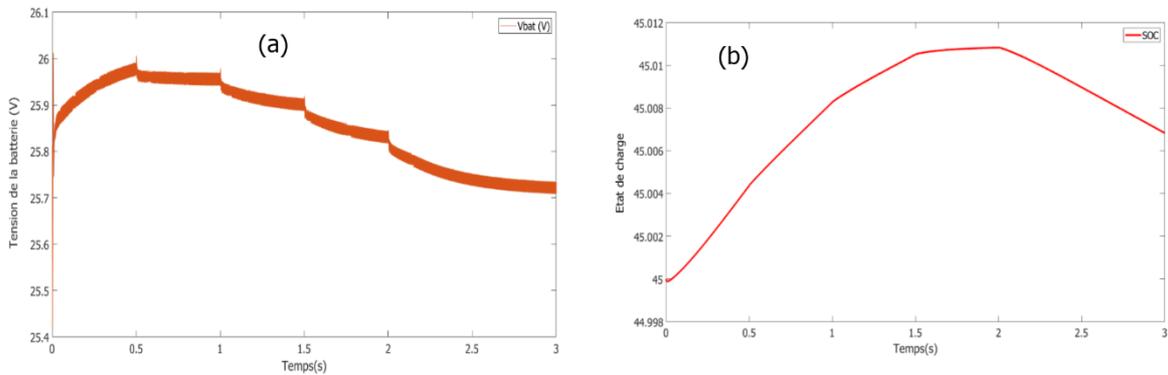


Figure 3-12 : (a) tension de la batterie ;(b) SOC de la batterie.

3.4. Conclusion

Ce chapitre traite le contrôle d'un chargeur de batterie MPPT pour un système PV autonome en utilisant une comparaison entre deux techniques de MPPT qui sont P and O et par réseau de neurones, la simulation était validé par rapport à deux scénarios différents du profil de l'éclairement solaire , le premier est croissant dont l'éclairement est évolutif dans le temps et le deuxième scénario est décroissant. La comparaison a montré que la commande de MPPT par réseau de neurone a considérablement réduit l'oscillation autour du point MPP par rapport à la méthode classique de MPPT (P and O).

De même que le régulateur à assurer la charge et la décharge de la batterie quel que soit les conditions atmosphériques par le biais un convertisseur DC-DC bidirectionnelle, ce contrôle a été assuré par deux boucles : de courant et de tension ou le convertisseur assure la charge par du côté Buck et la décharge du côté boost respectivement.

Conclusion générale

Ce travail est établi pour une commande d'un régulateur de charge pour une batterie à usage solaire incluse dans un système photovoltaïque autonome ainsi qu'une comparaison des performances de deux méthodes MPPT une par un algorithme classique et une autre par un algorithme intelligent qui sont (P and O et ANN) respectivement dans des conditions de l'irradiation solaire variables.

Tout d'abord une étude bibliographique riche et variée sur les régulateurs de charge de batterie, Ce qui nous a permis de tenir compte des interrogations liées aux problèmes de contrôle et de charge de la batterie dans un système PV autonome.

Ensuite, la modélisation de chaque composant du système PV est expliqué en détail et les paramètres des composants sont calculés.

Finalement dans le dernier chapitre, la commande du régulateur de batterie dans un système PV autonome a été effectuée par le biais d'un convertisseur bidirectionnel et l'algorithme MPPT par la technique de perturbation et d'observation P and O, puis un algorithme MPPT en utilisant ANN pour le même système. La comparaison entre les deux méthodes de contrôle est étudiée. Les résultats sont simulés dans des conditions climatiques variables et ont prouvé de bonne performances.

Références

- [1] Yasser E, Abu Eldahab, Naggar H. Saad, Abdalhalim Zekry. Enhancing the design of battery charging controllers for photovoltaic systems, Office des publications universitaire 2016.
- [2] Moustapha Bouzaki, cours de système photovoltaïque, Université Saad Dahleb, 2016.
- [3] <https://lenergie-solaire.net/energie-solaire-photovoltaique/elements/installations-auautonomes/regulateurs-charge>
- [4] WAHIBA, B. (2017). Conception et Réalisation d'une Installation Photovoltaïque Autonome (Doctoral dissertation, universite badji mokhtar annaba).
- [5] Ammour, Y., Kenouche, M., & Boubakir, C. E. (2019). Conception et réalisation d'un régulateur de charge par panneaux photovoltaïques (Doctoral dissertation, Université de Jijel).
- [6] Rezzak Daoud. Chargeur de Batterie Solaire, Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables, URAER, Centre de Développement des Energies Renouvelables, CDER, 47133, Ghardaïa, Algeria
- [7] Banguero, E., Correcher, A., Pérez-Navarro, Á., Morant, F., & Aristizabal, A. (2018). A review on battery charging and discharging control strategies: Application to renewable energy systems. *Energies*, 11(4), 1021.
- [8] Gibson, T.I., and N.a. Kelly. "Solar Photovoltaic Charging of Lithium-ion Batteries." *2009 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference* (2009): n. pag. Web.
- [9] <https://www.solaris-store.com/33-regulateur-solaire-steca-pr3030.html>
- [10] <https://www.morningstarcorp.com/wp-content/uploads/datasheet-tristar-fr.pdf>
- [11] <https://www.energiesdouce.com/regulateurs-de-charge-victron-energy/327-regulateur-de-charge-mppt-15a-75v-12-24v-bluesolar-victron-energy-3700908502176.html>
- [12] <https://www.morningstarcorp.com/wp-content/uploads/operation-manual-tristar-mppt-en.pdf>
- [13] BOUGUERRA, NOUR ELHOUDA. Etude estimative de la production d'électricité solaire en utilisant des cellules photovoltaïques à base des semi-conducteurs. Diss. Université Mohamed BOUDIAF de M'Sila, 2013.
- [14] A. Labouret, « Cellules solaires : les bases de l'énergie photovoltaïque », ed. Dunod, Paris, 2001.
- [15] Prof S. Umashankar, K. P. Aparna, R. Priya, S. Suryanarayanan (2015) Modeling and Simulation of a PV System using DC-DC Converter , *International Journal of Latest Research in Engineering and Technology*, (IJLRET), ISSN : 2454-5031, Vol.1, Issue.2, pp.09-16.
- [16] Talha, A. and K. Ame ur, Modélisation Et Commande D'un Générateur Photovoltaïque Muni D'un Régulateur MPPT.
- [17] Ndoye, S., et al. Modélisation et simulation sous Matlab/Simulink de Jo chaine d'alimentation d'une station relais de télécommunications en énergie solaire photovoltaïque dons une zone isolée du réseau électrique. *Journal des sciences*, 2009. 9(2): p. 45-55.
- [18] S. D. Stallon, K. V. Kumar, Dr S. S. Kumar, J. Baby (2013) Simulation of High Step-Up DC–DC Converter for Photovoltaic Module Application using MATLAB/SIMULINK, *International*

- Journal of Intelligent Systems and Applications, Vol.5, No.7, Doi : 10.5815/ijisa.2013.07.10, pp. 72-82.
- [19] Li Jing ; Yang Xiaobin ; Fan Peiyun ||Improved small signal modeling and analysis of the PI controlled Boost converter| Electronics, Communications and Control (ICECC), 2011 International Conference on DOI:10.1109/ICECC.2011, Page(s): 3763 3767
- [20] LeBel, F.-A., Méthode de dimensionnement et modélisation de batteries lithium-ion. Savoir UdeS, 2017.
- [19] Xuebing, H.; Minggao, O.; Language, L. A comparative study of commercial lithium ion battery cycle life: Aging mechanism identification. // Journal of Power Sources, 251, (2014), pp. 38-54
- [21] Love, G.N. ; Wood, A.R.;|Small signal model of a power electronic converter| Power Engineering Conference, 2007. IPEC 2007. International Publication Year: 2007 , Page(s): 636 642 Cited by: Papers (3)
- [22] Tawfik Radjai, Jean Paul Gaubert, Lazhar Rahmani, |The New FLC Variable Incremental Conductance MPPT with Direct Control Method Using Cuk Converter| Industrial Electronics (ISIE), 2014 IEEE 23rd International Symposium on DOI: 10.1109/ISIE.2014.6865014 Publication Year: 2014 , Page(s): 2508 2513
- [23] Lung Sheng Yang and Tsorng Juu Liang, Senior Member, IEEE; |Analysis and Implementation of a Novel Bidirectional DC-DC Converter|
- [24] Xiaoling Xiong, Student Member, IEEE, Chi K. Tse, Fellow, IEEE, and Xinbo Ruan, Senior Member, IEEE; |Bifurcation Analysis of Standalone Photovoltaic Battery Hybrid Power System
- [25] Bryant, B. ; Kazimierczuk, M.K. |Small signal duty cycle to inductor current transfer function for boost PWM DC-DC converter in continuous conduction model| Circuits and Systems, 2004. ISCAS '04. Proceedings of the 2004 International Symposium on Volume: 5 DOI:10.1109/ISCAS.2004.1329943 Publication Year: 2004 , Page(s): V 856 V 859 Vol.5 Cited by: Papers (12)
- [26] MOUSSA, S. B., Resource-Batterie-Solaire. SCRIBD, 2017.
- [27] <https://www.mathworks.com/help/phymod/sps/powersys/ref/battery.html>
- [28] Tremblay, O.; Dessaint, L.-A. Experimental Validation of a Battery Dynamic Model for EV Applications. // World Electric Vehicle Journal, 3, (2009), pp. 289-298.
- [29] Shepherd, C., THEORETICAL DESIGN OF PRIMARY AND SECONDARY CELLS. PART 3. BATTERY DISCHARGE EQUATION. NAVAL RESEARCH LAB WASHINGTON DC, 1963: p.23.
- [30] Tremblay, O. and L.-A. Dessaint, Experimental validation of a battery dynamic mode. World electric vehicle journal, 2009. 3(2): p. 289-298.
- [31] Bridier, L., Modélisation et optimisation d'un système de stockage couplé à une production électrique renouvelable intermittente. 2016, Université de la Réunion.
- [32] Estahbanati, S.R.N., S.M. Barakati, and M. Mehrjoo, Linear integer (lip) programming to optimization and sizing a wind/so/or/battery system for islanding purpose. Journal of mathematics and computer science, 2014. 13(13): p. 194-211.
- [33] Michalczuk, M., et al., Power converter-based electrochemical/ battery emulator. Przeglqd Elektrotechniczny, 2014. 90(7): p. 18-22.
- [34] Allart, D., Gestion et modélisation électrothermique des batteries lithium-ion. 2017, Normandie Université.