

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'enseignement Supérieur et de la Recherche scientifique



Université Mohamed Khider Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Electrique
Filière : Electrotechnique
Option : **Energies Renouvelables**

Réf:.....

**Mémoire de Fin d'Etudes
En vue de l'obtention du diplôme:**

MASTER

Thème

**Conception et Réalisation d'un
régulateur de charge d'une Batterie
alimentée par une source PV**

Présenté par :
CHERIET Issam
Soutenu le : 05 Juin 2017

Devant le jury composé de :

Dr : RABHI Boualaga

Pr : BETKA Achour

Dr : TERKI Amel

MCA

Professeur

MCA

Président

Encadreur

Examineur

Année universitaire : 2016 / 2017

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'enseignement Supérieur et de la recherche scientifique



Université Mohamed Khider Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Electrique
Filière : Electrotechnique
Option : **Energies Renouvelables**

Mémoire de Fin d'Etudes
En vue de l'obtention du diplôme:

MASTER

Thème

Conception et Réalisation d'un régulateur de charge d'une Batterie alimentée par une source PV

Présenté par :
CHERIET Issam

Avis favorable de l'encadreur :
Prof: BETKA.A

Avis favorable du Président du Jury

DR: RABHI.B

DR: TERKIA

Cachet et signature

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'enseignement Supérieur et de la Recherche scientifique



Université Mohamed Khider Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Electrique
Filière : Electrotechnique
Option : **Energies Renouvelables**

Thème :

Conception et Réalisation d'un régulateur de charge d'une Batterie alimentée par une source PV

Proposé par : **BETKA Achour**

Dirigé par : **CHERIET Issam**

RESUMES (Français et Arabe)

Résumé :

L'énergie photovoltaïque se trouve son application différents et dans plusieurs domaines, dans se mémoire nous s'intéressons au control d'un système de stockage contiens une charge variable est une batterie alimenté par un GPV.

Nous avons réalisé le circuit de puissance et le circuit de commande d'un hacheur abaisseur de tension et nous avons réalisé expérimentalement la variation d'angle d'amorçage du hacheur "abaisseur".

On a chargé notre batterie a travers 2 phases: 1- courant constant, 2-tension constante.

Pour la 1 ère phase (courant constant) On fait l'algorithme de l'MPPT.

Pour la 2 ème phase (tension constante) on a fixé la tension par méthode hystérésis.

Les résultats obtenus permettent de conclure l'efficacité de notre travail et l'algorithme réalisé, les résultats pratique et le côté théorique presque identique.

Les mots clés:

Module photovoltaïque, algorithme MPPT, convertisseur abaisseur contrôle de charge, régulateur de charge, chargeur de batterie.

ملخص:

الطاقة الكهروضوئية تتواجد في تطبيقات مختلفة و مجالات متعددة، في هاته المذكرة نهتم بالتحكم في منظم شحن من أجل شحن بطارية مغذاة من لوح كهروضوئي.

أنجزنا كل من دائرة التحكم و دائرة الاستطاعة لمغير جهد مستمر (خافض)، وقمنا بالتحكم فيه من خلال تغيير زاوية القدح.

تم شحن البطارية عبر طورين: 1- تيار ثابت، 2- توتر ثابت.

من أجل الطور الأول (تيار ثابت) أنجزنا خوارزمية تتبع الاستطاعة القصوى عبر تغيير زاوية القدح للمغير.

أما في ما يخص الطور الثاني (توتر ثابت) قمنا بتثبيت التوتر باستعمال طريقة - كل شيء أو لا شيء-.

النتائج المتحصل عليها بينت لنا فعالية العمل المنجز و الخوارزمية المصممة حيث كان هناك شبه تطابق بين الجانب النظري و الجانب التطبيقي المنجز .

الكلمات المفتاحية :

لوح كهروضوئي، خوارزمية (MPPT)، مغير جهد (خافض)، تحكم حمولة، منظم الشحن، شاحن بطارية.

DEDICACE

*Je remercie bien DIEU tout puissant de
m'avoir accordé le courage.*

Je dédie ce mémoire:

*A ma chère et incomparable mère qui est
l'insigne de la tendresse,
A mon cher père pour tout le sacrifice qu'il
consenti*

*Afin de m'assurer de sa totale et constante
présence durant tous
les cycles scolaires
A mes chers frères
A mes belles sœurs
A tout la famille
A tous mes amis*

Et a tous la promotion d'électrotechnique

2016/2017

ISSAM CHERIET

Remerciements

Je remercie Allah le – tout- puissant qui m'a donné la santé, le courage, la volonté et la patience nécessaire pour achever ce travail dans les milleures conditions.

Je tien à remercie sincèrement Pr. BATKA Achour en tant que promoteur, qui a été toujours à mon écoute et ma disposition tout au long de la réalisation de ce travail, ainsi que pour ses conseils et sa bonne humeur.

Je tien à remercie également les membres de JURY : « Dr. TERKI Amel (Membre) et Dr. REBHI Boualaga (Président) », qui ont acceptés d'examiner et d'évaluer mon travail.

Je remercie aussi mes parents, mes frères, mes sœurs et leurs enfants.

Enfin, Je remercie toute personne qui m'a soutenu durant la réalisation de cette étude, particulièrement SAMIA.

Le 28/05/2017

Cheriet Issam

LISTE DES TABLEAUX

Tableau.I.1.	Rendement énergétique des différents types de cellules photovoltaïques.	14
Tableau.II.1.	Caractéristiques de l'accumulateur Ni-Cd	29
Tableau.II.2.	Caractéristiques de l'accumulateur NiMH	30
Tableau.II.3.	Caractéristiques de l'accumulateur Li-Ion.	31
Tableau.II.4.	Caractéristiques de l'accumulateur au plomb.	32
Tableau.III.1.	Caractéristiques de l'IGBT (BUP314).	47
Tableau.III.2.	Caractéristiques du Panneau photovoltaïque.	49
Tableau.III.3.	Caractéristiques de la batterie utilisée.	49
Tableau.III.4.	Caractéristiques d'Arduino ATmega2560.	52
Tableau.III.5.	Valeurs expérimentales relevées d'algorithme Cond-Inc pour R1.	55
Tableau.III.6.	Valeurs expérimentales relevées d'algorithme Cond-Inc pour R2.	56

LISTE DES FIGURES

Figure.I.1.	Réponse spectrale d'une cellule (PV).	4
Figure.I.2.	Schéma synoptique d'une installation photovoltaïque	7
Figure.I.3.	Schéma synthétique de l'effet photovoltaïque.	9
Figure.I.4.	Coupe transversale d'une cellule PV typique.	9
Figure.I.5.	Associations des cellules PV en parallèle.	11
Figure.I.6.	Association des cellules en série.	12
Figure.I.7.	Connexions mixtes des modules photovoltaïques sur la caractéristique I(V).	12
Figure.I.8.	Exemples d'association sécurisée de deux modules PV commerciaux en parallèles avec leurs diodes de protections.	13
Figure.I.9.	Caractéristiques I(V) d'un module solaire, T=25°C.	15
Figure.I.10.	Caractéristiques P (V) d'un panneau solaire, T=25°C	15
Figure.I.11.	Modélisation du circuit électrique équivalent d'une cellule PV.	16
Figure.I.12.	Courbes V-I et P-V du générateur PV avec variation de la température.	18
Figure.I.13.	Courbes I-V et P-V des modules PV avec variation de l'ensoleillement.	18
Figure.I.14.	Effet de la diode by-pass sur la caractéristique $I=f(V)$ d'un générateur photovoltaïque.	21
Figure.I.15.	Principe d'une connexion directe entre un GPV et une charge.	21
Figure.I.16.	Points de fonctionnement d'un GPV en connexion directe, en fonction de la charge.	22
Figure.I.17.	Etage d'adaptation jouant le rôle d'interface de puissance entre un GPV et une charge pour le transfert de P _{MAX} du GPV.	23
Figure.II.1.	Evolution des éléments d'une batterie en fonction de son état de charge.	27

LISTE DES FIGURES

Figure.II.2.	Modèle simplifié de l'accumulateur.	28
Figure.II.3.	Schéma d'un accumulateur Ni-MH pendant la charge électrochimique.	30
Figure.II.4.	Comment une batterie au lithium-ion produit de l'électricité.	31
Figure.II.5.	Schéma générale d'une batterie.	33
Figure.II.6.	Réaction chimique à chaque borne lors de décharge	35
Figure.II.7.	Le schéma électrique équivalent de la batterie	37
Figure.II.8.	Conception d'un régulateur shunt.	38
Figure.II.9.	Conception d'un régulateur série.	38
Figure.II.10.	Les trois phases pour les batteries.	40
Figure.II.11.	Les 3 phases pour les batteries AGM, Gel et Acide-Plomb (Flooded).	41
Figure.II.12.	Schéma d'algorithme de charge adopte.	42
Figure.II.13.	Idée de base de conductance incrémentale.	43
Figure.II.14.	Organigramme de l'algorithme MPPT de l'incrémentale de la conductance.	44
Figure.II.15.	Schéma block de la régulation a hystérésis.	45
Figure.III.1.	Le schéma du hacheur série réalisé.	46
Figure.III.2.	Photo de circuit de puissance réalisé.	46
Figure.III.3.	Photo de l'IGBT BUP314 utilisé.	47
Figure.III.4.	Photo de la capacité (C2) utilisée.	47
Figure.III.5.	Photo de la diode anti retour utilisée.	48
Figure.III.6.	Photo de la bobine réalisée.	48
Figure.III.7.	Photo de module solaire étudiée.	49
Figure.III.8.	Photo de la batterie utilisée.	50
Figure.III.9.	La carte arduino ATMEGA2560.	51
Figure.III.10.	Schéma de circuit d adaptation réalisé.	53

LISTE DES FIGURES

Figure.III.11.	Schéma synoptique complet du prototype à réalisé.	54
Figure.III.12.	Photo du montage complet réalisé.	54
Figure.III.13.	histogramme des puissances d'algorithme Cond-Inc pour la résistance R1.	56
Figure.III.14.	Histogramme des puissances d'algorithme Cond-Inc pour la résistance R2.	57
Figure.III.15.1.	le rapport cyclique (α) et signal de vérification.	57
Figure.III.15.2.	Tension de PV et tension de charge.	57
Figure.III.15.3.	Tension de PV.	58
Figure.III.15.4.	Tension de charge.	58
Figure.III.15.5.	Courant de charge.	58
Figure.III.16.	La tension de la batterie pendant 1ère phase de charge	59
Figure.III.17.	La tension du panneau pendant 1ère phase de charge.	59
Figure.III.18.	Courant de la batterie pendant 1ère phase de charge.	60
Figure.III.19.	Courant du panneau pendant 1ère phase de charge.	60
Figure.III.20.	Le rapport cyclique pour 1 ère phase.	60
Figure.III.21.	La tension de la batterie pendant 2ème phase de charge.	61
Figure.III.22.	Evolution du rapport cyclique (α) en 2eme phase.	61
Figure.III.23.	La tension du panneau pendant 2ème phase de charge.	62
Figure.III.24.	Le courant de la batterie pendant 2ème phase de charge.	62
Figure.III.25.	La tension de charge de batterie.	63
Figure.III.26.	Le courant de charge de batterie.	63
Figure.III.27.	Photo du chargeur de batterie réalisé	64

LISTE DES ABREVIATIONS

I_{ph} : courant photo généré par le générateur photovoltaïque sous éclairage	(A).
I_d : courant qui traverse la diode	(A).
I_0 : courant de saturation	(A).
I : courant qui traverse la charge	(A).
N_s : nombre de cellules en série.	-
N_p : nombre de cellules en parallèle.	-
GPV : générateur photovoltaïque.	-
PV : photovoltaïque.	-
I_{cc} : courant de court-circuit	(A).
I_R : courant qui traverse R_{sh}	(A).
V_{oc} : tension de court circuit	(V).
R_s : résistance série du générateur	(Ω).
R_{sh} : résistance parallèle du générateur	(Ω).
q : charge de l'électron	(C).
n : facteur d'idéalité.	-
k : constante de Boltzmann	(J/K).
T : température absolue	(°K).
E : éclairage, ensoleillement	(W/m^2).
A_1 : la surface effective du générateur photovoltaïque	(m^2).
P_M : puissance maximale	(W).
I_M : courant maximal	(A).
V_M : tension maximale	(V).
η : rendement du générateur PV	-
FF : facteur de forme.	-
PPM : point de puissance maximale.	-
α : rapport cyclique	-
V_s : tension de sortie	(V).
V_e : tension d'entrée	(V).
I_s : courant de sortie	(A).
I_e : courant d'entrée	(A).
MPPT: maximum power point tracker.	-

LISTE DES ABREVIATIONS

U_T : Tension thermique.	(V).
A : Facteur de qualité	-
η_c : Rendement d'une cellule solaire	-
N_p : nombre de cellules en parallèles.	-
N_s : nombre de cellules en série.	-
η_g : Rendement de générateur photovoltaïque.	-
P_e : la puissance d'entrée du champ.	(W).
PS : la puissance à la sortie du champ photovoltaïque	(W).
S : Surface du module photovoltaïque	(m ²).
α : le rapport cyclique du commutateur ($\alpha \in [0,1]$)	-
C_p : capacité de Peukert.	-
DoD_{init} : la profondeur de décharge initiale.	-
DoD : La profondeur de décharge d'une batterie.	-
SoC : état de charge (state of charge).	-

SOMMAIRE

Liste des tableaux

Liste des figures

Liste des abréviations

Introduction générale

CHAPITRE 01

GENERALITES SUR LES SYSTEMES PHOTOVOLTAÏQUES

I.1. INTRODUCTION.....	3
I.2. HISTORIQUE DE L'ENERGIE PHOTOVOLTAÏQUE.....	3
I.3. RAYONNEMENT SOLAIRE	3
a) Rayonnement direct :	4
b) Rayonnement diffus :	4
c) Rayonnement global :	5
I.4. AVANTAGES ET INCONVENIENTS DE L'ENERGIE SOLAIRE	5
I.4.1. Avantages.....	5
I.4.2. Inconvénients:	6
I.5. DIFFERENTES CONFIGURATIONS DES SYSTEMES PV	6
I.5.1. Système autonome sans batterie	7
I.5.2. Système autonome avec batterie.....	7
I.5.3. Système fonctionnant au fil du soleil.....	7
I.5.4. Système avec appoint électrique.....	7
I.6. PRINCIPE DE LA CONVERSION PHOTOVOLTAÏQUE	8
I.7. LE GENERATEUR PHOTOVOLTAÏQUE	8
I.7.1. Principe d'une cellule photovoltaïque.....	8
I.7.2. Constitution d'un générateur photovoltaïque.....	11
I.8. TECHNOLOGIES DES CELLULES PHOTOVOLTAÏQUES.....	13
I.9 CARACTERISTIQUES D'UN MODULE SOLAIRE.....	15
I.9.1 Caractéristique courant-tension I(V) :	15
I.9.2 Caractéristique puissance-tension P(V) :	15
I.10. MODELISATION DU MODULE PHOTOVOLTAÏQUE.....	16
I.10.1. Influence du rayonnement solaire et de la température	17
I.11. PARAMETRES EXTERNES D'UNE CELLULE SOLAIRE PHOTOVOLTAÏQUE	19

I.12. PROTECTIONS CLASSIQUES D'UN GPV.....	20
I.13. CONNEXION DIRECTE ENTRE LA SOURCE ET LA CHARGE.....	21
I.14. DEFINITION DE L'ETAGE D'ADAPTATION ENTRE UNE SOURCE ET UNE CHARGE.....	23
I.15. CONCLUSION.....	24

CHAPITRE 02

TECHNIQUES DE CHARGE D'UNE BATTERIE A PLOMB

II.1 INTRODUCTION.....	25
II.2 LES ACCUMULATEURS.....	25
II.3 CARACTERISTIQUES DE LA BATTERIE.....	25
II.3.1 La résistance interne de l'accumulateur.....	25
II.3.2 La tension à vide.....	25
II.3.3 La tension nominale.....	26
II.3.4 La tension de fin décharge.....	26
II.3.5 La capacité.....	26
II.3.6 Le taux de décharge et recharge.....	26
II.3.7 Profondeur de décharge.....	26
II.3.8 Influence des paramètres extérieurs.....	26
II.3.9 Durée de vie et nombre de jour d'autonomie.....	27
II.3.10 Énergie.....	27
II.3.11 État de charge de l'accumulateur.....	27
II.3.12 Circuit équivalent.....	28
II.4. ÉTUDE DE L'ART DES DIFFERENTS ACCUMULATEURS EXISTANTS ...	28
II.5 TYPE D'ACCUMULATEURS EXISTANTS.....	28
II.5.1 Accumulateur Ni-Cd.....	29
II.5.2 Accumulateur NiMH.....	30
II.5.3 Accumulateur Li-ion.....	30
II.5.4 ACCUMULATEUR AU PLOMB.....	32
II.5.4.1 Constitution.....	32
II.5.4.2 Technologie.....	33
II.5.4.3 Principe de fonctionnement.....	34
II.5.4.4 Différents types d'accumulateurs au plomb.....	35

SOMMAIRE

II.5.4.4.1 Batteries au plomb ouvertes avec électrolyte liquide	35
II.5.4.4.2 Batteries au plomb étanches à recombinaison de gaz	36
a) La batterie sans entretien avec électrolyte gel.....	36
b) La batterie AGM étanche.....	36
II.6. MODELISATION DE LA BATTERIE	37
II.7. CONCEPTION D'UN REGULATEUR DE CHARGE.....	37
II.7.1. Régulateur shunt.....	37
II.7.2. Régulateur série.....	38
II.8 TECHNIQUE DE CHARGE D'UNE BATTERIE AU PLOMB.....	39
II.8.1 Choix de l'algorithme de charge.....	39
a) Charge à tension constante :	39
b) Charge à courant constant :	40
II.8.2. Algorithme de trois phases.....	40
II.8.2.1. Charge à courant constant (Bulk Phase).....	41
II.8.2.2. Charge à tension constante (Acceptance Phase).....	41
II.8.2 .3. Maintien à tension constante (Float Phase)	41
II.9 ALGORITHME DE CHARGE ADOPTE.....	42
II.9.1 Charge à courant constant	42
II.9.1.1. Description des commandes MPPT.....	42
II.9.1.2 Méthode d'incrémentation de la conductance	43
II.9.2. Charge à tension constante.....	44
II.9.2.1. Réglage par hystérésis (tout – ou – rien)	44
II.10. CONCLUSION.....	45

CHAPITRE 03

CONCEPTION DU REGULATEUR DE CHARGE

II.2. DESCRIPTION DU HARDWARE	46
II.2.1. Etude du hacheur	46
III.2.2. composants utilisés :	47
a) Switch de puissance :	47
b) Capacités :	47
c) Diode de roue libre :	48
d) Inductance :	48

SOMMAIRE

III.2.3. Module photovoltaïque	48
III.2.4. Batterie à plomb	49
III.3. CIRCUIT DE COMMANDE.....	50
III.3.1. La carte arduino :	50
III.3.1.1. Caractéristiques de d'Arduino ATmega2560:	52
III.3.2. Hardware utilisé :	52
III.4. CIRCUIT D'ADAPTATION	53
III.5. PRESENTATION DU PROTOTYPE	53
III.6. RESULTATS EXPERIMENTAUX.....	55
III.6.1. Résultats de l' MPPT	55
III.6.1.1. Les courbes des V_{pv} , V_{ch} , I_{ch} et α (le rapport cyclique)	57
III.6.1.2. Des histogrammes précédents	58
III.6.1.3. Les courbes V_{pv} , V_{ch} , et I_{ch}	58
III.6.2. RESULTATS DE CHARGE DE BATTERIE	59
III.6.2.1. Résultats de la première phase	59
III.6.2.2. Résultat de la deuxième phase	61
III.6.3. Les caractéristiques globales de la charge de batterie	63
III.7. CONCLUSION	64

Conclusion générale

Bibliographies

Annexes

Introduction Générale

INTRODUCTION GENERALE

L'électricité est aujourd'hui la forme d'énergie la plus aisée à exploiter. Mais avant de la consommer il aura fallu la produire, en général dans des unités de production de grande puissance, la transporter, puis la distribuer vers chaque consommateur. Dans les pays industrialisés, ce système est aujourd'hui très centralisé même si les évolutions de réglementation conduisent à une amorce de décentralisation de la production. La production d'énergie est un défi de grande importance pour les années à venir. En effet, les besoins énergétiques des sociétés industrialisées ne cessent d'augmenter. Par ailleurs, les pays en voie de développement auront besoin de plus en plus d'énergie pour mener à bien leur développement. De nos jours, une grande partie de la production mondiale d'énergie est assurée à partir de sources fossiles. La consommation de ces sources donne lieu à des émissions de gaz à effet de serre et donc une augmentation de la pollution. Le danger supplémentaire est qu'une consommation excessive du stock de ressources naturelles réduit les réserves de ce type d'énergie de façon dangereuse pour les générations futures [22].

Sans énergie, notre monde ne pourrait fonctionner. En effet, l'homme, les machines et la nature ont tous besoin. La demande totale d'énergie dans le monde s'accroît proportionnellement à la croissance démographique, à la disponibilité limitée des sources d'énergie et aux coûts sociaux et environnementaux de l'approvisionnement d'énergie. Mais, en principe, nous disposons de suffisamment d'énergie. Le soleil fournit une énergie lumineuse colossale à la Terre (10.000 fois l'énergie nécessaire). Mais le problème réside en ce que la forme sous laquelle nous recevons l'énergie n'est pas nécessairement celle sous laquelle cette énergie est utilisable. C'est pourquoi, nous devons utiliser des processus de conversion de l'énergie. Par exemple, les cellules solaires photovoltaïques permettent de convertir l'énergie lumineuse du soleil en énergie électrique. L'appauvrissement des sources énergétiques traditionnelles (pétrole...) due à une utilisation accrue de celles-ci et l'augmentation considérable du prix du pétrole... entraînent que l'étude des énergies renouvelables revêt une importance cruciale pour les années à venir. Les énergies renouvelables utilisables actuellement sont l'énergie hydraulique, l'énergie éolienne, l'énergie photovoltaïque...etc. [22].

Ces générateurs renouvelables sont couplés généralement à un système de stockage assurant une disponibilité en continue d'énergie. Le système considéré dans ce travail est constitué d'un module photovoltaïque, une batterie à plomb et un régulateur de charge de type

Buck. La maturité dans cette technologie fait preuve et son faible cout sont les raisons principales. L'utilisation de ces batteries à l'échelle saisonnière est inenvisageable. Elles ne peuvent rester longtemps inutilisées sans conséquences néfastes sur leur durée de vie. Leur fonctionnement Journalier (décharge et charge), état de charge maximale des batteries. Dans le présent travail, on présente la commande d'un système de stockage (batterie) via un module photovoltaïque l'algorithme proposé est celui à deux phases par commande d'un hacheur de type Buck.

Dans le premier chapitre, nous présentons le principe de la conversion PV, les caractéristiques du Générateur PV et ses Performances, les systèmes photovoltaïques, leurs secteurs d'application, les avantages, les inconvénients.

Dans le deuxième chapitre, un aperçu sur les types des batteries les techniques de charge de batterie à plomb la méthode de conductance incrémentale pour l'extraction de la puissance maximale du module PV. Ainsi qu'autre algorithme de charge à deux phases a été également donné.

Dans le dernier chapitre, on expose la réalisation du dispositif expérimental ainsi que la description de chaque bloc (bloc de commande, bloc de puissance), et l'algorithme de charge de la batterie à plomb à deux phases, suivies d'un ensemble des résultats pratiques commentés.

Chapitre I

Généralités sur les systèmes
photovoltaïques

I.1. INTRODUCTION

L'énergie photovoltaïque résulte de la transformation directe de la lumière du soleil en énergie électrique aux moyens des cellules généralement à base de silicium cristallin qui reste la filière la plus avancées sur le plan technologique et industriel, en effet le silicium et l'un des éléments les plus abondants sur terre sous forme de silice non toxique.

Le mot " photovoltaïque" vient du grec " photo " qui signifie lumière et de " voltaïque " qui tire son origine du nom d'un physicien italien Alessandro Volta (1754 -1827), qui a beaucoup contribué à la découverte de l'électricité, alors le photovoltaïque signifie littérairement «la lumière électricité » [1].

I.2. HISTORIQUE DE L'ENERGIE PHOTOVOLTAÏQUE

Quelques dates importantes dans l'énergie photovoltaïques :

1839 : Le physicien français Edmond Becquerel découvre l'effet photovoltaïque.

1875 : Werner Von Siemens expose devant l'académie des sciences de Berlin un article sur l'effet photovoltaïque dans les semi-conducteurs.

1954 : Trois chercheurs américains Chapin, Peason et Prince fabriquent une cellule photovoltaïque.

1958: Une cellule avec un rendement de 9 % ; les premiers satellites alimentés par des cellules solaires sont envoyés dans l'espace.

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

1983 : La première voiture alimentée en énergie photovoltaïque parcourt une distance de 4000 Km en Australie [2].

I.3. RAYONNEMENT SOLAIRE

Malgré la distance considérable qui sépare le soleil de la terre 150.10^6 Km, la couche terrestre reçoit une quantité d'énergie importante 180.10^6 GW, c'est pour ça que l'énergie solaire se présente bien comme une alternative aux autres sources d'énergie. Cette quantité d'énergie quittera sa surface sous forme de rayonnement électromagnétique compris dans une

longueur variant de 0.22 à 10 μm . L'énergie associée à ce rayonnement solaire se décompose approximativement comme suit:

- 9% dans la bande des ultraviolets (< à 0.4 μm).
- 47% dans la bande visibles (0.4 à 0.8 μm).
- 44% dans la bande des infrarouges (> à 0.8 μm).

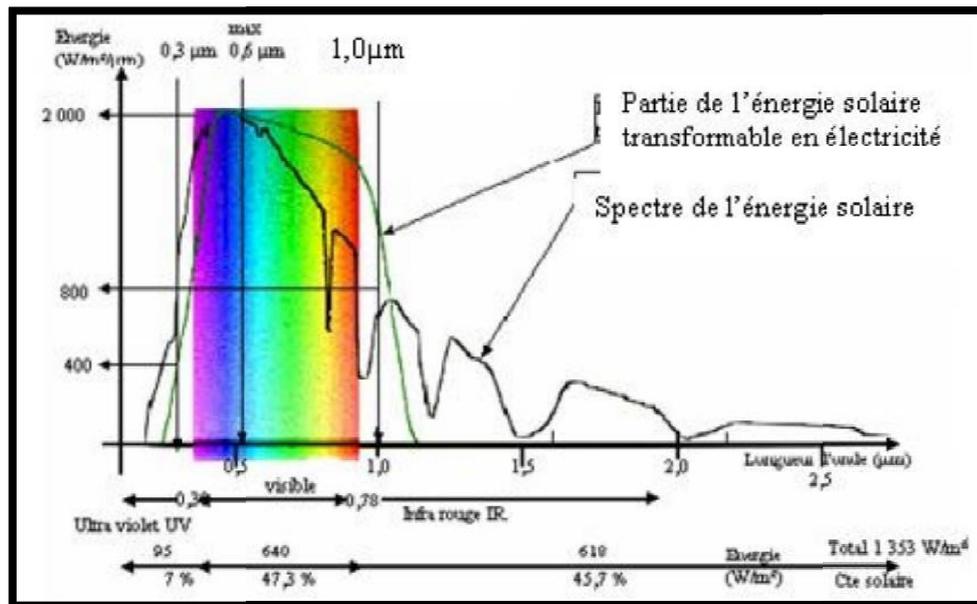


Figure (I.1) : Réponse spectrale d'une cellule (PV). [2]

a) Rayonnement direct :

C'est l'ensemble des rayonnements solaires parallèles qui produisent l'énergie venant, directement du soleil vers la terre plus au moins alterné. (Par la diffusion ou l'absorption)

b) Rayonnement diffus :

Il provient d'une manière isotrope de toutes les directions de l'espace, lui même, il est décomposé en :

- Diffus provenant du ciel.
- Diffus provenant du sol.
- Diffus provenant de la rétrodiffusion du sol.

c) Rayonnement global :

C'est l'énergie du soleil reçue par une surface horizontale, elle est la somme des deux rayonnements relatifs des rayonnements directs et diffus. Par temps clair, les proportions relatives des rayonnements direct et diffus varient au cours de la journée selon la hauteur du soleil, mais également selon les quantités d'eau, de CO₂ ou de poussière contenue dans l'atmosphère. Le rayonnement direct est dix fois supérieur au rayonnement diffus, lorsque le soleil est proche du zénith; Hors atmosphère, la répartition spectrale du rayonnement se détermine de manière très précise. Au sol, la vapeur d'eau, la poussière, etc..., ont un effet considérable sur le spectre du rayonnement reçu [3].

I.4. AVANTAGES ET INCONVENIENTS DE L'ENERGIE SOLAIRE

Les systèmes photovoltaïques présentent un grand nombre d'avantages et d'inconvénients qui sont : [4]

I.4.1. Avantages

Les systèmes photovoltaïques ont plusieurs avantages:

- ils sont non polluants sans émissions ou odeurs discernables.
- ils peuvent être des systèmes autonomes qui fonctionnent sûrement, sans surveillance pendant de longues périodes.
- ils peuvent être combinés avec d'autres sources d'énergie pour augmenter la fiabilité de système.
- ils peuvent résister à des conditions atmosphériques pénibles comme la neige et la glace.
- ils ne consomment aucun combustible fossile et leur carburant est abondant et libre.
- une haute fiabilité, car l'installation ne comporte pas de pièces mobiles, ce qui la rend particulièrement appropriée aux régions isolées, d'où son utilisation sur les engins spatiaux.
- le système modulaire des panneaux photovoltaïques permet un montage adaptable à des besoins énergétiques variés; les systèmes peuvent être dimensionnés pour des applications allant du milliwatt au mégawatt.

- la technologie photovoltaïque présente des qualités sur le plan écologique car le produit est non polluant, silencieux, et n'entraîne aucune perturbation du milieu.
- ils ont une longue durée de vie.

I.4.2. Inconvénients:

- La fabrication du module photovoltaïque relève de la haute technologie et requiert des investissements d'un coût élevé.
- Le rendement réel de conversion d'un module est faible, de l'ordre de 10-15%, avec une limite théorique pour une cellule de 28%.
- Les générateurs photovoltaïques ne sont compétitifs par rapport au générateur diesel que pour les faibles demandes d'énergie en régions isolées.
- Le faible rendement des panneaux photovoltaïques s'explique par le fonctionnement même des cellules pour arriver à déplacer un électron, il faut que l'énergie du rayonnement soit au moins égale à 1 eV. Tous les rayons incidents ayant une énergie plus faible ne seront donc pas transformés en électricité de même. Les rayons lumineux dont l'énergie est supérieure à 1 eV perdront cette énergie, le reste sera dissipé sous forme de chaleur.
- Tributaire des conditions météorologiques.
- Lorsque le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batterie) est nécessaire, le coût du générateur est accru. [5]

I.5. DIFFÉRENTES CONFIGURATIONS DES SYSTÈMES PV

Généralement une installation photovoltaïque comprend les éléments suivants: [6] [7]

- un générateur photovoltaïque.
- un convertisseur statique continu / continu (DC/DC).
- un convertisseur statique continu / alternatif (DC/AC).
- Un système de régulation et de stockage.
- une source auxiliaire d'alimentation.

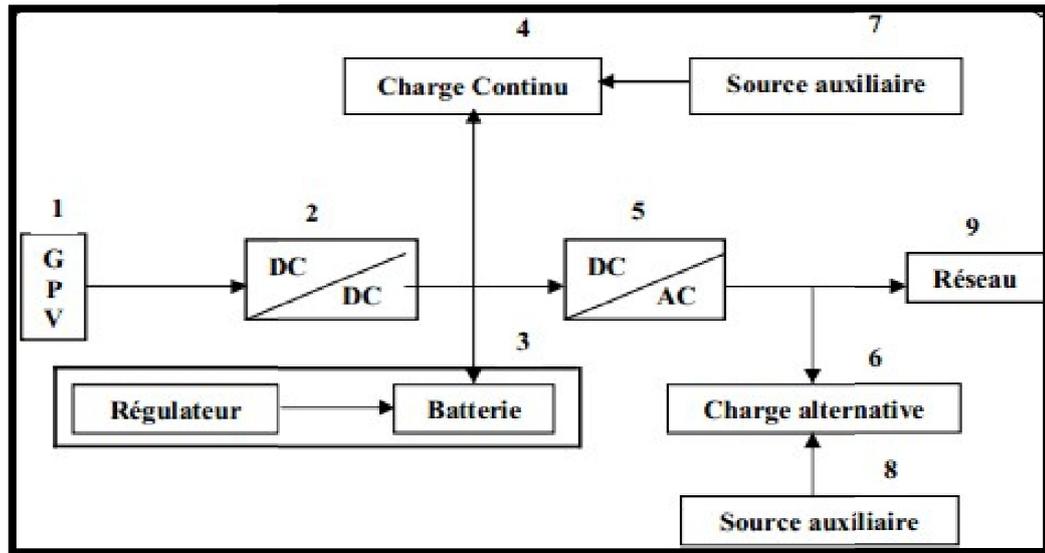


Figure (I.2) : Schéma synoptique d'une installation photovoltaïque. [6]

I.5.1. Système autonome sans batterie

Les systèmes photovoltaïques autonomes sans batterie sont représentés par les blocs (1) et (4) de la figure précédente. La charge de type continu est alimentée directement par le GPV, car la production d'énergie est suffisante pour le fonctionnement de la charge.

I.5.2. Système autonome avec batterie

Ces systèmes sont représentés par les blocs [(1), (3), (4)] dans le cas où la charge est de type continu et les blocs [(1), (3), (5), (6)] si la charge est de type alternatif. La batterie sert à stocker de l'énergie produite par le GPV, alors l'énergie peut être utilisée de tout temps, même en l'absence du rayonnement solaire.

I.5.3. Système fonctionnant au fil du soleil

Ces systèmes font intervenir des convertisseurs DC/DC qui permettent de faire une adaptation entre le générateur et la charge continue [(1), (2), (4)]. Si la charge est de type alternatif, le convertisseur DC/AC est introduit [(1), (5), (6)].

I.5.4. Système avec appoint électrique

Pour ces systèmes, on introduit des générateurs auxiliaires qui n'interviennent qu'en cas d'insuffisances d'énergie électrique (manque de rayonnement solaire ou batteries déchargées), ces générateurs auxiliaires peuvent être de type continu [(1),(2),(3),(4),(7)] et

[(1),(2),(3),(4),(7),(9)]; ou de type alternatif [(1),(2),(3), (5),(6),(8)] et [(1),(2),(3),(5),(6),(8),(9)].

Les sources auxiliaires peuvent être alimentées soit par le réseau soit par une autre source d'énergie.

I.6. PRINCIPE DE LA CONVERSION PHOTOVOLTAÏQUE

La cellule photovoltaïque est un composant semi-conducteur dont les porteurs de charges ou paires d'électrons-trous (électrons dans la bande de conduction et trous dans la bande de valence) sont générés par suite de l'absorption sélective des photons lumineux par la cellule. En d'autres termes, quand les photons incidents ont une énergie suffisante pour provoquer le transfert des électrons de la bande de valence vers la bande de conduction, des paires électrons-trous se créent. En passant dans la bande de conduction, l'électron laisse un trou ou un vide qui sera comblé par un électron voisin et le processus continu. En reliant les deux surfaces de la jonction P-N via une charge, un courant électrique circule [8].

I.7. LE GENERATEUR PHOTOVOLTAÏQUE

I.7.1. Principe d'une cellule photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque est un capteur constitué d'un matériau semi-conducteur absorbant l'énergie lumineuse et la transformant directement en courant électrique. Le principe de fonctionnement de cette cellule fait appel aux propriétés d'absorption du rayonnement lumineux par des matériaux semi-conducteurs. Ainsi, le choix des matériaux utilisés pour concevoir des cellules PV se fait en fonction des propriétés physiques de certains de leurs électrons susceptibles d'être libérés de leurs atomes lorsqu'ils sont excités par des photons provenant du spectre solaire et possédant une certaine quantité d'énergie selon leurs longueurs d'onde. Une fois libérés, ces charges se déplacent dans le matériau formant globalement un courant électrique de nature continu (DC). La circulation de ce courant donne alors naissance à une force électromotrice (fem) aux bornes du semi-conducteur correspondant ainsi au phénomène physique appelé effet photovoltaïque. Les figures (I.3) et (I.4) illustrent la constitution d'une cellule photovoltaïque en silicium [9] [10].

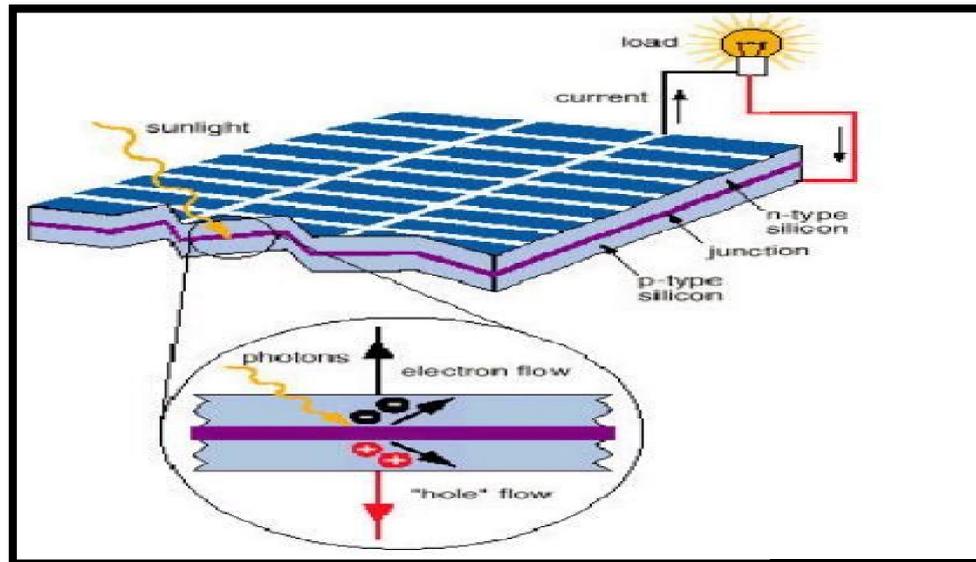


Figure (I. 3) : Schéma synthétique de l'effet photovoltaïque.

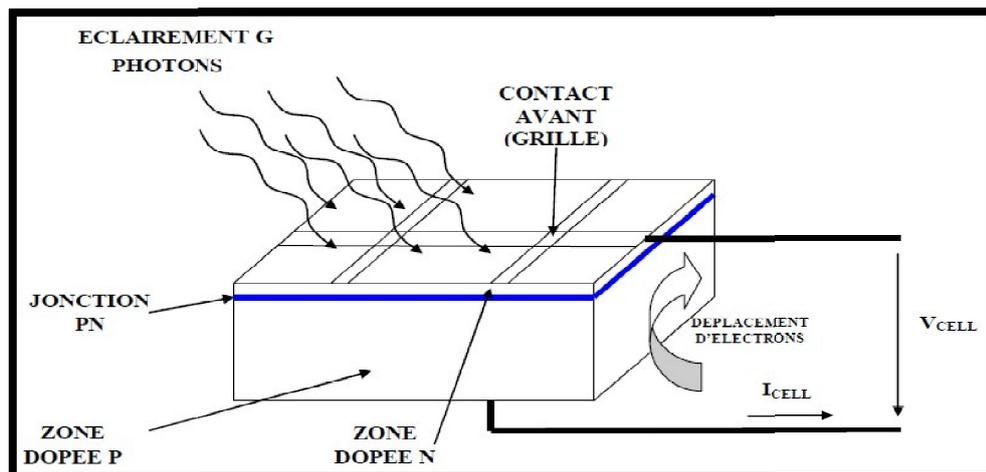


Figure (I. 4) : Coupe transversale d'une cellule PV typique.

Comparable à une diode utilisée classiquement en électronique, une cellule PV peut être réalisée à partir de deux couches de silicium, une dopée P (dopée au bore) et l'autre dopée N (dopée au phosphore). Entre les deux zones se développent une jonction PN avec une barrière de potentiel. La zone N est couverte par une grille métallique qui sert de cathode (contact avant) et surtout de collecteurs d'électrons, tandis qu'une plaque métallique (contact arrière) recouvre l'autre face du cristal et joue le rôle d'anode. [9]

Lorsque les photons sont absorbés par le semi-conducteur, ils transmettent leur énergie aux électrons par collision. Si l'énergie transmise est supérieure à celle associée à la bande interdite (E_g) du semi-conducteur, des paires électrons-trous sont alors créés dans cette zone

de déplétion par arrachement des électrons. Sous \vec{E} l'effet d'un champ électrique qui règne dans cette zone, ces porteurs libres sont drainés vers les contacts métalliques des régions P et N. Il en résulte alors un courant électrique dans la cellule PV et une différence de potentiel (de 0.6 à 0.8 Volt) supportée entre les électrodes métalliques de la cellule, communément nommée tension de circuit ouvert (V_{oc}) fortement dépendante de la température. Le courant maximal PV se produit lorsque les bornes de la cellule sont court-circuitées. On parle alors de courant de court-circuit (I_{cc}) dépendant fortement du niveau d'éclairement (E). [9]

En résumé, technologiquement, un capteur PV est proche d'une diode PN de par sa constitution, les matériaux utilisés, et les phénomènes physiques identiques mis en oeuvre. Le comportement d'une cellule PV peut donc se modéliser comme celui d'une mauvaise jonction PN autant en statique qu'en dynamique lorsque cette dernière n'est pas éclairée. Pour tenir compte du courant engendré par l'éclairement de la cellule et des différentes résistances modélisant les pertes dues à la connectique, trois termes sont ajoutés I_{cc} , R_s et R_p . Ainsi, en statique, le comportement d'une cellule PV constituée d'une jonction PN à base de silicium peut être décrit par l'équation suivante : [9]

$$I_{cell} = I_{cc} - I_{sat} \left[\exp\left(\frac{V_{cell} + I_{cell} R_s}{n V_t}\right) - 1 \right] - \frac{V_{cell} + I_{cell} R_s}{R_p} \quad (I. 1)$$

Ou $V_t = \frac{kT}{e}$

Avec :

$I_{SAT}(A)$: correspondant au courant de saturation.

$V_T(V)$: la potentielle thermodynamique.

$K (J.K^{-1})$: la constante de Boltzmann.

$T(K)$: la température effective de la cellule.

$e (C)$: la charge de l'électron.

n : un facteur de non idéalité de la jonction.

$I_{CELL}(A)$, le courant fourni par la cellule.

$V_{CELL}(V)$: la tension aux bornes de la cellule.

$I_{CC}(A)$: le courant de court-circuit de la cellule dépendant de l'ensoleillement et de la température.

$R_p(\Omega)$: la résistance shunt caractérisant les courants de fuites de la jonction.

$R_s(\Omega)$: la résistance série représentant les diverses résistances des contacts et de connexions.

I.7.2. Constitution d'un générateur photovoltaïque

La cellule photovoltaïque élémentaire constitue un générateur de très faible puissance vis-à-vis des besoins de la plupart des applications domestiques ou industrielles. Une cellule élémentaire de quelques dizaines de centimètres carrés délivre, au maximum, quelques watts sous une tension inférieure au volt (tension de jonction PN).

Pour produire plus de puissance, plusieurs cellules doivent être assemblées afin de créer un module ou un panneau photovoltaïque.

La connexion en série des cellules permet d'augmenter facilement la tension de l'ensemble, tandis que la mise en parallèle permet d'accroître le courant.

Le câblage série/parallèle est donc utilisé pour obtenir globalement un générateur PV aux caractéristiques souhaitées.

Si les cellules se connectent en série, les tensions de chaque cellule s'additionnent, augmentant la tension totale du générateur.

D'une autre part, si les cellules se connectent en parallèle, c'est l'ampérage qui augmentera.

[10]

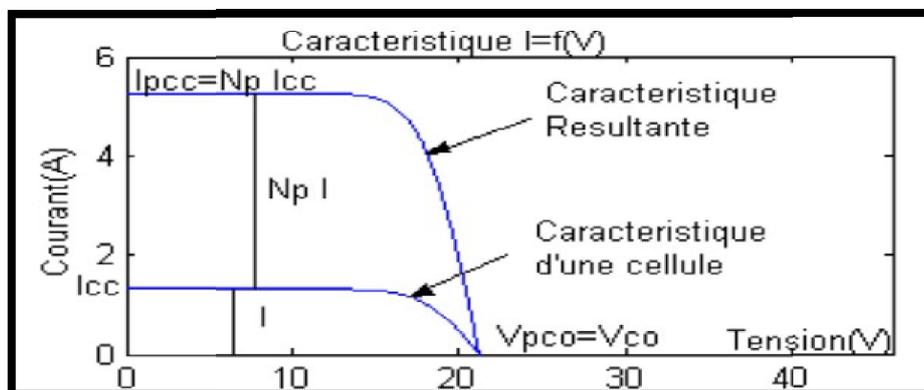


Figure (I. 5) : Associations des cellules PV en parallèle.

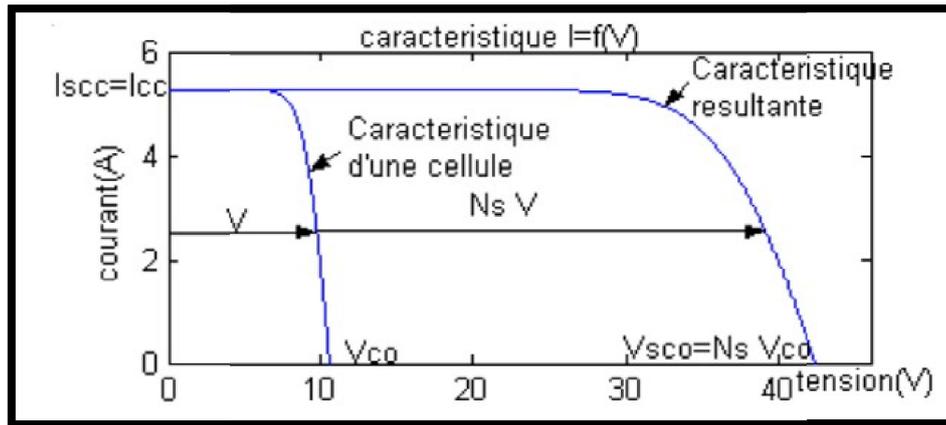


Figure (I. 6) : Association des cellules en série.

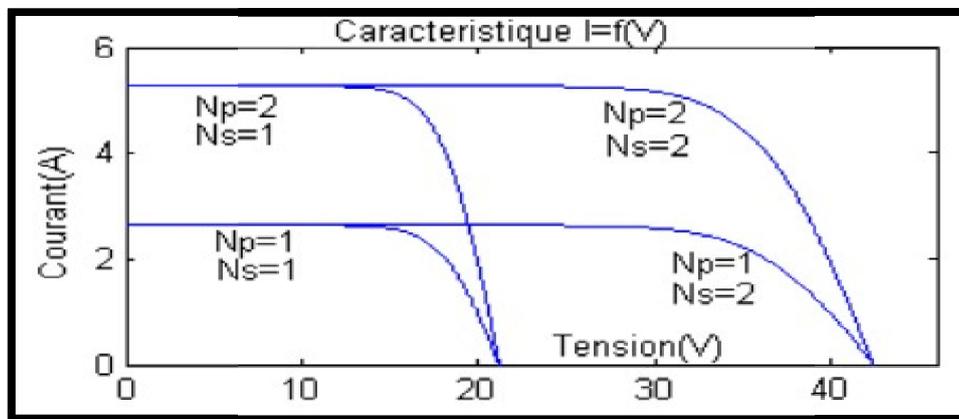


Figure (I. 7) : Connexions mixtes des modules photovoltaïques sur la caractéristique I(V).

La plupart des panneaux PV commerciaux sont constitués par des sous-réseaux de cellules connectées en série. Chacun de ces sous-réseaux est lui-même constitué d'un groupe de cellules PV connectés en série. Le nombre de cellules par sous-réseaux est le fruit d'un compromis économique entre protection et pertes d'une partie importante du GPV en cas de défaut partiel d'ombrage. [10]

Nous pouvons remarquer que comme pour une cellule, la caractéristique électrique I(V) d'un GPV est non linéaire et présente un point de puissance maximale (PPM).

Ce point a également un courant et une tension associés appelés I_{opt} et V_{opt} respectivement. Le point de fonctionnement d'un GPV est fonction de l'impédance de la charge qu'il alimente. Cette charge pourrait être une charge résistive ou un bus de tension continue (par exemple, connecté sur une batterie).

Dans le cas d'une batterie, c'est elle qui impose le point de fonctionnement du GPV lors d'une connexion directe. La figure (I.8) montre la schématique classiquement adoptée pour un GPV élémentaire. L'environnement de fonctionnement traditionnel comprend la connexion de deux diodes by-pass et d'une diode anti-retour. Les connexions physiques permettent de travailler avec ou sans les diodes en fonction des conditions souhaitées. [10]

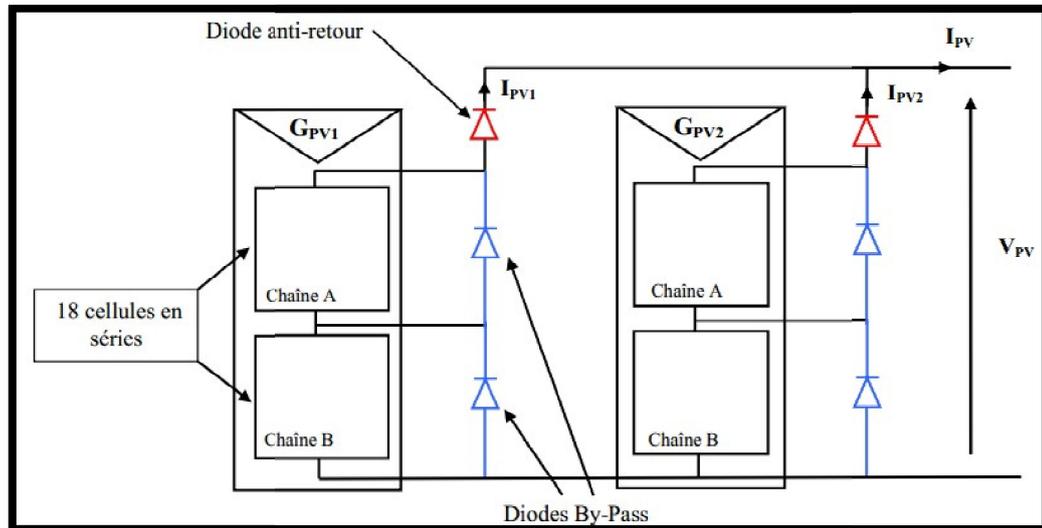


Fig. (I. 8) : Exemples d'association sécurisée de deux modules PV commerciaux en parallèles avec leurs diodes de protections.

I.8. TECHNOLOGIES DES CELLULES PHOTOVOLTAÏQUES

Les cellules photovoltaïques sont des composants optoélectroniques qui transforment directement la lumière solaire en électricité, elles sont réalisées à l'aide des matériaux semi conducteurs.

L'énergie photovoltaïque fait appel généralement à une des technologies suivantes:

- la première technologie photovoltaïque recourt aux cellules de silicium monocristallin ou poly cristallin ayant la meilleure efficacité, qui varie généralement de 13 à 18%. Durée de vie est habituellement de plus de 25 à 30 ans et pour le monocristallin l'efficacité est de 12 à 15%.
- La deuxième technologie fait appel aux cellules de silicium amorphe. L'efficacité est moindre, variant de 6 à 10%. Leur durée de vie est généralement inférieure à 20 ans.

- la troisième technologie fait appel à d'autres matériaux semi conducteurs, tels que le Tellure de Cadmium (CdTe), Cuivre Indium Sélénium (CIS) et les jonctions à base d'Arséniure de Gallium (GaAs), cette technologie des multicouches est en voie de développement car chacune d'entre elles est sensible à des photons d'énergies différentes.

Nous allons récapituler les différents types de technologie dans le tableau suivant (d'après Total énergie revue du 9 Juillet 2006). [11]

Type de	cellules Rendements des cellules (%) Domaines d'application			théorique en labo. disponible
	théorique	en labo	disponible	
Silicium monocristallin	27	24.7	14-16	modules de grandes dimensions pour toits et façades, appareils de faibles puissances, espace (satellites)
Silicium poly cristallin	27	19.8	12-14	modules de grandes dimensions pour toits et façades, générateurs de toutes tailles (reliés réseau ou sites isolés)
Silicium amorphe	25	13	6-8	appareils de faible puissance, production d'énergie embarquée (calculatrice, montre.) modules de grandes dimensions (intégration dans le bâtiment)
Arséniure de Gallium GaAs	29	27.5	18-20	systèmes de concentrateur, espace (satellites).
CIS	27.5	18.2	10-12	appareils de faibles puissances, modules de grandes dimensions (intégration dans le bâtiment)
Tellurure de Cadmium CdTe	28.5	16	9-11	modules de grandes dimensions (intégrations dans le bâtiment)

Tableau (I.1) : Rendement énergétique des différents types de cellules photovoltaïques.

I.9 CARACTERISTIQUES D'UN MODULE SOLAIRE

I.9.1 Caractéristique courant-tension I(V) [12] :

C'est une caractéristique fondamentale du module solaire, définissant cet élément comme générateur. Elle est identique à celle d'une jonction P-N avec un sens bloqué, mais décalé le long de l'axe du courant d'une quantité directement proportionnelle à l'éclairement. Elle se trace sous un éclairement fixe et une température constante figure (1.9).

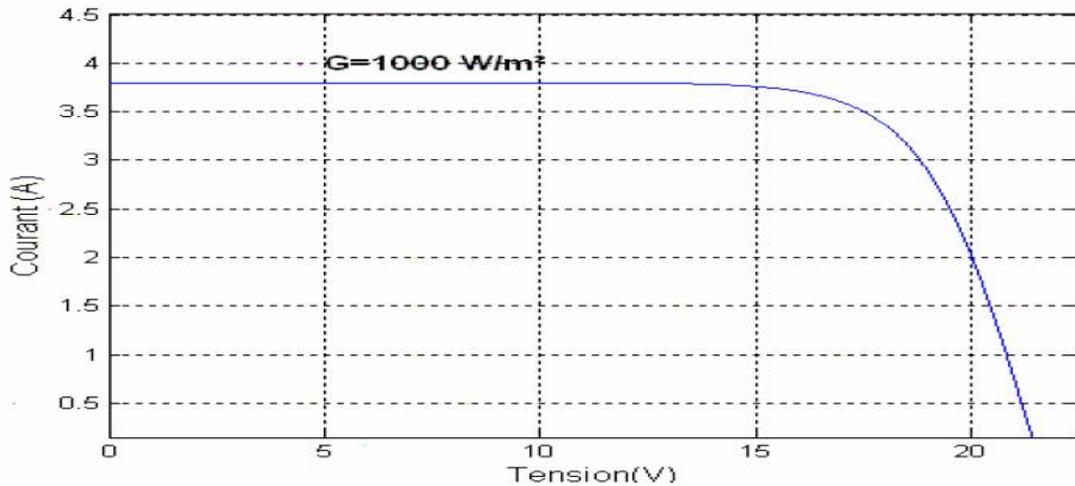


Figure (I. 9) : Caractéristiques I(V) d'un module solaire, $T=25^\circ\text{C}$ [10].

I.9.2 Caractéristique puissance-tension P(V) [12] :

La puissance débitée par le module photovoltaïque dépend du point de fonctionnement de cette dernière ; c'est le produit de l'intensité de courant et de la tension entre ses bornes figure (1.10). Le point « M » représente la puissance maximale débitée par le module.

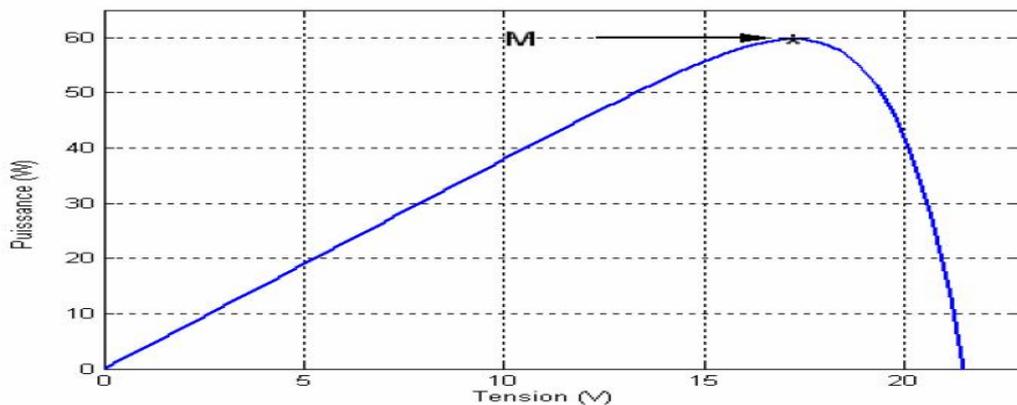


Figure (1. 10) : Caractéristiques P (V) d'un panneau solaire, $T=25^\circ\text{C}$ [10].

I.10. MODELISATION DU MODULE PHOTOVOLTAÏQUE

Une cellule photovoltaïque peut être assimilée au circuit électrique équivalent (Chin, 2011)

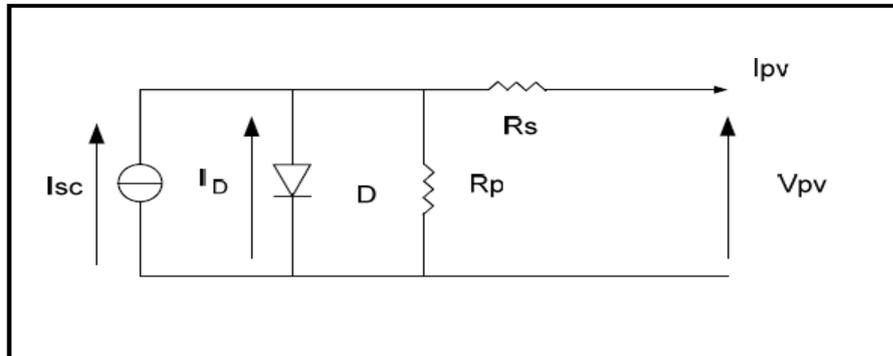


Figure (I. 11) : Modélisation du circuit électrique équivalent d'une cellule PV.

Pour modéliser la cellule, on exprime les grandeurs électriques relatives à la représentation de la cellule sous forme d'équation.

Une cellule photovoltaïque seule ne peut pas fournir suffisamment de puissance afin d'alimenter une charge ou le réseau électrique. Il convient donc d'associer ces cellules entre elles dans le but de fournir plus de puissance. Une association en série augmentera la tension de sortie du panneau solaire tandis qu'une association en parallèles augmentera le courant fournit à la charge. Il est alors nécessaire d'introduire deux nouveaux paramètres N_p et N_s représentant respectivement le nombre de cellules en parallèle et en série. L'expression de I_{pv} devient :

$$I_{pv} = N_p I_{sc} - N_p I_0 \left(e^{\frac{V_{pv} + R_s I_{pv}}{N_s V_t} + \frac{R_s I_{pv}}{N_p V_t}} - 1 \right) - \frac{V_{pv}}{R_p} I_{pv} \quad (I. 2)$$

Avec :

- * I_{sc} : Courant de court-circuit d'une cellule;
- * R_p : Résistance caractérisant les pertes par recombinaison des porteurs dues aux défauts structurales du matériau;
- * R_s : Résistance caractérisant les pertes par effets Joule dans le semi-conducteur et les pertes à travers les grilles de collectes et les mauvais contacts ohmiques de la cellule.

La quantité de rayonnement solaire affecte la production de porteurs de charge dans le module PV, et par la suite, affecte le courant généré. I_{pv} avec l'influence de la température de la cellule, peut être décrit par l'équation :

$$I_{pv} = I_{sct} - N_p I_{os} \left(e^{\frac{V_{pv} + R_s I_{pv}}{N_s + N_p} \frac{q}{V_t}} - 1 \right) - \frac{V_{pv}}{R_p} - \frac{R_s I_{pv}}{R_p} \quad (I.3)$$

Avec :

$$I_{os} = I_{or} \left(\frac{T}{T_R} \right)^3 - e^{\frac{q E_{go}}{\beta k} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_R} \right)} - 1 \quad (I.4)$$

Et :

$$I_{sct} = [I_{sc} + K_i(T - 298.15)] \frac{G}{1000} \quad (I.5)$$

T_R étant la température de référence (=298.18 K), E_{go} (=1.12 eV), la largeur de bande du silicium, β le facteur d'idéalité (=1740), I_{os} le courant de saturation inverse de la cellule, I_{or} le courant de saturation de la cellule. [13]

1.10.1. Influence du rayonnement solaire et de la température

Bien que le rendement occupe une place primordiale dans le choix des cellules, il n'est pas le seul indicateur de performance pour une cellule. En effet, la température et également le niveau d'éclairage peuvent affecter les performances du panneau. Afin de bien distinguer la modification de la valeur du courant et de la tension du panneau dû à un changement de température, on trace les courbes caractéristiques I_{pv} V_{pv} et P_{pv} V_{pv} suivantes grâce aux équations (I.3), (I.4), (I.5) et sachant également que :

$$P_{pv} = I_{pv} \cdot V_{pv} = \left[I_{sct} - N_p I_{os} \left(e^{\frac{V_{pv} + R_s I_{pv}}{N_s + N_p} \frac{q}{V_t}} - 1 \right) - \frac{V_{pv}}{R_p} - \frac{R_s I_{pv}}{R_p} \right] \cdot V_{pv} \quad (I.6)$$

On obtient alors les courbes suivantes (avec 15 modules photovoltaïques en série et 50 en parallèle) :

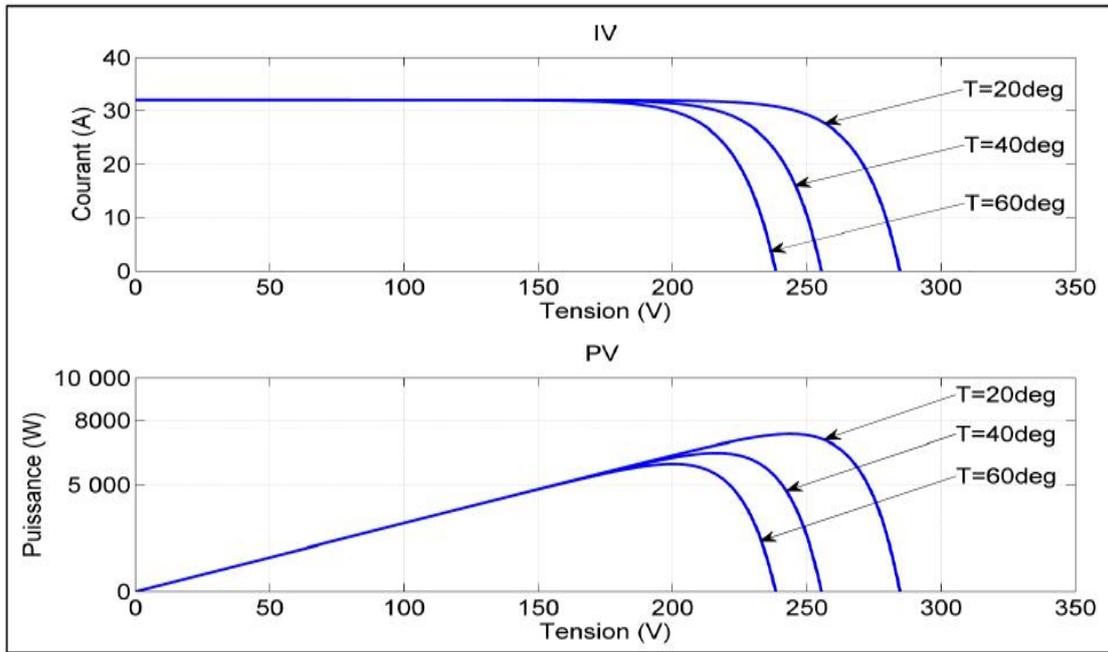


Figure (I. 12) : Courbes V-I et P-V du générateur PV avec variation de la température. [13]

On observe que pour des températures élevées, la puissance produite par le panneau diminue. Les caractéristiques du panneau en fonction de l'ensoleillement $G=600, 800$ puis 1000W/m^2 sont représentées dans la figure ci-dessous.

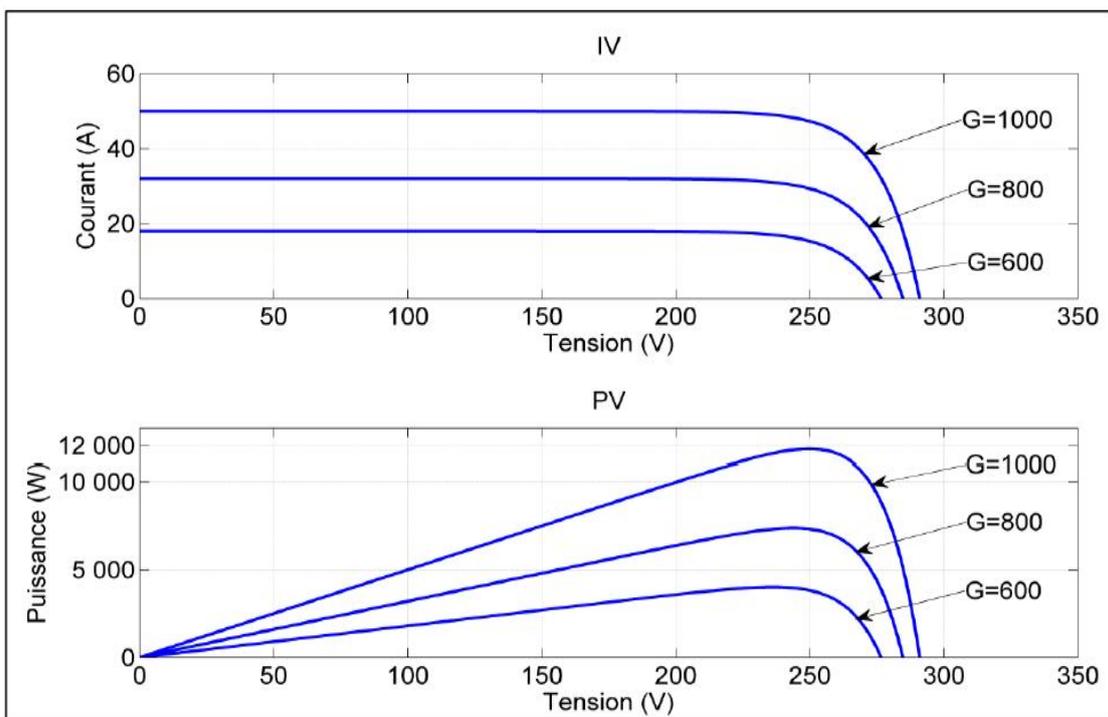


Figure (I. 13) : Courbes I-V et P-V des modules PV avec variation de l'ensoleillement. [13]

On constate que plus on augmente, l'ensoleillement, plus la puissance augmente.

On remarque que la valeur du courant de court-circuit est directement proportionnelle à l'intensité du rayonnement. Par contre la tension en circuit ouvert ne varie pas dans les mêmes conditions. [13]

1.11. PARAMETRES EXTERNES D'UNE CELLULE SOLAIRE PHOTOVOLTAÏQUE

Ces paramètres peuvent être déterminés à partir des courbes courant-tension, ou de l'équation caractéristique.

Les plus usuels sont les suivantes :

Courant de court-circuit : c'est le courant pour lequel la tension aux bornes de la cellule ou du générateur PV est nulle. Dans le cas idéal (R_s nulle et R_{sh} infinie), ce courant se confond avec le photo courant I_{ph} dans le cas contraire, en annulant la tension V dans l'équation de « I », on obtient:

$$I_{sc} = I_{ph} - I_0 \left(e^{\left(\frac{R_s \times I_{sc}}{V_t} \right)} - 1 \right) - \frac{R_s \times I_{sc}}{R_{sh}} \quad (I. 7)$$

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

$I_0 \left(\exp \left(\frac{R_s \times I_{sc}}{R_{sh}} \right) - 1 \right)$ devant I_{ph} .

L'expression approchée du courant de court-circuit est alors : $I \approx \frac{I_{ph}}{\left(1 + \frac{R_s}{R_{sh}} \right)}$

Tension de circuit ouvert : c'est la tension V_{co} pour laquelle le courant débité par

le générateur photovoltaïque est nul (c'est la tension maximale d'une photopile

ou d'un générateur photovoltaïque).

$$0 = I_{ph} - I_0 \left(e^{\left(\frac{V_{co}}{V_t} \right)} - 1 \right) - \frac{V_{co}}{R_{sh}} \quad (I. 8)$$

Dans le cas idéal, sa valeur est légèrement inférieure à : $V_{co} = V_t \ln \left(\frac{I_{ph}}{I_0} + 1 \right)$

Puissance optimale et facteur de forme : la puissance utile maximale ($P_M = V_M \times I_M$)

s'obtient en optimisant le produit courant tension.

Quant au facteur de forme FF, dit aussi facteur de courbe ou facteur de remplissage (fill factor), il est défini par :

$$\mathcal{FF} = \left(\frac{V_m \times I_m}{V_{co} \times I_{sc}} \right) \quad (\text{I. 9})$$

Ce facteur montre la déviation de la courbe courant-tension par rapport à un rectangle (de longueur V_{co} et largeur I_{sc}) qui correspond à la photopile idéale. Pour cela, on distingue deux cas :

- Si R_{sh} est infinie la dérivation mène à la résolution de l'équation non linéaire en I_M , et permet donc le calcul de V_M .
- Si R_{sh} est considérée finie, la dérivation mène à la résolution d'une équation non linéaire en V_M .

La puissance des modules photovoltaïques s'exprime en Watts-crête. Cette dernière représente la puissance que peut fournir un module lorsqu'il est fermé sur sa charge nominale (optimale), sous un éclairement (E_s) de 1000 W/m^2 , et à une température de 25°C .

I.12. PROTECTIONS CLASSIQUES D'UN GPV

Pour garantir une durée de vie importante d'une installation photovoltaïque destinée à produire de l'énergie électrique sur des années, des protections électriques doivent être ajoutées aux modules commerciaux afin d'éviter des pannes destructrices liées à l'association de cellules en séries et de panneaux en parallèles. Pour cela, deux types de protections classiques sont utilisés dans les installations actuelles (Figure I.8) :

- la diode anti-retour empêchant un courant négatif dans les GPV. Ce phénomène peut apparaître lorsque plusieurs modules sont connectés en parallèle, ou bien quand une charge en connexion directe peut basculer du mode récepteur au mode générateur, par exemple une batterie durant la nuit.

- les diodes by-pass peuvent isoler un sous-réseau de cellules lorsque l'éclairement n'est pas homogène évitant ainsi l'apparition de points chauds et la destruction des cellules mal éclairées. La mise en conduction de ces diodes affecte la caractéristique de sortie du générateur, comme illustré sur la figure (I.14), par la perte d'une partie de la production d'énergie et par la présence de deux maximums de puissance.

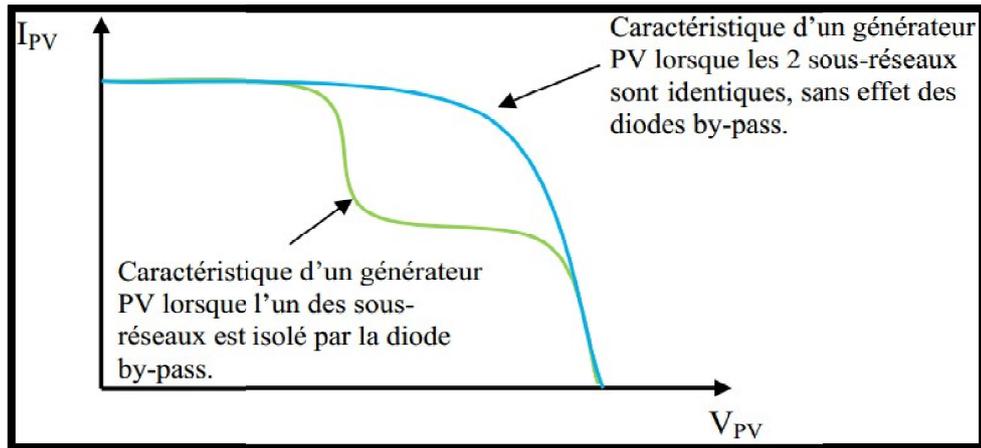


Figure (I. 14) : Effet de la diode by-pass sur la caractéristique $I=f(V)$ d'un générateur photovoltaïque.

I.13. CONNEXION DIRECTE ENTRE LA SOURCE ET LA CHARGE

Dans le cas d'une connexion directe, le point de fonctionnement du GPV dépend de l'impédance de la charge à laquelle il est connecté.

Actuellement, ce type d'application peut se résumer à un champ photovoltaïque ayant une tension V_{OPT} fixée par la tension nominale de l'application. Ce choix est principalement lié à la simplicité, la fiabilité et le faible coût de l'opération (Figure I.15). La présence de la diode anti-retour est indispensable pour empêcher la circulation d'un courant négatif vers le module PV. [9]

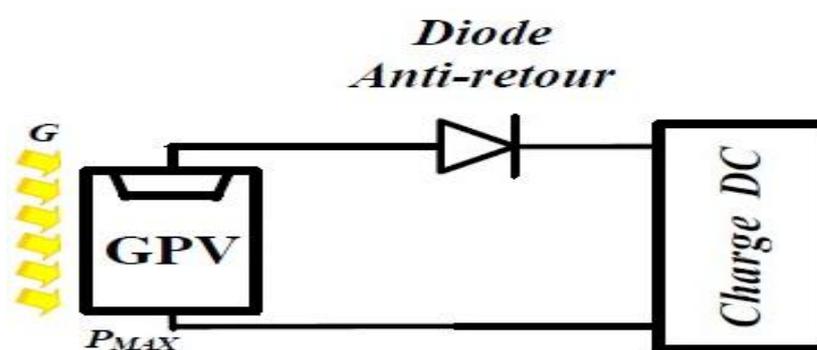


Figure (I. 15) : Principe d'une connexion directe entre un GPV et une charge.

Cependant, cette configuration n'offre aucun type de limitation et/ou de réglage de la tension de la charge. Ce qui la restreint à des applications nécessitant une tension fixe ou faiblement variable. Par exemple, le cas de batteries de stockage dans les systèmes isolés.

Néanmoins, un examen plus approfondi de ces applications montre que même dans ce cas, le transfert d'énergie électrique disponible aux bornes du GPV vers la charge dépend fortement de l'état de la batterie ayant une tension à ses bornes variant d'un pourcentage non négligeable. Plus généralement, la puissance extraite d'un GPV connectée directement à une application est souvent très éloignée du maximum de puissance que peut délivrer le GPV, comme l'illustre la figure (I.16). [9]

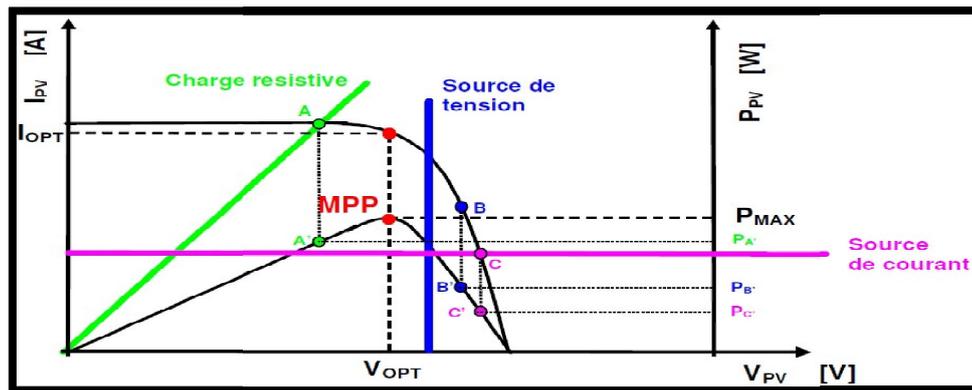


Figure (I.16) : Points de fonctionnement d'un GPV en connexion directe, en fonction de la charge.

Comme le schématise la figure (I.16), un GPV peut être connecté directement à trois types de charges :

- une charge de type source de tension continue,
- une charge de type source de courant continu,
- une charge purement résistive.

Trois points de fonctionnement A, B, C respectifs peuvent être identifiés fournissant une puissance P_A , P_B et P_C . Ces cas de figures montrent que le GPV est mal exploité et ne fournit pas la puissance maximale potentielle, la différence étant non exploitée.

D'autre part, certains types de charges ont besoin de tensions et courants alternatifs. La connexion directe n'est alors pas possible car le GPV fournit un courant continu. [9]

A travers ces exemples, on peut montrer rapidement les limites de la connexion directe autant sur les pertes de production qu'elle entraîne que sur les limites des applications compatibles (DC). Des recherches sur des solutions novatrices optimisant mieux la production d'énergie

PV sont d'actualité et même nécessaires pour amener l'énergie PV à un degré de fiabilité comparable à une source d'énergie traditionnelle.

I.14. DEFINITION DE L'ETAGE D'ADAPTATION ENTRE UNE SOURCE ET UNE CHARGE

Comme nous l'avons illustré précédemment, un GPV présente des caractéristiques $I(V)$ non linéaires avec des PPM. Ces caractéristiques dépendent entre autre du niveau d'éclairement et de la température de la cellule. De plus, selon les caractéristiques de la charge sur laquelle le GPV débite, nous pouvons trouver un très fort écart entre la puissance potentielle du générateur et celle réellement transférée à la charge en mode connexion directe.

Afin d'extraire à chaque instant le maximum de puissance disponible aux bornes du GPV et de la transférer à la charge, la technique utilisée classiquement est d'utiliser un étage d'adaptation entre le GPV et la charge comme décrit dans la figure (I.17).

Cet étage joue le rôle d'interface entre les deux éléments en assurant à travers action de contrôle permet, le transfert du maximum de puissance fournie par le générateur pour qu'elle soit la plus proche possible de P_{MAX} disponible.

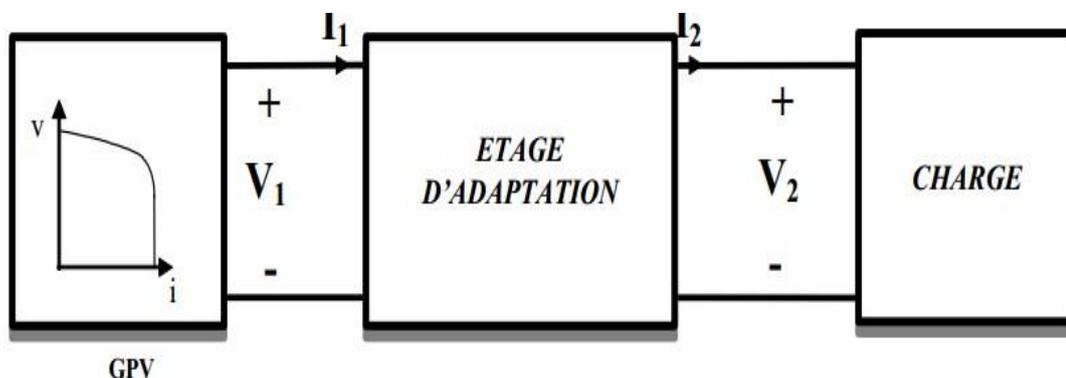


Figure (1.17) : Etage d'adaptation jouant le rôle d'interface de puissance entre un GPV et une charge pour le transfert de P_{MAX} du GPV.

Le Module Photovoltaïque Electronique (MPVE) n'est autre qu'un GPV et un étage d'adaptation avec fonction MPPT qui assure les fonctions de recherche du PPM et de protection de l'ensemble.

L'objectif final de la conception de MPVE est la réduction du prix du kWh par l'augmentation de l'énergie transmise du GPV à la charge par rapport à une connexion

classique. Un MPVE pourrait aussi se définir comme une source d'énergie d'origine PV fonctionnant en permanence à son PPM.

I.15. CONCLUSION

Dans ce chapitre on a donné des généralités sur l'énergie photovoltaïque et nous avons exposé une étude générale sur le générateur photovoltaïque (principe d'une cellule PV, constitution, modélisation du panneau et les paramètres et les caractéristiques) de plus on a donné la connexion de ce GPV avec la charge, ses avantages et ses inconvénients. Enfin, nous avons décrit les phénomènes physiques essentiels qui participent à la conversion photovoltaïque et les propriétés fondamentales qui en découlent, ainsi qu'un certain nombre de modèles du générateur photovoltaïque.

Chapitre II

Techniques de charge
d'une batterie à plomb

II.1 INTRODUCTION

Les panneaux solaires permettent de générer de la puissance le jour et cette puissance est considérée comme intermittente, car elle ne fonctionne pas la nuit, ou lorsque les conditions climatiques sont inappropriées, ou pendant la nuit.

La batterie est un périphérique de stockage qui répond à nos attentes, elle est utilisée dans de nombreux domaines. Dans ce chapitre, on expose un bref aperçu, les batteries et ses techniques de charge.

II.2 LES ACCUMULATEURS

Un accumulateur électrique est basé sur une technique de conversion réversible d'énergie, destinée à stocker l'énergie électrique dans une énergie différente afin de pouvoir la réutiliser ultérieurement. Tous les processus de conversion d'énergie sont complexes.

Le rapport entre l'énergie initiale et l'énergie restituée donne le rendement de conversion-accumulation ; ces rendements sont parfois faibles, il faut donc souvent beaucoup d'énergie initiale pour récupérer moins d'énergie finale.

Les meilleurs accumulateurs ont un rendement qui atteint très difficilement la barre des 80 % ; ceux peu nombreux qui atteignent cette valeur ne sont pas transportables, alors que c'est le domaine majeur où l'usage de l'accumulation est le plus pertinent.

II.3 CARACTERISTIQUE DE LA BATTERIE

Afin de procéder à l'étude des caractéristiques de la batterie, nous sommes inspirés des travaux réalisés par Dekkiche (2008). [13]

II.3.1 La résistance interne de l'accumulateur

La résistance peut donc être déterminée en fonction de ses composants, à savoir :

La résistance de l'électrolyte, la résistance de contact entre les électrodes et les cellules, et la résistance des matériaux propre à chacune des électrodes.

II.3.2 La tension à vide

Lorsque la batterie est totalement chargée, la tension à vide équivaut environ à la tension idéale.

II.3.3 La tension nominale

La tension nominale est un paramètre important, elle représente la tension que la batterie doit recevoir en sorte qu'elle fonctionne correctement. Cette tension diffère en fonction des différents types de batteries, puisqu'elle est déterminée par le potentiel de la réaction chimique de chaque élément du couple oxydant/réducteur utilisé. Cette tension peut avoir une valeur de 6V, 12V, 24V, 48V...

II.3.4 La tension de fin décharge

Comme son nom l'indique, cette tension correspond à la valeur de la tension une fois la batterie est complètement déchargé. Elle représente donc la valeur minimum que la tension doit avoir pour ne pas endommager la batterie.

II.3.5 La capacité

Ce paramètre correspond à l'énergie maximale que la batterie peut emmagasiner et donc fournir, elle est proportionnelle à la dimension de la batterie, elle se définit par l'équation :

$$Q = \int_{t_0}^t I b(t) dt \quad (\text{II.1})$$

Son unité de mesure est l'ampère-heure (Ah).

II.3.6 Le taux de décharge et recharge

Le taux de décharge correspond au temps que la batterie met pour se décharger dans son intégralité. Par exemple, si on a un courant de décharge de 10A et une batterie de 50Ah, le taux de décharge sera égal à 5A/h. On le notera alors C/5.

II.3.7 Profondeur de décharge

Cette caractéristique est exprimée en pourcentage, elle représente l'énergie maximale qui peut être extraite de la batterie sans pour autant endommager celle-ci, ce qui permet de retarder au maximum sa durée de vie.

II.3.8 Influence des paramètres extérieurs

La température influe sur le rendement de la batterie. Afin d'avoir un rendement optimal, la température idéal est de 25 degré.

II.3.9 Durée de vie et nombre de jour d'autonomie

Le nombre de jour d'autonomie se détermine en laissant la batterie alimenter le réseau jusqu'à sa décharge, sans la recharger. La durée de vie correspond au nombre de cycle charge/décharge la batterie peut effectuer.

II.3.10 Énergie

Elle s'exprime généralement en joule, mais peut aussi s'exprimer en watt/heure. Elle est régit par l'équation :

$$E = \int_0^t Vt(t)Ib(t)dt \quad (\text{II.2})$$

II.3.11 État de charge de l'accumulateur

L'état de charge, souvent simplifié par l'acronyme SOC (state-of-charge), est une caractéristique très importante à connaître, puisqu'elle nous renseigne, en pourcentage, sur le niveau de charge de la batterie. Être capable d'estimer l'état de charge permet d'éviter les décharges profonde ou les charges excessives qui abîmeront les batteries. Cette observation à pour objectif d'anticiper la dégradation de la batterie afin d'allonger au maximum sa durée de vie. L'état de charge peut être défini par la capacité disponible exprimée en fonction de la capacité nominale, comme le montre l'équation :

$$\text{SOC} = \left(\frac{\text{Capacité disponible (Ahr)}}{\text{Capacité nominale (Ahr)}} \right) * 100 \quad (\text{II.3})$$

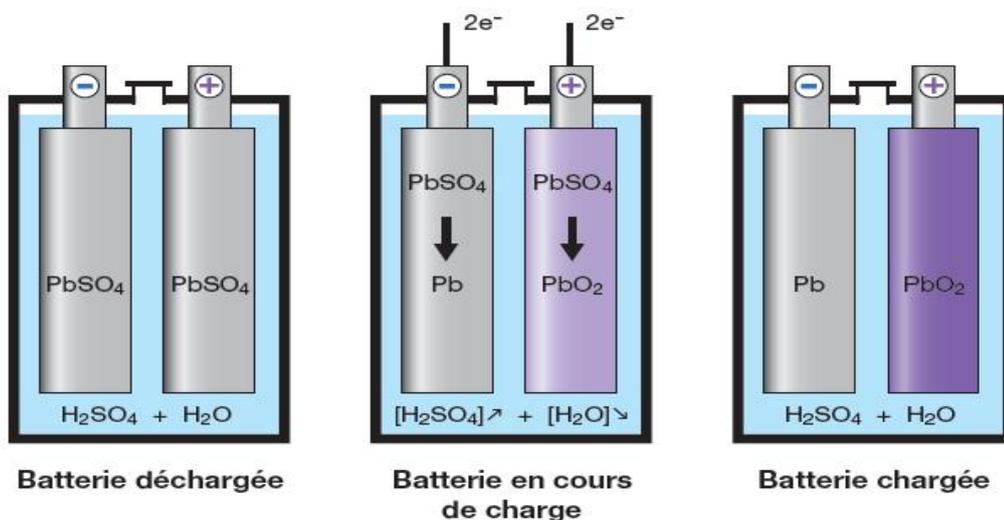


Figure (II.1) : Evolution des éléments d'une batterie en fonction de son état de charge.

II.3.12 Circuit équivalent

Le modèle de circuit équivalent le plus utilisé est le suivant:

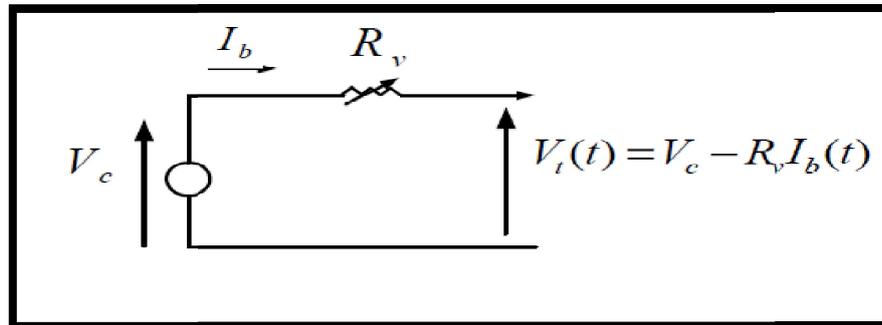


Figure (II.2): Modèle simplifié de l'accumulateur. [13]

Avec R_v la résistance variable qui s'exprime :

$$R_v = R_i + K \frac{Q}{Q - \int_0^t I_b dt} \quad (\text{II.4})$$

V_c : Source de tension idéale,

V_t : Tension aux bornes de la batterie,

R_v : Résistance interne en série.

II.4. ÉTUDE DE L'ART DES DIFFÉRENTS ACCUMULATEURS EXISTANTS

On répertorie 2 principales sortes d'accumulateurs : les primaires et les secondaires. Les primaires ont le désavantage d'avoir, au sein de la batterie, une réaction chimique irréversible, ils sont donc non rechargeable. Ces accumulateurs sont destinés aux appareils électronique et autres produits de consommation. À l'inverse, les accumulateurs secondariseront une réaction chimique réversible peuvent donc être rechargée, ils sont plus voués à une utilisation industrielle. Nous allons donc comparer les différents accumulateurs secondaires. [13]

II.5 TYPE D'ACCUMULATEURS EXISTANTS

La différence entre les accumulateurs réside dans la nature chimique utilisée dans leur couple oxydant-réducteur. En effet les plus utilisé sont :

- * l'accumulateur Ni-Cd (au nickel cadmium).
- * l'accumulateur NiMH (aux hydrures métalliques de nickel).

- * l'accumulateur Li-ion et Li-Po (aux ions de lithium et lithium polymère).
- * l'accumulateur Pb (au plomb).

De nouvelles sortes d'accumulateurs devraient voir le jour sur le marché industriel dans un avenir proche, comme l'accumulateur à base de brome (avec comme couple : sodium-brome, zinc-brome, vanadium-brome...), où l'accumulateur Li-air. Ces prototypes sont encore au stade de la recherche. Nous allons définir les différents accumulateurs :

II.5.1 Accumulateur Ni-Cd

Cet accumulateur, plus récent que celui au plomb, possède de nombreux avantages. En effet, il a la capacité de réaliser un grand nombre de cycle de charge/décharge, sa résistance interne très faible, ce qui minimise les pertes de puissances, son stockage est simple, adapté à différents niveau de charge, et sa charge est très rapide (60% de la capacité de charge totale en 20 minutes).

Ces avantages technologiques par rapport aux batteries de plomb se répercutent fatalement sur le coût du produit, qui est 3 fois supérieur à ce dernier. Aussi le caractère polluant du cadmium est un inconvénient de taille pour ce modèle. Il possède également une faible densité énergétique et se décharge assez rapidement, et est sensible à l'effet mémoire. Les caractéristiques de cette batterie son résumé dans le tableau (Larminie, 2006) :

Durée de vie (année)	2-3
Nombre de cycle de vie	1200
Rendement charge/décharge (%)	70-90
Autodécharge (% par mois)	15
Tension nominale par élément (V)	1,2
Résistance interne (Ohm)	Environ 0.06 par cellule de 1Ah
Température en fonctionnement (°C)	-40 à +80
Énergie massique (Wh/kg)	45-80
Énergie volumique (Wh/l)	80-150
Temps de charge (h)	1

Tableau (II.1) : Caractéristiques de l'accumulateur Ni-Cd.

II.5.2 Accumulateur NiMH

Cet accumulateur, contrairement aux deux précédents, n'est pas polluant (absence de cadmium et de plomb). Il peut emmagasiner plus d'énergie que le Ni-Cd et est peu sensible à l'effet mémoire. Il a dans sa globalité de meilleures performances que le Ni-Cd, même si son autodécharge est plus handicapante et sa durée de vie plus courte en nombre de cycle. Il détecte difficilement la fin de charge et ne supporte pas le dépassement de charge.

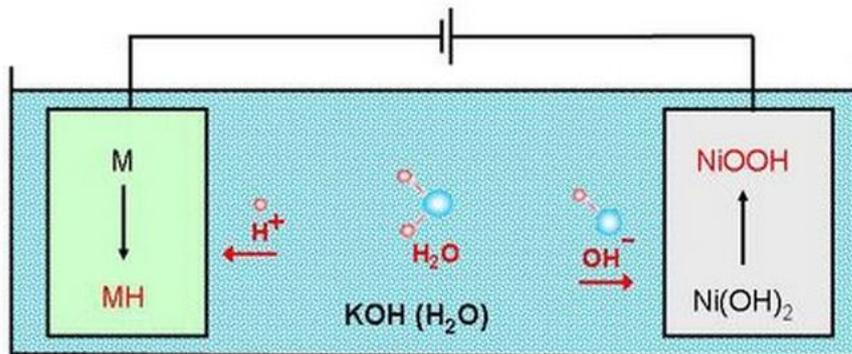


Figure (II.3): Schéma d'un accumulateur Ni-MH pendant la charge électrochimique

Les caractéristiques de cette batterie sont résumées dans le tableau (Larminie, 2006) :

Durée de vie (année)	2-4
Nombre de cycle de vie	1000
Rendement charge/décharge (%)	66
Autodécharge (% par mois)	20
Tension nominale par élément (V)	1,2
Résistance interne (Ohm)	Environ 0.06 par cellule de 1Ah
Température en fonctionnement (°C)	Ambiante
Énergie massique (Wh/kg)	60-110
Énergie volumique (Wh/l)	220-330
Temps de charge (h)	1

Tableau (II.2) : Caractéristiques de l'accumulateur NiMH.

II.5.3 Accumulateur Li-ion

Il ne présente aucun effet mémoire et une faible autodécharge. Bien qu'il ne nécessite pas de maintenance, sa durée de vie est faible. Paradoxalement, il possède un nombre correct de cycle de vie. Cela veut dire que ce modèle s'use même si il n'est pas utilisé (vieillessement,

usure, corrosion...). Des efforts pour pallier ce manque de durée de vie sont en train d'être réalisés, notamment en changeant la structure de l'électrode. L'amélioration des performances de ce modèle est en plein essor.

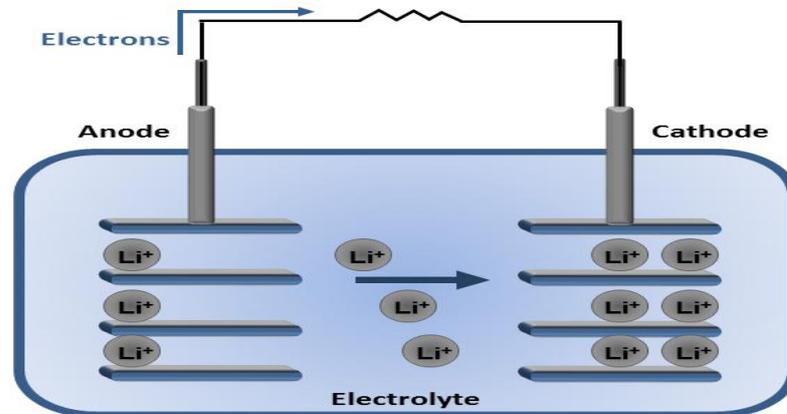


Figure (II.4): Comment une batterie au lithium-Ion produit de l'électricité.

Son avantage primordial est sa haute densité d'énergie (grand potentiel électrochimique). Le lithium est un métal très léger, son poids est également un avantage.

La principale faiblesse de ce modèle réside dans son aspect sécuritaire: la surchauffe peut entraîner l'explosion. Pour assurer la sécurité, la batterie doit être munie d'un système de protection. L'autre moyen développé est de modifier le couple, en utilisant un accumulateur Li-Polymère, mais malgré son avantage sécuritaire, cet accumulateur n'est pas suffisamment compétitif (puissance massique et nombre de cycle charge/décharge trop faible). Les caractéristiques de la batterie Li-Ion sont résumées dans le tableau (Larminie, 2006) :

Durée de vie (année)	7
Nombre de cycle de vie	1000
Rendement charge/décharge (%)	90
Autodécharge (% par mois)	2
Tension nominale par élément (V)	3,6
Résistance interne (Ohm)	Très faible
Température en fonctionnement (°C)	Ambiante
Énergie massique (Wh/kg)	90-180
Énergie volumique (Wh/l)	220-400
Temps de charge (h)	2-3

Tableau (II.3) : Caractéristiques de l'accumulateur Li-Ion

II.5.4 ACCUMULATEUR AU PLOMB

Le premier accumulateur secondaire est inventé en 1859 par Gustave Planté confère à l'homme une bonne maîtrise de cette technologie. Peu coûteuse, elle est souvent utilisée, notamment pour les systèmes automobiles fonctionnant à des températures ambiantes et elle n'est pas sensible à l'effet mémoire. Néanmoins, cette technologie est assez polluante, le nombre de cycle est assez bas (500 environ) et son énergie est limitée, en témoigne ce tableau récapitulatif (Larminie, 2006). Cette batterie est adoptée dans ce mémoire.

Durée de vie (année)	4-5
Nombre de cycle de vie	800
Rendement charge/décharge (%)	50
Autodécharge (%)	5
Tension nominale par élément (V)	2,1
Résistance interne (Ohm)	Très faible
Température en fonctionnement (°C)	Ambiante
Énergie massique (Wh/kg)	30-50
Énergie volumique (Wh/l)	75-120
Temps de charge (h)	8

Tableau (II. 4) : Caractéristiques de l'accumulateur au plomb.

II.5.4.1 Constitution

Une batterie au plomb acide est un ensemble d'éléments de 2 volts connectés en série pour obtenir la tension d'utilisation désirée. Ces éléments sont constitués de plaques positives et négatives, assemblées en alternance, ces plaques sont recouvertes de matières actives - bioxyde de plomb pour la positive et plomb spongieux pour la négative. Ces électrodes plongent dans une solution d'acide sulfurique, la quantité de matières formées donne une capacité plus ou moins grande.

Le nombre de plaques de chaque polarité, leur surface, ainsi que la quantité d'acide disponible dans l'électrolyte (composé chimique liquide ou gélifié dont le rôle est de fournir les ions sulfates nécessaires aux réactions d'oxydoréduction produites lors des recharges et décharges d'une batterie) sont des paramètres qui définissent la capacité de l'élément (aptitude pour une batterie chargée de restituer un certain nombre d'ampères heure, en régime de courant de décharge constant, sous une tension d'arrêt et une température définies).[14]

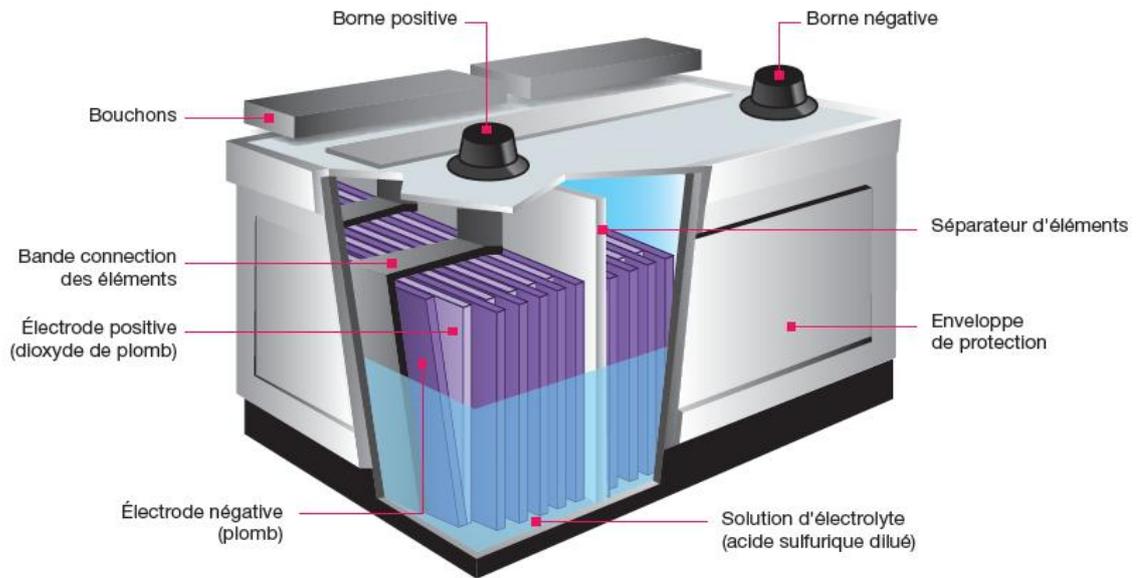


Figure (II.5) : Schéma générale d'une batterie. [15]

II.5.4.2 Technologie

Il existe quatre gammes de batteries stationnaires au plomb. Elles se différencient par le type de construction de l'électrode positive. Il s'agit en particulier des éléments à plaques positives :

- A grande surface : la masse active a la même composition que le matériau porteur, grâce à la surface lamellée de la plaque, la surface est multipliée de 8 à 12 fois % à celle de la plaque de Pb lisse, la plaque à grande surface a un bon comportement à courant élevé.
- La tubulaire : la masse active se trouve entre la tige et le petit tuyau. Les plaques tubulaires sont appropriées aux décharges de plusieurs cuves et ce, grâce à l'optimisation de la masse active.
- A tige : elles se composent de tiges de plomb disposées verticalement enfilées dans des pochettes. La masse active se trouve dans l'espace entre la tige de plomb et la pochette. La plaque à tige est une version améliorée de la plaque tubulaire. Elle a les avantages de la plaque tubulaire et de la grande surface.
- A grilles : elles sont constituées d'une grille de plomb, dans laquelle est empâtée la masse active.

Dans les quatre cas, l'électrode négative est toujours une plaque à grille. La matière active des électrodes négatives est du fer pulvérulent réoxydé superficiellement, soit de la magnétite Fe_3O_4 , cette dernière est mélangée à environ 3 % d'oxyde mercurique qui par

réduction lors de la première charge, donne du mercure. Celui-ci ne pouvant se rassembler en gouttelettes forme un véritable réseau conducteur au sein de la masse de l'électrode.

Les plaques positives sont des plaques planes à pochettes ou des plaques frittées. Les premières sont identiques aux plaques positives mais -armes d'oxydes de fer et de mercure. Les plaques frittées sont constituées d'un mélange de poudre très fines de magnétite Fe_3O_5 et de cuivre. Ce mélange est étendu en une couche de quelques mm d'épaisseur sur un grillage métallique à mailles fines tendu sur un cadre d'acier, puis l'ensemble est comprimé à forte pression. Sous l'effet de cette compression, les cristaux microscopiques de cuivre, de forme dendritique ou arborescente s'enchevêtrent avec la poudre de magnétite et donne un solide cohérent. La plaque est ensuite soumise à un traitement thermique à $600\text{ }^\circ\text{C}$ sous atmosphère réductrice d'hydrogène aboutissant au frittage du réseau du cuivre, ce qui améliore la résistance mécanique et la conductivité de la plaque.[14]

II.5.4.3 Principe de fonctionnement

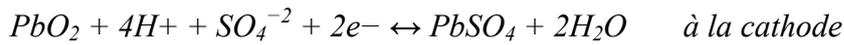
L'énergie est stockée dans l'accumulateur : il y a transfert de matière d'une électrode à l'autre suivant qu'il s'agit de la charge ou de la décharge de l'accumulateur. Ces accumulateurs exploitant une oxydoréduction du plomb sont constitués de deux électrodes, qui plongent dans un électrolyte acide qui réalise la conduction ionique entre elles et participe à la réaction. Chacune des électrodes est constituée d'un élément apparaissant sous sa forme réduite et sous sa forme oxydée : l'électrolyse de l'eau (décomposition, du fait du courant électrique, de l'eau en hydrogène et oxygène). Il est donc nécessaire de prolonger la charge (surcharge) afin que les bulles de gaz formées homogénéisent parfaitement la densité de l'électrolyte.

- Cathode forme oxydée PbO_2 et forme réduite $PbSO_4$
- Anode forme oxydée $PbSO_4$ et forme réduite Pb

Il se produit au cours de la décharge, une oxydation à l'anode et une réduction à la cathode. Ces deux réactions sont inversées lors de la recharge.

Les réactions d'oxydoréduction entre les deux couples redox en jeu pour une dissociation totale sont:





PbO_2 est donc l'électrode positive (pôle +) et Pb l'électrode négative (pôle -), tant en charge qu'en décharge.

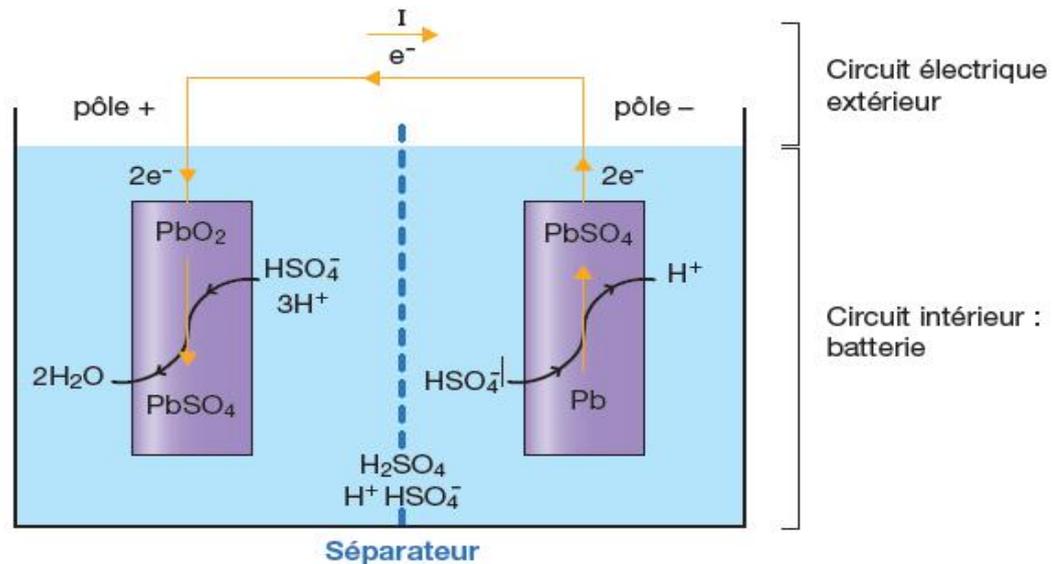


Figure (II. 6) : Réaction chimique à chaque borne lors de décharge. [15]

II.5.4.4 Différents types d'accumulateurs au plomb

Il existe actuellement deux types de batteries d'accumulateurs au plomb : [15]

- les batteries au plomb ouvertes avec électrolyte liquide,
- les batteries au plomb étanches à recombinaison de gaz.

II.5.4.4.1 Batteries au plomb ouvertes avec électrolyte liquide

- Lors de la décharge, la batterie fournit de l'énergie, l'acide pénétrant dans les plaques qui se transforment en sulfate de plomb, le taux d'acide et le niveau d'électrolyte diminuent.
- Lors de la charge, les plaques retrouvent leur composition initiale, le niveau de l'électrolyte augmentent et les composants acides se frayant un chemin dans tout l'électrolyte. L'acide étant plus lourd que l'eau, il se concentre en partie basse de l'élément. Pour une utilisation optimale des composants actifs, la densité de l'électrolyte doit être homogène sur toute la hauteur de la plaque. Pour ce faire, les processus de charge conventionnels font suivre la pleine charge d'une

surcharge définie. Cette surcharge provoque un fort dégagement gazeux qui permet d'homogénéiser l'électrolyte par brassage dans tout le volume de la batterie.

Ce brassage est obtenu à l'aide du dégagement d'hydrogène et d'oxygène (électrolyse de l'eau). Cela entraîne une durée de charge plus longue et un dégagement de chaleur accru.

II.5.4.4.2 Batteries au plomb étanches à recombinaison de gaz

Avantage principal de ces types de batteries est leur faible entretien lié à l'absence de mise à niveau de l'électrolyte, au faible taux de dégazage et à la facilité de transport. Dans ce type de batterie, l'hydrogène et l'oxygène se recombinent pour former de l'eau. Le taux de recombinaison varie entre 95 et 99 %.

a) La batterie sans entretien avec électrolyte gel

Le fonctionnement de cette batterie est identique à la batterie classique mais l'électrolyte liquide est remplacé par du gel. [Électrolyte est figé par addition de gel de silice et l'acide ne descend pas au fond de la batterie. La recombinaison fait qu'il n'y a pas nécessité de surcharge pour mélanger l'électrolyte (dégagement gazeux faible, peu de consommation d'eau, pas d'échauffement et donc moins d'entretien).

Des fissures se créent lors de premiers cycles au travers de l'électrolyte gélifié entre les électrodes positives et négatives. Ceci facilite la recombinaison en favorisant le transport des gaz. La résistance interne de ce type de batterie est relativement élevée, elle ne supporte donc pas des vitesses de charge et de décharge élevées. En revanche, les batteries « gel » sont bien adaptées pour les décharges profondes.

b) La batterie AGM étanche

AGM est l'abréviation d'Absorbent Glass Mat. Dans ces batteries, l'électrolyte est immobilisé dans des tissus en fibre de verre (borosilicate) placés entre les électrodes. Ainsi, la production de gaz est largement réduite. Le processus de recombinaison des gaz consiste à diffuser des molécules d'oxygène à travers les tissus séparateurs des électrodes positives aux électrodes négatives pour y former de l'eau. Dans une batterie AGM, les porteurs de charge se déplacent plus facilement entre les plaques que dans une batterie « gel ».

Les batteries AGM sont complètement étanches. Elles sont plus aptes à fournir des courants très élevés pendant de courtes durées (démarrage) que les batteries « gel ».

II.6. MODELISATION DE LA BATTERIE

Les phénomènes électrochimiques complexes intervenant dans une batterie rendent leur modélisation délicate. Le schéma électrique équivalent retenu ici est présenté par la figure (II.7). Il est composé d'une force électromotrice E_B , c'est une caractéristique du couple électrochimique employé (selon le type de batterie), et R_B représente l'impédance interne des cellules qui sont liées à l'état de charge et du vieillissement de la cellule. La tension aux bornes de la cellule d'une batterie s'exprime par :

$$V_B (SoC, I_B) = E_B(SoC) - R_B(SoC, sign(I_B))I_B \quad (II.5)$$

Avec :

$$R_B (SoC, sign(I_B)) = \begin{cases} R_B \text{ Charge}(SoC) & \text{si } I_B \leq 0 \text{ (Résistance en charge)} \\ R_B \text{ Décharge}(SoC) & \text{si } I_B \geq 0 \text{ (Résistance en décharge)} \end{cases} \quad (II.6)$$

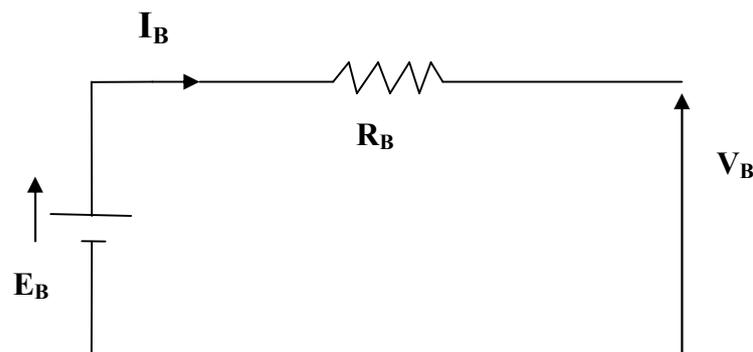


Figure (II.7): Le schéma électrique équivalent de la batterie.

II.7. CONCEPTION D'UN REGULATEUR DE CHARGE

Dans une installation photovoltaïque autonome, le régulateur de charge est généralement monté soit en série, soit en parallèle « shunt ». [16]

II.7.1. Régulateur shunt

La figure (II.8) montre une structure shunt d'un régulateur solaire, le régulateur shunt contrôle la charge de la batterie en court-circuitant le module photovoltaïque sans aucun risque.

Tous les régulateurs shunt exigent la présence d'une diode anti-retour en série entre la batterie et l'élément shunt afin d'empêcher le court-circuit de la batterie et d'empêcher un retour du courant vers le module PV.

Typiquement le régulateur shunt peut fonctionner selon deux techniques de contrôle:

1. La première technique est une simple interruption «on/off» «*shunt interrupting design*», quand la tension V_{bat} atteint la tension de régulation V_R , le régulateur déconnecte complètement la batterie du panneau photovoltaïque, puis il la reconnecte si sa tension diminue à la valeur V_{ARV} (*Array reconnect voltage*). Cette opération continue de cette manière jusqu'à ce que la batterie s'approche de la pleine charge.
2. La deuxième méthode «*shunt linear design*»; si la tension V_{bat} atteint la valeur V_R , l'élément shunt interrompe le courant de charge d'une manière linéaire, afin de maintenir la tension V_{bat} à une tension fixe.

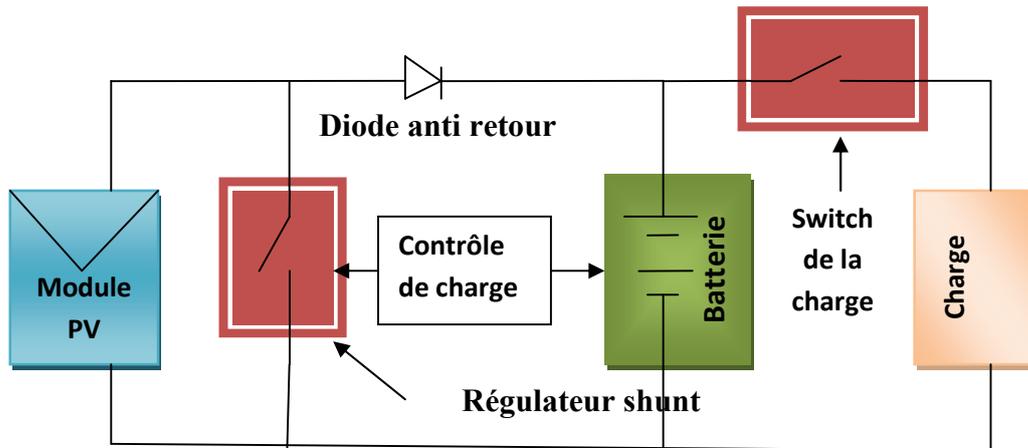


Figure (II.8): Conception d'un régulateur shunt.

II.7.2. Régulateur série

Comme son nom l'indique, ce type fonctionne en série entre le générateur photovoltaïque et la batterie. La figure (II.9) montre une structure électrique typique d'un contrôleur série.

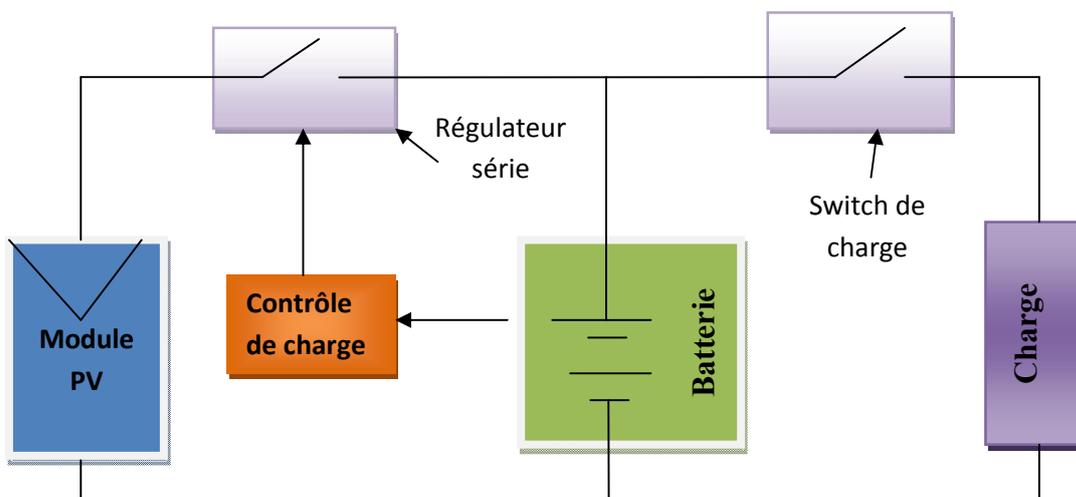


Figure (II.9): Conception d'un régulateur série.

Le régulateur série peut fonctionner selon plusieurs méthodes soit:

1. Par une interruption série «Series- Interrupting-Design» où le régulateur déconnecte complètement la batterie du panneau photovoltaïque si sa tension atteint la tension de régulateur V_R , puis il la reconnecte si sa tension diminue à la valeur V_{ARV} .
2. Par limitation linéaire du courant de charge «Séries-Linear -Design» afin de maintenir la tension de la batterie à la valeur V_R . [17]. [16]
3. Par une technique PWM «séries -Interrupting, PWM Design». Cette technique est caractérisé par la présence d'un élément de puissance entre le panneau photovoltaïque et la batterie, cet élément de puissance s'ouvre et se referme par un signal de commande « PWM » d'une fréquence constante et d'un rapport cyclique variable. Cette technique de commande hache le courant généré par le panneau photovoltaïque en impulsions afin de réguler la quantité de la charge dans la batterie. Si la tension de la batterie augmente, la largeur d'impulsion diminue, et le courant de charge diminue également.

II.8 TECHNIQUE DE CHARGE D'UNE BATTERIE AU PLOMB

II.8.1 Choix de l'algorithme de charge

Avant de procéder à la charge d'une batterie, il est nécessaire de préciser son type, la façon de sa décharge, le temps nécessaire pour sa charge, sa température extrême de fonctionnement et sa tension nominale. [16]

En pratique, on trouve plusieurs méthodes pour charger les batteries au plomb; les plus courantes sont:

=> Charge à tension constante.

=> Charge à courant constant

a) Charge à tension constante :

Par cette méthode, le régulateur contrôle le courant de charge de telle sorte que la tension de la batterie soit maintenue à un niveau de régulation V_R . Au début, la batterie se charge par un courant de valeur acceptable 'généralement le maximum de courant' ensuite, il diminue graduellement afin de maintenir la tension constante aux bornes de la batterie. [16][18]

b) Charge à courant constant :

Dans ce cas, le régulateur fonctionne comme un interrupteur on/off, il contrôle la tension de la batterie, jusqu'à ce qu'elle atteigne une valeur prédéterminée VR (voltage régulation) où il interrompt le courant de charge. Le module PV demeure déconnecter de la batterie jusqu'à où la tension de cette dernière diminue à une valeur ARV(Array Reconnect Voltage) et le courant de charge se rétablit. Ainsi la tension de la batterie bascule entre ces deux seuils.

Cette méthode est caractérisée par une rapidité de charge avec une difficulté de charger complètement la batterie surtout dans le cas où le banc batterie est très petit par rapport à la taille du générateur photovoltaïque. [16][18]

II.8.2. Algorithme de trois phases

La charge d'une batterie solaire est très importante afin qu'elle puisse fournir le maximum de capacité, tout au long de sa durée de vie. De ce fait, il faut utiliser un chargeur dit intelligent c'est à dire programmé pour au moins les trois principales phases de charge:

bulk, absorption, et float.

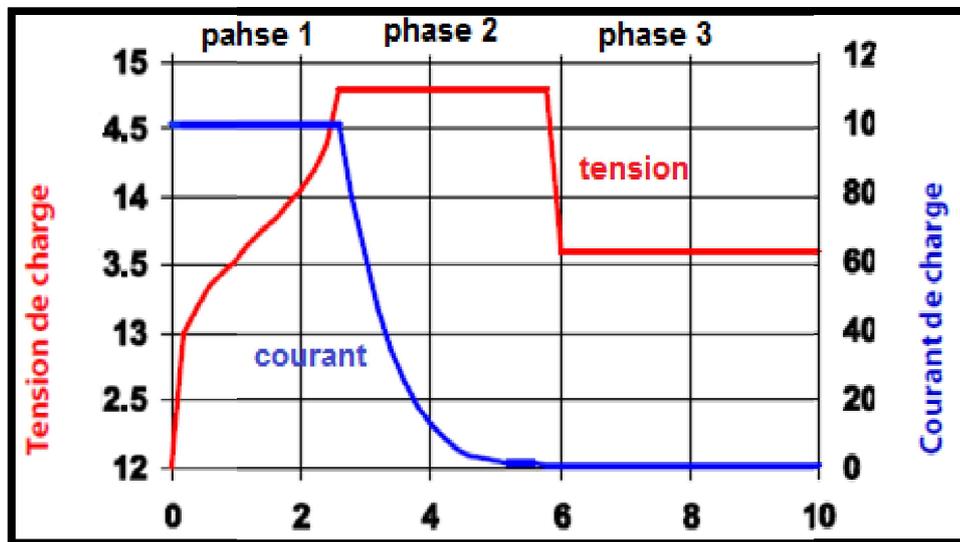


Figure (II. 10) : Les trois phases pour les batteries.

La recharge idéale se compose de 3 phases qui se suivent automatiquement.

II.8.2.1. Charge à courant constant (Bulk Phase)

C'est ici que se fait la plus grosse partie de la charge. Le chargeur va envoyer un courant constant à la batterie. Ce courant sera entre 10 et 33% de la capacité de la batterie. Par exemple, une batterie de 100 Ah sera chargée avec un courant compris entre 10 et 33 Ampères. Ce courant de charge va faire grimper progressivement la tension aux bornes de la batterie. Lorsque cette tension atteint 14,4 à 14,6V, la batterie est chargée approximativement à 75% de sa capacité maximum. À cet instant, la charge à courant constant s'arrête et le chargeur passe à la phase 2.

II.8.2.2. Charge à tension constante (Acceptance Phase)

Les 25% restants seront fournis par le chargeur à une tension constante de 14,4 à 14,6V. Pendant cette phase de remplissage, le courant va progressivement diminuer. Lorsque le courant ne sera plus que 2% de la capacité de la batterie, on peut considérer que la batterie est chargée à sa capacité maximale. Lorsque le courant de charge n'est plus que de 2 Ampères, une batterie de 100 Ah est chargée à 100%. À partir de là, le chargeur bascule vers la phase 3.

II.8.2.3. Maintien à tension constante (Float Phase)

Après avoir rechargé à courant constant et consolidé à tension constante, le chargeur diminue la tension jusqu'à 13,3 à 13,4V. Cette valeur est une tension de maintien, pas une tension de recharge. En appliquant 13,3 à 13,4V en permanence sur la batterie, on la maintient en pleine charge sans dommage aucun.

Le graphique ci-dessous illustre ces 3 phases pour les batteries AGM, Gel et Acide-Plomb (Flooded).

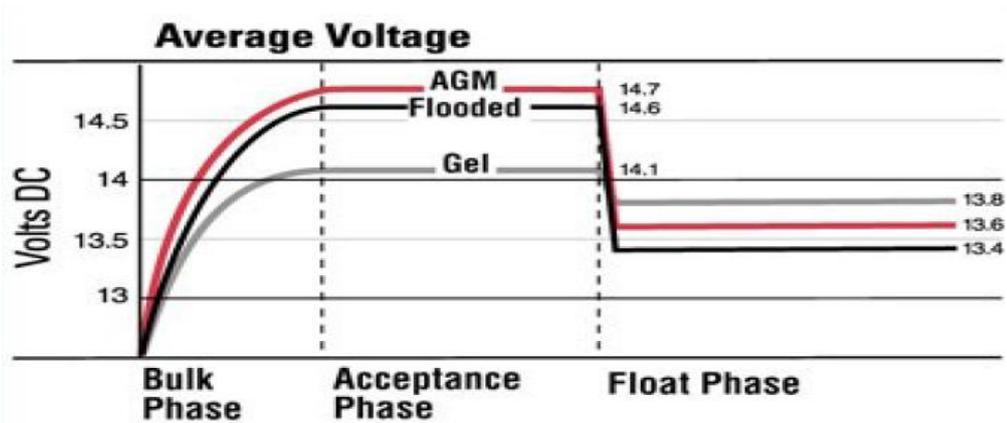


Figure (II.11): Les 3 phases pour les batteries AGM, Gel et Acide-Plomb (Flooded).

II.9. ALGORITHME DE CHARGE ADOPTE

Dans le présent travail, une charge d'une batterie à plomb étanche (12V, 7Ah). Par un régulateur série (hacheur abaisseur) à 2 phases et choisie charge à courant constant et charge à tension constante

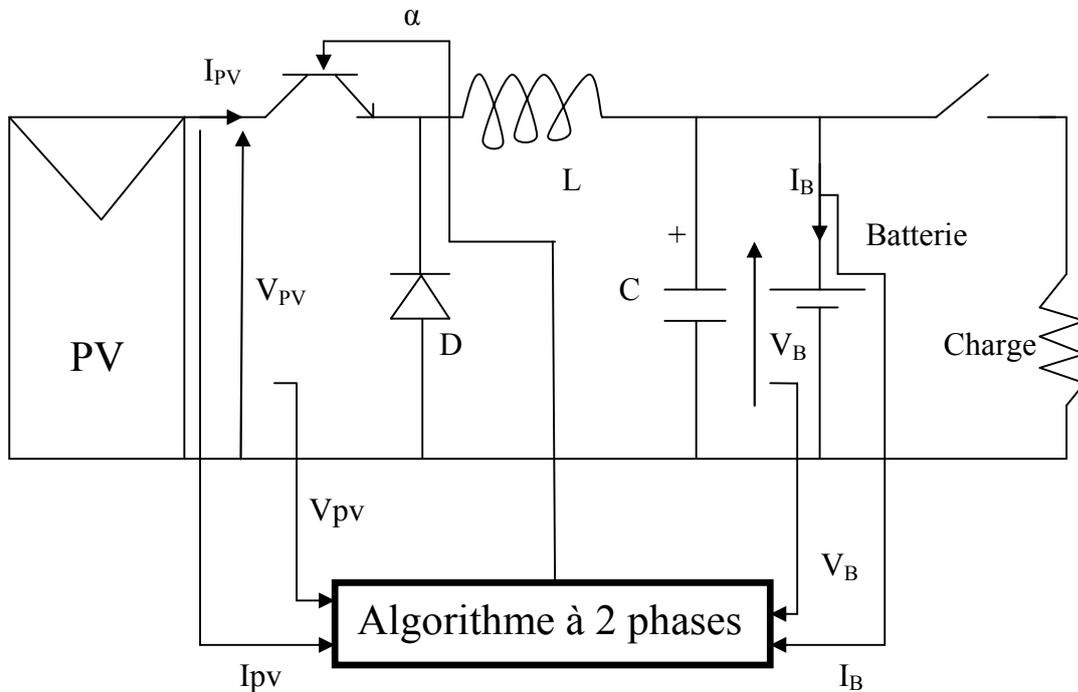


Figure (II.12) : Schéma d'algorithme de charge adopte.

II.9.1 Charge à courant constant

Pour cette première phase la charge à courant constant est obtenue par un algorithme MPPT par conductance incrémentale de l'hacheur sérié.

II.9.1.1. Description des commandes MPPT

De nombreuses méthodes de poursuite de point de puissance maximale (MPPT) ont été développées pour permettre au système d'extraire le maximum de puissance du générateur photovoltaïque. Le principe de ces méthodes est de déplacer le point de fonctionnement en augmentant V_{PV} , lorsque dP_{PV}/dV_{PV} est positif ou en diminuant V_{PV} , lorsque dP_{PV}/dV_{PV} est négatif. Lors du régime transitoire ou permanent, ces commandes doivent estimer et comparer la puissance avec celle de l'instant précédent. Les performances de celles-ci sont liées à la rapidité avec laquelle le point MPP est atteint, à la manière d'osciller autour de ce même point, mais aussi à la robustesse pour éviter une divergence lors de changements brutaux d'ensoleillement ou de charge. Parmi les techniques, on a :

II.9.1.2 Méthode d'incrémentation de la conductance

L'algorithme d'incrémentation de la conductance est basé sur le fait que le point de puissance maximale (MPP) n'est atteint que lorsque la conductance incrémentale $\frac{di}{dv}$ est égale en valeur absolue à la conductance statique $\frac{i}{v}$. Ce la mène aux équations suivantes:

$$\frac{di}{dv} + \frac{i}{v} = 0 \text{ pour } V = V_{mp} \quad \text{II.7}$$

$$\frac{di}{dv} + \frac{i}{v} > 0 \text{ pour } V < V_{mp} \quad \text{II.8}$$

$$\frac{di}{dv} + \frac{i}{v} < 0 \text{ pour } V > V_{mp} \quad \text{II.9}$$

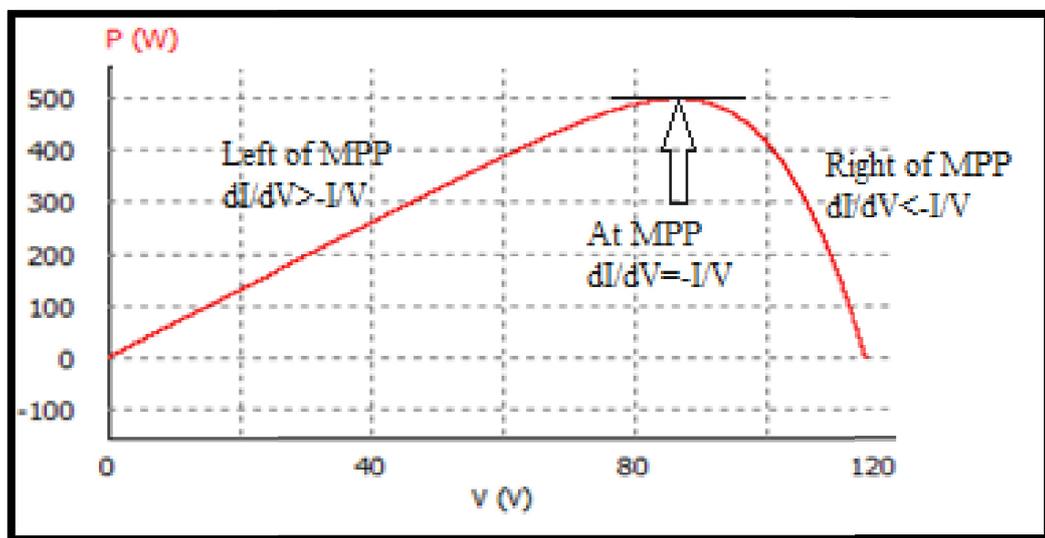


Figure (II.13) : Idée de base de conductance incrémentale.

Comme le montre l'organigramme de figure II.13, si on est gauche de point(MPP), on doit augmenter V (augmenter α), et si le point est à droite, on diminuer V (diminuer α) pour s'approche du point optimum avec un pas $\Delta\alpha$. Au point optimum, le courant I_{pv} , est constant et par conséquent, le courant de la batterie sera constant.

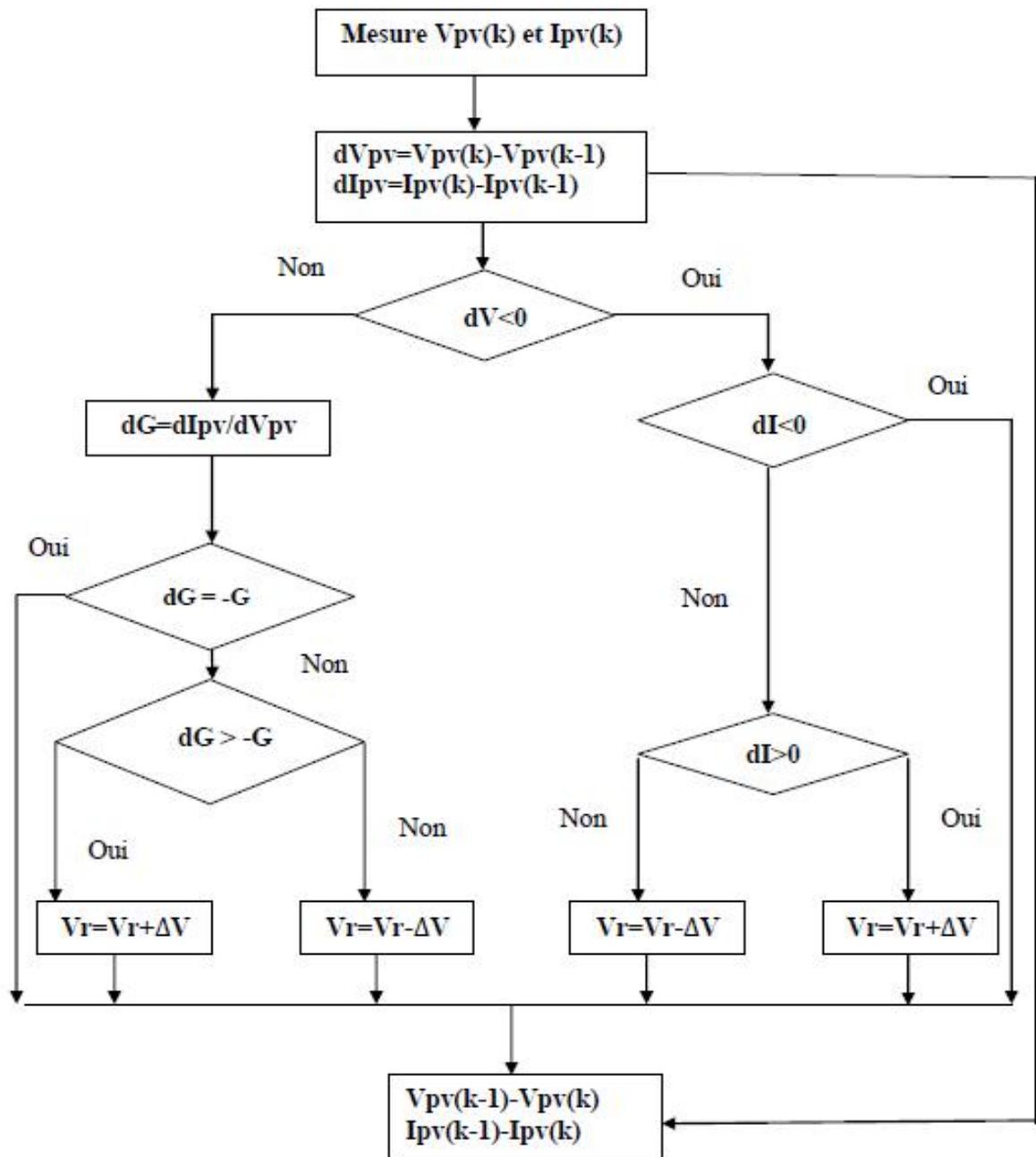


Figure (II.14): Organigramme de l'algorithme MPPT de l'incrémentale de la conductance.

II.9.2. Charge à tension constante

Dans cette deuxième phase, on a utilisé un simple régulateur à hystérésis pour réguler la tension de la batterie.

II.9.2.1. Réglage par hystérésis (tout – ou – rien)

La commande par hystérésis appelée tout ou rien, utilise l'erreur existante entre le signal de référence et la mesure du signal de sortie. L'erreur est comparée à un gabarit appelé

bande d'hystérésis. Comme la montre la figure II.15, lorsque la tension de la batterie atteint 14.2 V par la première phase, on bascule à la deuxième phase.

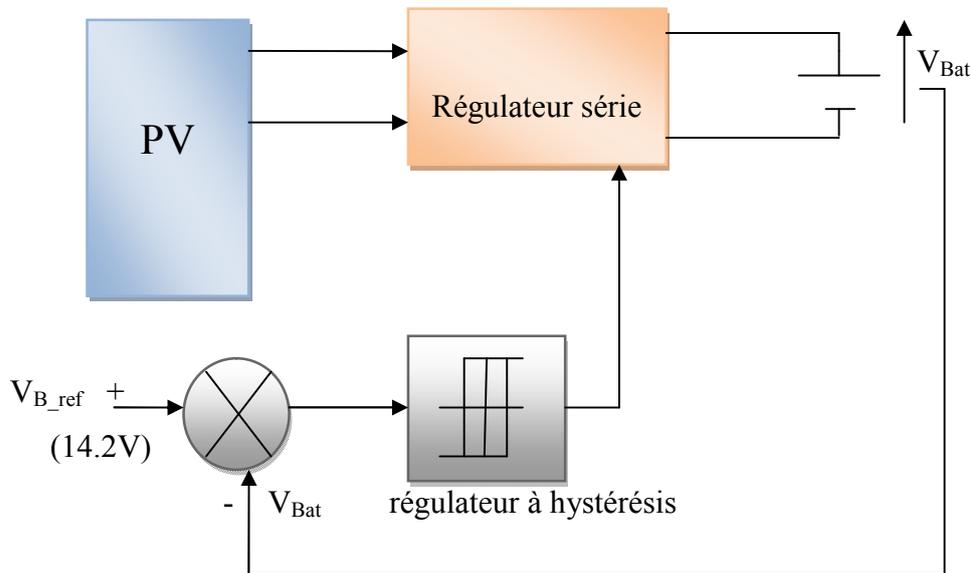


Figure (II.15) : Schéma block de la régulation à hystérésis.

Si $(V_{B_ref} - V_{Bat}) > \Delta V = 0.2V$, l'interrupteur est fermé

Sinon, l'interrupteur est ouvert

Cette méthode présente l'avantage d'être simple et efficace, et elle sera active tant que le courant de batterie n'est pas assez faible.

II.10. CONCLUSION

Dans ce chapitre un aperçu sur les batteries et les types de batteries ses caractéristiques ainsi que les méthodes de charge les batteries à plomb (en deux phases) adoptée dans ce travail.

Chapitre III

Conception du régulateur de charge

III.1. INTRODUCTION

Dans ce chapitre, la conception et la réalisation d'un algorithme de charge de batterie de type plomb acide de capacité 7Ah à partir d'un module photovoltaïque, sur une carte arduino de type Méga sera décrite. Le régulateur de charge se fera sur un convertisseur abaisseur de tension.

Dans ce contexte, on expose les résultats expérimentaux de l'algorithme de charge à deux phases. Implémenté le 24 et 25/04/2017, une journée claire.

II.2. DESCRIPTION DU HARDWARE

II.2.1. Etude du hacheur

Pour la mise en œuvre de l'algorithme de charge, un convertisseur DC-DC abaisseur de tension a été choisi. Il est composé d'un Switch de puissance (IGBT), on série avec une inductance L , jouant le rôle d'une source de courant. Le condensateur $C1$ concrétise une source de tension, alors que $C2$ est un filtre de sortie.

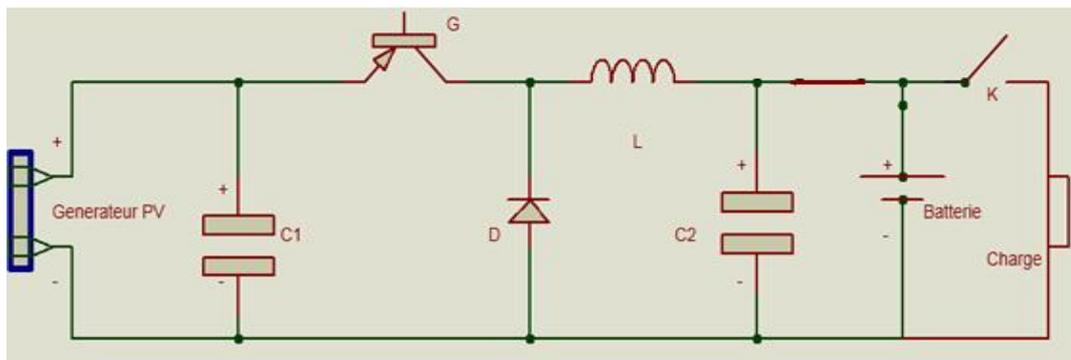


Figure (III.1) : Le schéma du hacheur série réalisé.

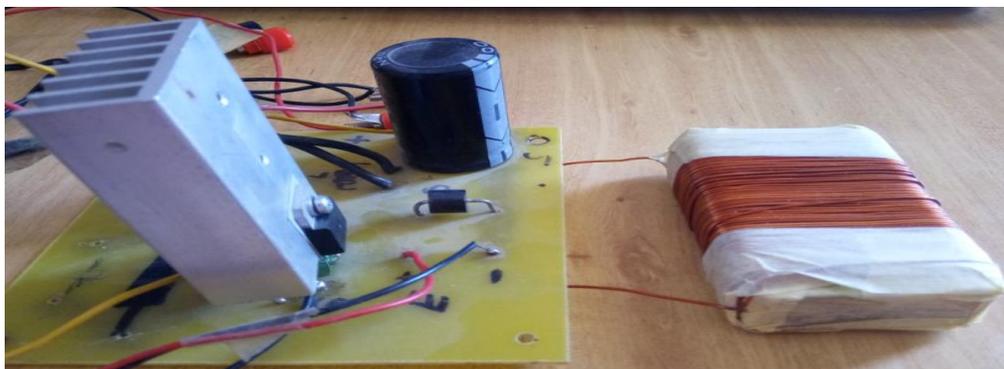


Figure (III.2) : Photo de circuit de puissance réalisé.

III.2.2. composants utilisés :

a) Switch de puissance :

Le Switch de puissance utilisé est un IGBT, contrôlé en tension, dont les caractéristiques figurent sur le tableau III.1.

Type	V _{ce}	I _c (T=25°)	I _c (T=90°)	V _{GE}
BUP 314	1200 v	52 A	33 A	15 V

Tableau (III.1) : Caractéristiques de l'IGBT (BUP314).

Avec :

V_{GE}: tension de gâchette-émetteur

V_{ce} : tension du collecteur-émetteur.

I_c : le courant du collecteur

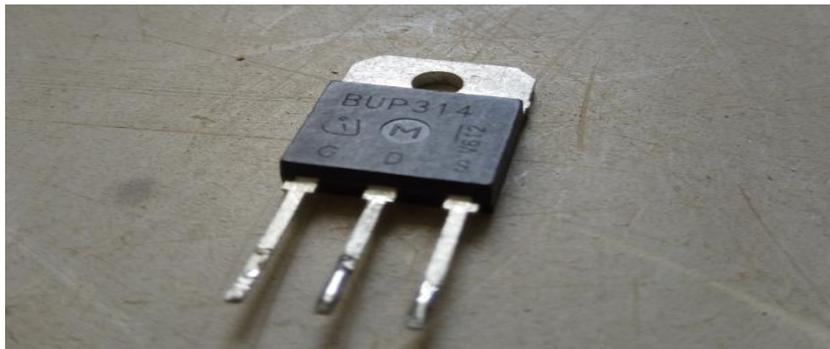


Figure (III.3) : Photo de l'IGBT BUP314 utilisé.

b) Capacités :

Le condensateur C1 à l'entrée du convertisseur de puissance est de valeur C1=220 uF alors que C2=330 uF.



Figure (III.4) : Photo de la capacité (C2) utilisée.

c) Diode de roue libre :

Cette diode assure la continuité du courant inductif pendant l'absence du courant fourni par la source. C'est une diode de puissance supportant un courant de 10A.



Figure (III.5) : Photo de la diode anti retour utilisée.

d) Inductance :

Pour obtenir un courant a la sortie à conduction continue, où l'IGBT est commuté à 3.9KHz, et un courant de sortie $I_{max}=2A$, une inductance $L=3.25\text{ mH}$, $R_i=0.9\Omega$ à été conçu, autour d'un circuit magnétique de forme carrée, issu d'un transformateur grillé. Le nombre de spires est $N=160$ spires et un fil de diamètre 0.89 mm.



Figure (III.6) : Photo de la bobine réalisée.

III.2.3. Module photovoltaïque

Ce convertisseur sera alimenté par un module photovoltaïque monocristallin. (La figure III.7)



Figure (III.7) : Photo de module solaire étudiée.

Les caractéristiques techniques du module utilisé sont données sur le tableau ci-dessous. Il s'agit d'un module de puissance maximale de 15W (Model Semtoni)

Nombre de cellules	72
Tension de circuit ouvert (Voc)	21 V
Courant de court circuit (Isc)	0.96 A
Tension du MPP (Vmpp)	17 V
Courant du MPP (Impp)	0.88 A
Puissance maximale (Pmpp)	15 W

Figure (III.2) : Caractéristiques du Panneau photovoltaïque.

III.2.4. Batterie à plomb

Le convertisseur réalisé aura comme tâche la charge d'une batterie à plomb étanche, 12v de capacité 7Ah, et de marque 6F-M7 (la figure III.5), et dont voici les caractéristiques :

Model	6FM-7AH
Type de batterie	Batterie au plomb
Tension nominale	12 V
Capacité nominale	7 Ah
Température de fonctionnement	-5~40°C
Courant maximal	2.8 A

Tableau (III.3) : Caractéristiques de la batterie utilisée. [21]

Il est à citer que sur la figure III.1, le Switch K sera ouvert lors de la charge de la batterie, et fermé, une fois la batterie chargée pour alimenter la charge résistive R.



Figure (III.8) : Photo de la batterie utilisée.

III.3. CIRCUIT DE COMMANDE

L'algorithme de charge à deux phases de la batterie sera implémenté numériquement sur une carte arduino Mega 2560, visualisée sur la figure III.9.

III.3.1. La carte arduino :

Arduino, son récent synonyme Genuino [19], sont des cartes matériellement libres sur lesquelles se trouve un microcontrôleur (d'architecture AtmelAVR comme par exemple l'Atmega328p). Les schémas de ces cartes sont publiés en licence libre, cependant, certains composants, comme le microcontrôleur par exemple, ne sont pas en licence libre.

Le microcontrôleur peut être programmé pour analyser et produire des signaux électriques, de manière à effectuer des tâches très diverses comme la domotique (le contrôle des appareils domestiques - éclairage, chauffage...), le pilotage d'un robot, de l'informatique embarquée, etc. C'est une plate-forme basée sur une interface entrée/sortie simple.

Dans l'arduino, les noms des broches ont été simplifiés, la notion traditionnelle de ports d'entrées-sorties (port A, port B, etc.) a été remplacée par des numéros.

La numérotation est simple et logique. Une carte de type Uno offre 14 E/S numériques et 6 entrées analogiques. Les 14 E/S numériques sont câblées sur deux connecteurs nommés Digital (PWM) sur un côté de la carte, les 6 analogiques sur un connecteur en face, nommé

Analog in. Aligné avec ce connecteur, on trouve un quatrième connecteur nommé Power qui comporte également le signal Reset.



Figure (III.9) : La carte arduino ATMEGA2560.

Pourquoi les connecteurs des E/S numériques portent-ils la mention PWM ? Eh bien, les broches sur la carte marquées par un dièse (« # », parfois aussi par un tilde « ~ ») sont capables de fournir des signaux à modulation à largeur d'impulsion MLI (PWM en anglais). Elles sont balisées car, dans Arduino, elles servent comme sorties analogiques. Leur nombre dépend du micro, l'ATmega8 n'en a que trois (E/S 9 à 11), l'ATmega168 et l'ATmega328 en possèdent six (E/S 3, 5, 6, 9 à 11).

Pour les cartes de type Mega équipées de micros avec plus de broches que l'ATmega8/168/328, la numérotation des E/S est différente car les broches ont été regroupées sur des connecteurs par fonction. Ainsi, une telle carte dispose de connecteurs Power, Analog in, Digital, Communication et PWM. Le connecteur Digital est à double rangée. Au total, une carte Mega 2560 offre 70 E/S numériques, découpées en 32 E/S numériques (Digital), 16 entrées analogiques (Analog in), 15 sorties MLI (PWM) et 10 broches réservées à la Communication [20].

La programmation de ces cartes peut être effectuée en langage C, en Matlab simulink ou Labview.

III.3.1.1. Caractéristiques de d'Arduino ATmega2560:

Microcontrôleur	ATmega2560
Tension de fonctionnement	5V
Tension d'entrée (recommandé)	7-12V
Tension d'entrée (limites)	6-20V
Pins d'E / S numériques	16 54 (dont 14 fournissent PWM sortie)
Pins d'entrée analogiques	16
Courant DC par pin E / S	40mA
Courant DC pour pin 3.3V	50mA
Mémoire flash	256 Ko dont 8 Ko utilisés par Chargeur de démarrage
SRAM	8 KB
EEPROM	4 KB
Vitesse de l'horloge	16 MHz

Tableau (III.4) : Caractéristiques d'Arduino ATmega2560.

III.3.2. Hardware utilisé :

Pour notre utilisation, les ports analogiques A0, A1 sont utilisées pour lire le courant et la tension du panneau solaire respectivement, et A2, A3 utilisées pour lire le courant et la tension de batterie respectivement, le port 6 configuré en sortie est utilisée pour faire sortir le rapport cyclique de l'hacheur (PWM), à une fréquence de hachage de 3.9 KHz, alors que le port 5 est utilisé comme indicateur du point optimum MPP du module solaire, faisant sortir 5V une fois l'algorithme converge, en spécifiant les marges de la conductance incrémentale $di/dv +i$, ainsi :

$-0.02 < (i/v + di/dv) < 0.02 \rightarrow$ port 5 donne 5v.

$di /dv < -0.02$ ou $di /dv > 0.02 \rightarrow$ port 5 donne 0v.

Il est à signaler que l'algorithme de charge sera implémenté en langage C, en utilisant logiciel « Arduino ».

III.4. CIRCUIT D'ADAPTATION

La connexion entre la carte arduino et les convertisseurs de puissance est réalisée par une carte d'interface, qui adapte les niveaux du signal de commande à la tension de la grille de l'IGBT. Le circuit de commande de la grille d'un IGBT, reçoit en entrée un signal logiques d'ouverture et de fermeture de niveau de tension (0/15V), alors que les signaux des ports Arduino disposent des signaux au format TTL (0/5V). Pour permettre le verrouillage d'interrupteur de l'hacheur, nous avons par conséquent réalisé une carte d'interfaçage permettant d'adapter les signaux de sortie de la carte Arduino avec les niveaux logiques des signaux d'entrée de l'hacheur.

Un circuit de bufférisations utilisant le 74LS00 (portes NAND), garantissant une diminution des dégâts en cas de mauvais fonctionnement de l'hacheur, est cascadé par un étage d'élévation de niveau de tension en exploitant le circuit 74LS17, constitué à son tour de six inverseurs à collecteur ouvert (figure III.10).

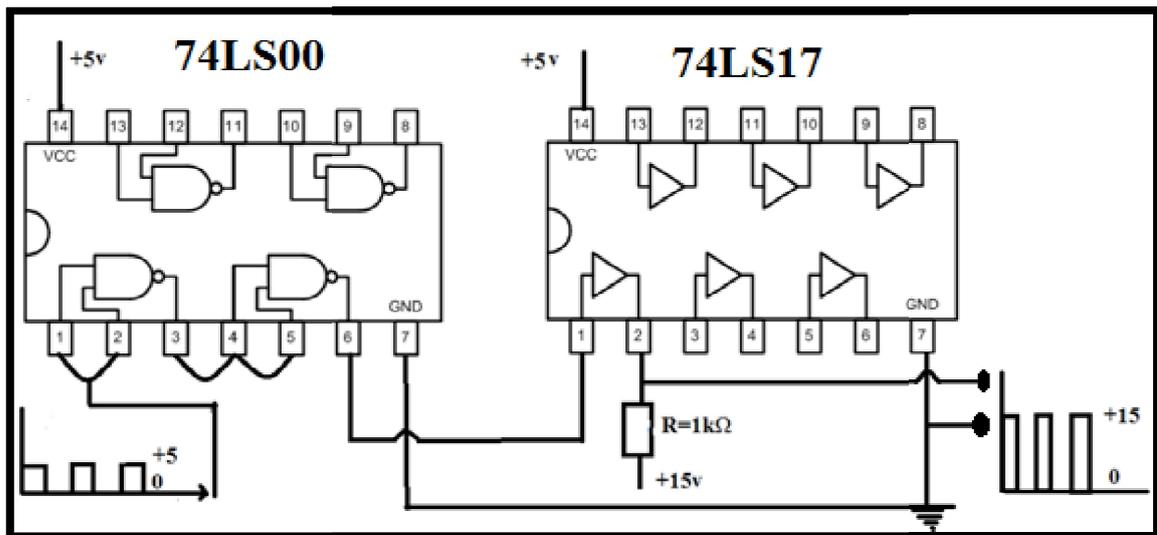


Figure (III.10) : Schéma de circuit d adaptation réalisé.

III.5. PRESENTATION DU PROTOTYPE

Le schéma de la figure (III.11), représentant le prototype à réaliser, a été fait sous le logiciel électronique Proteus (ISIS) conçue par 'Labcenter Electronics' qui permet de dessiner des schémas électroniques, de les simuler et de réaliser le circuit imprimé correspondant.

Dans cette partie, nous allons aborder la présentation du prototype qu'on veut réaliser.

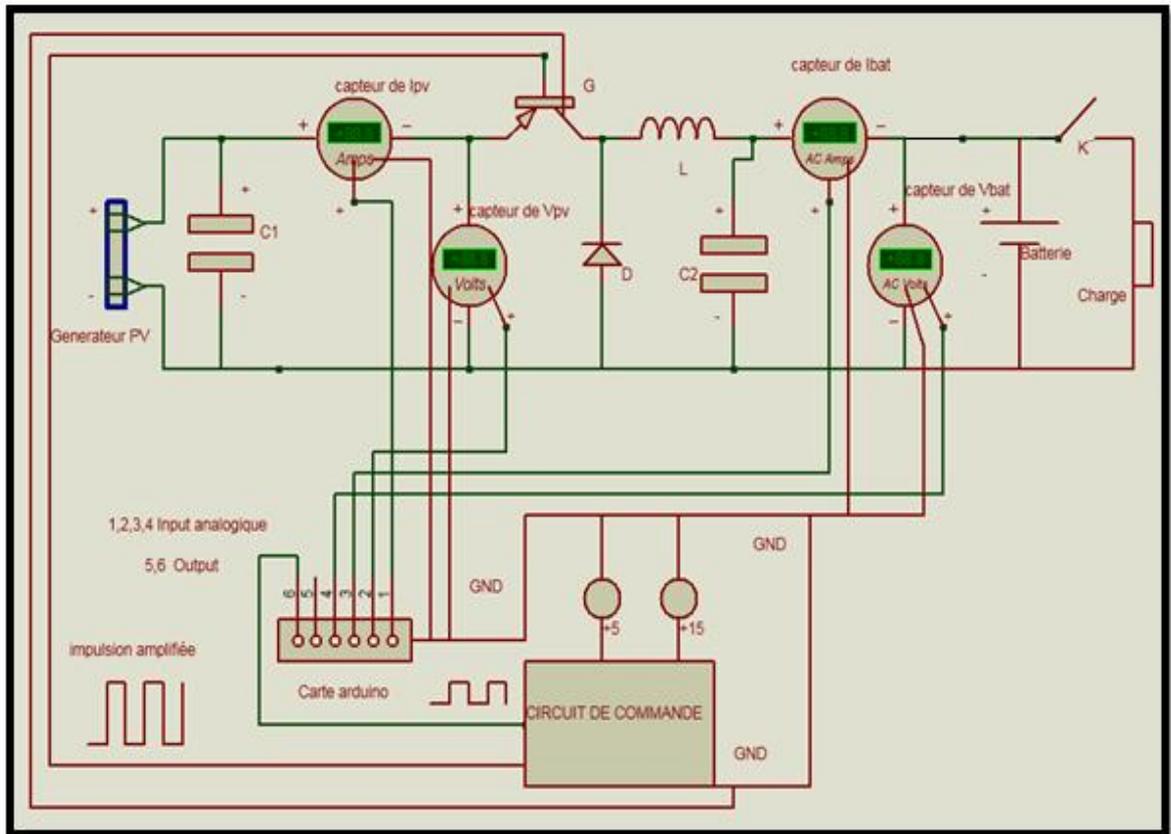


Figure (III.11) : Schéma synoptique complet du prototype à réaliser.

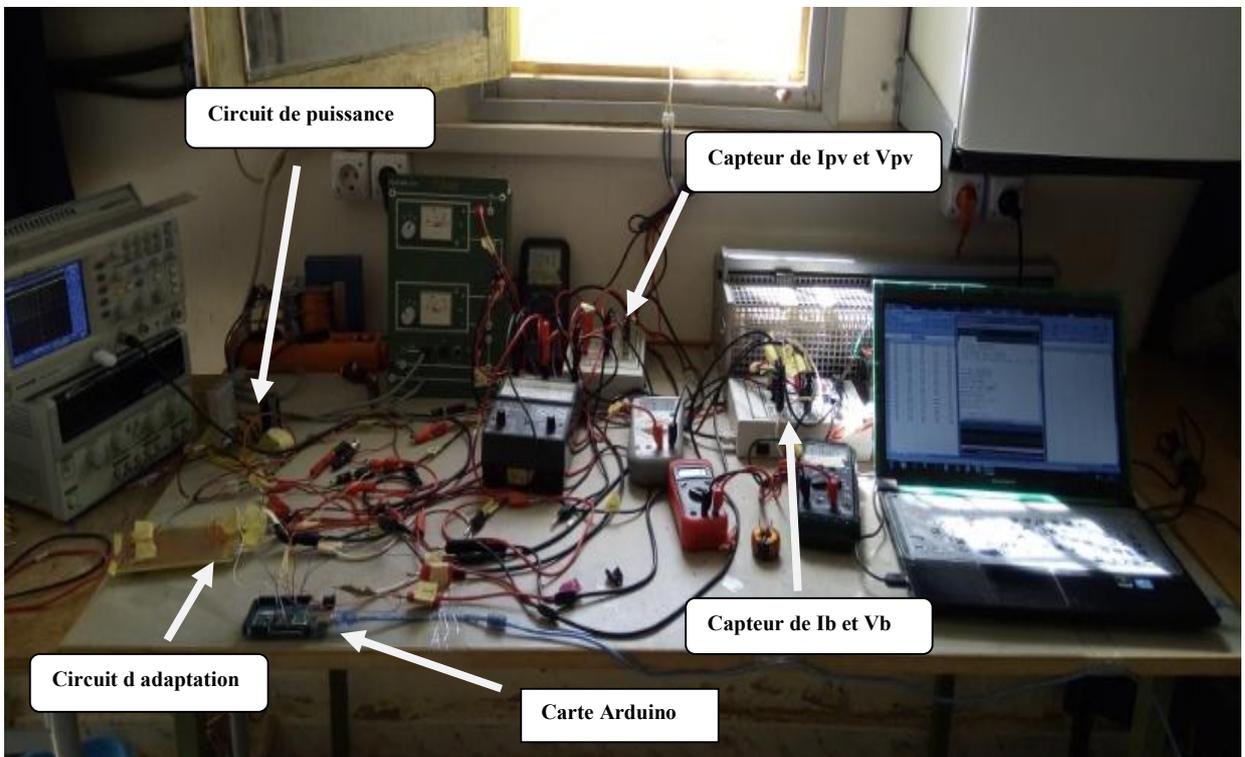


Figure (III.12) : Photo du montage complet réalisé.

III.6. RESULTATS EXPERIMENTAUX

III.6.1. Résultats de l' MPPT

Comme il a été mentionné au chapitre II, l'algorithme de charge sera fait en deux phases :

- 1) La première phase permet un fonctionnement à courant constant, côté batterie, et en MPPT côté PV.
- 2) la deuxième phase désigne une régulation de tension.

Pour configurer le bon fonctionnement de la première phase, la performance de l'algorithme MPPT basé sur l'inductance incrémentale est testée premièrement sur une charge résistive, pour deux valeurs de la charge, et comparé à l'MPPT manuel.

$R=6.4 \Omega$

Horloge	Eclaircement W/m ²	Température (C)	Couplage direct			MPPT manuel			MPPT numérique			
			I(A)	V(V)	P(W)	I(A)	V(V)	P(W)	I(A)	V(A)	α	P(W)
11:34	966	46	0,92	6,15	5,5	0,83	16,22	11,5	0,81	16,33	0,74	11,5
12:34	970	44	0,89	5,81	5	0,78	16,42	12,7	0,78	16,26	0,75	12
13:18	994	41	0,91	6	5,2	0,83	15,4	12,5	0,79	15,97	0,75	12
14:19	804	41	0,75	6,93	5,2	0,66	16,08	10,3	0,65	15,8	0,65	9,5
15:58	870	39	0,8	6,31	5,1	0,71	15,5	10,7	0,72	15,9	0,7	11

Tableau (III.5) : Valeurs expérimentales relevées d'algorithme Cond-Inc pour R1.

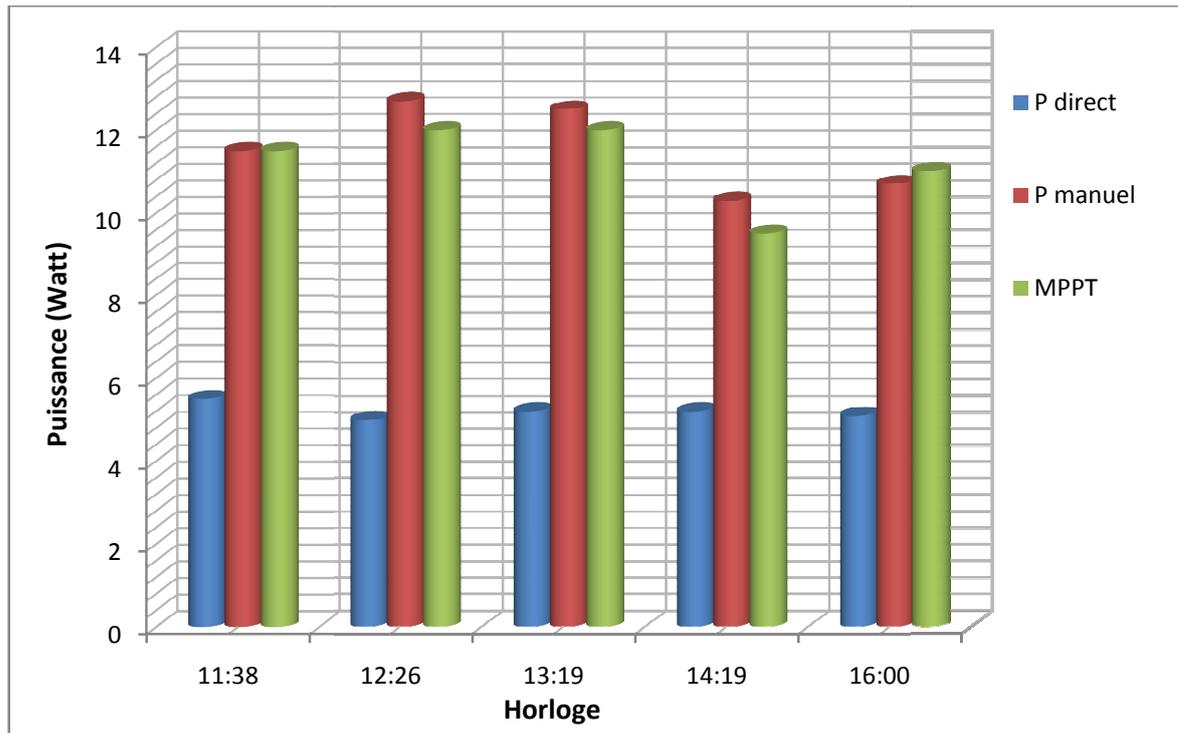


Figure (III.13) : histogramme des puissances d’algorithme Cond-Inc pour la résistance R1.

Pour: R2=35 Ω

Horloge	Eclairciment W/m ²	Température (C)	Couplage direct			MPPT manuel			MPPT numérique			
			I(A)	V(V)	P(W)	I(A)	V(V)	P(W)	I(A)	V(A)	α	P(W)
11:38	956	46	0,52	18,55	9,7	0,85	15,91	13,5	0,69	17,67	0,79	12
12:26	970	44	0.5	18,00	9,2	0,78	16,42	12,7	0,72	17,4	0,81	12,7
13:18	994	41	0.5	18.05	9,3	0,83	15,4	12,5	0,72	16,97	0,75	11,7
14:19	804	41	0.42	14.59	6	0,66	16,08	10,3	0,61	16,7	0,77	9,7
16:00	870	39	0,45	15.9	7,2	0,71	15,5	10,7	0,62	16,88	0,76	10,2

Tableau (III.6) : Valeurs expérimentales relevées d’algorithme Cond-Inc pour R2.

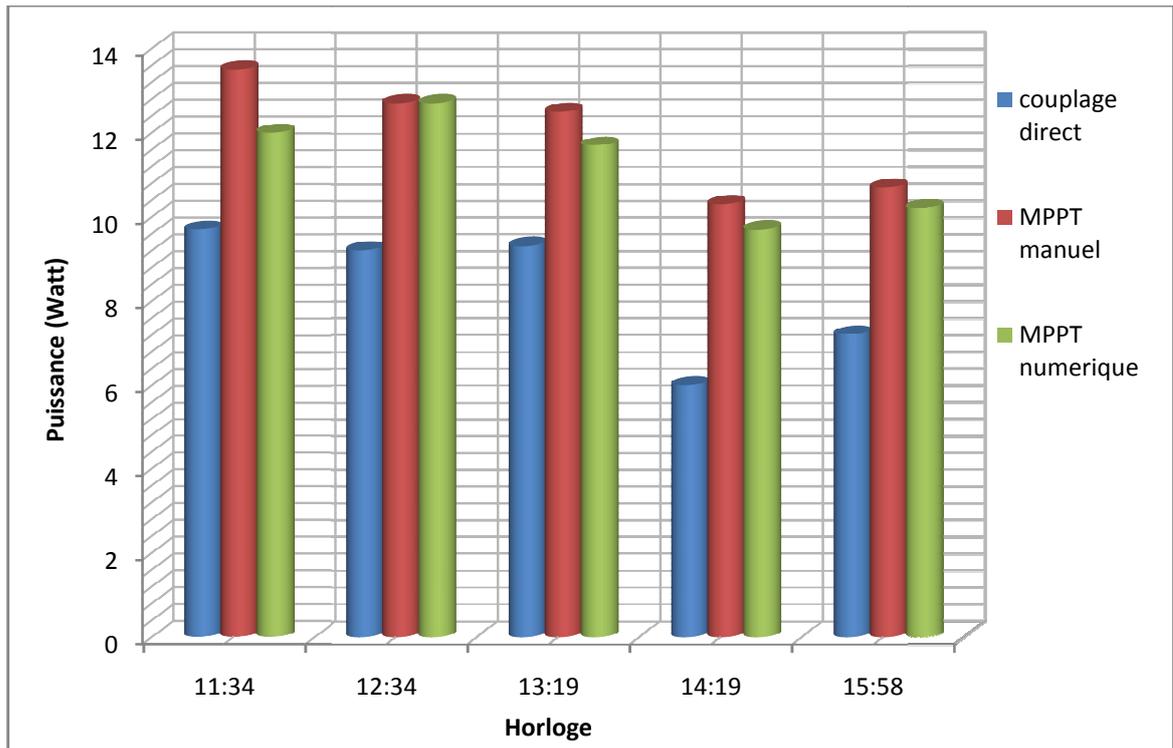


Figure (III.14) : Histogramme des puissances d’algorithme Cond-Inc pour la résistance R2.

III.6.1.1. Les courbes des V_{pv} , V_{ch} , I_{ch} et α (le rapport cyclique)

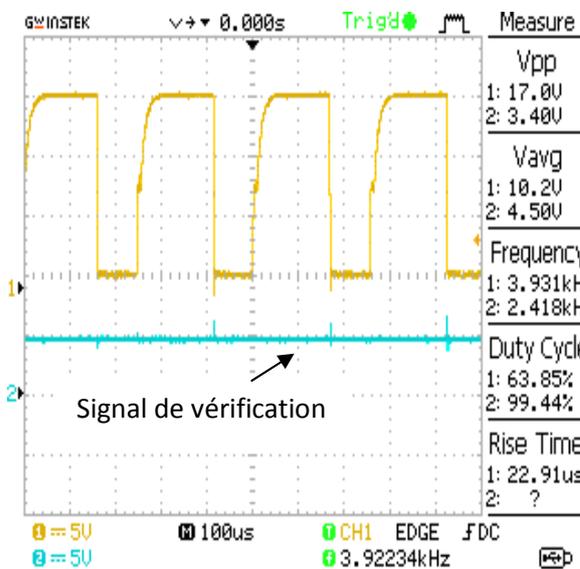


Figure (III.15.1) : Le rapport cyclique (α) et signal de verification

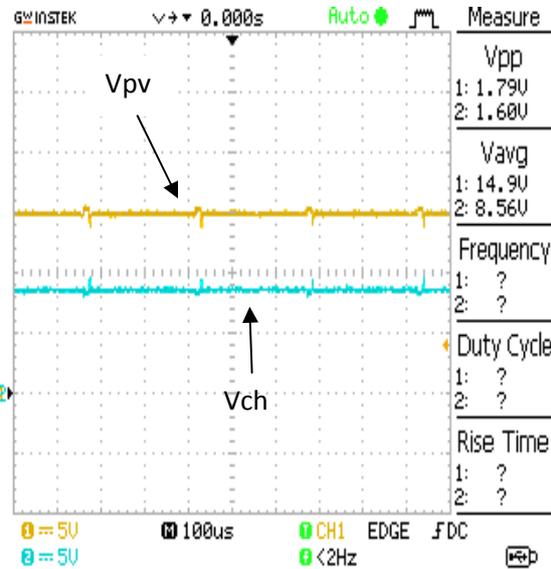


Figure (III.15.2) : Tension de PV et tension de charge

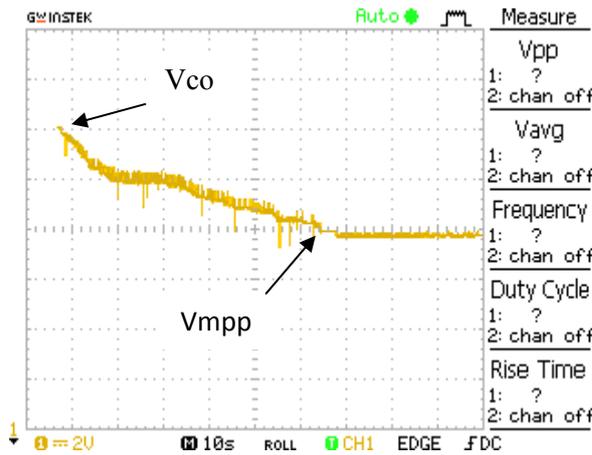


Figure (III.15.3) : Tension de PV.

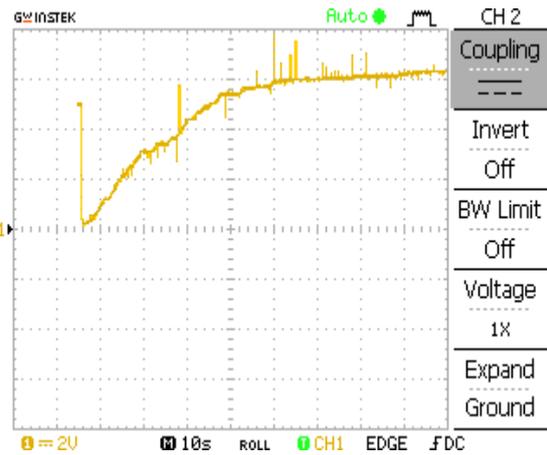


Figure (III.15.4) : Tension de charge.

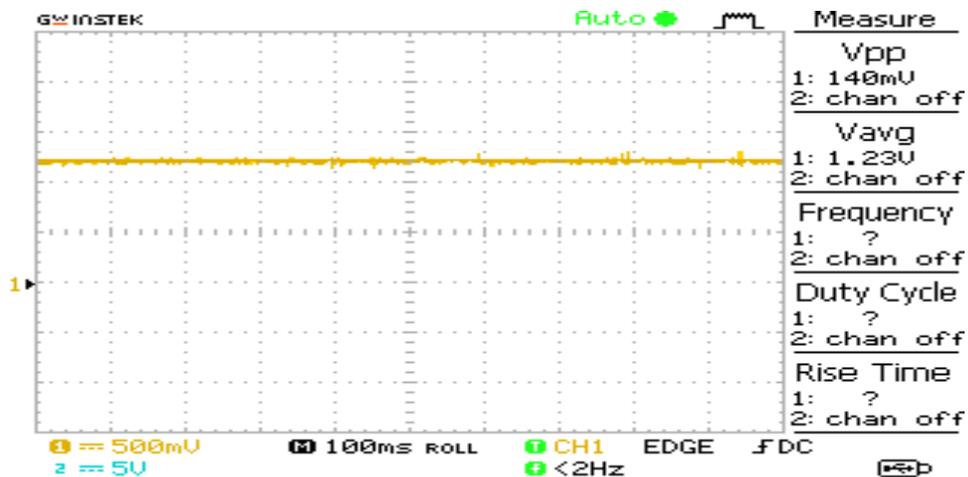


Figure (III.15.5) : Courant de la charge.

III.6.1.2. Des histogrammes précédents

On peut clairement remarquer l'efficacité de l'algorithme de MPPT (Cond-Inc), avec une superposition presque totale avec l'MPPT manuel, et avec une augmentation qui dépasse le double pour le couplage direct. Cette efficacité est plus notable pour les charges à gauche du point MPP. ($R = 6.4 \text{ Ohms}$). Pour les points à droite du point MPP, l'hacheur survolteur se trouve plus efficace.

III.6.1.3. Les courbes V_{pv} , V_{ch} , et I_{ch} :

Des courbes présentées, on peut voir que la tension V_{pv} débuté d'une tension de circuit ouvert $V_{co} = 19\text{v}$ puis converge vers sa valeur optimale de 14.9v , où l'indice de vérification bascule de 0 à 5v.

Pour le rapport cyclique, et grâce à la PWM intégrée, ce rapport change en ligne, pour ce positionner sur le point optimum. La tension de charge est remarquable supérieure à V_{pv} , pour l'hacheur buck, et le courant de charge est en conduction continue.

III.6.2. RESULTATS DE CHARGE DE BATTERIE

III.6.2.1. Résultats de la première phase

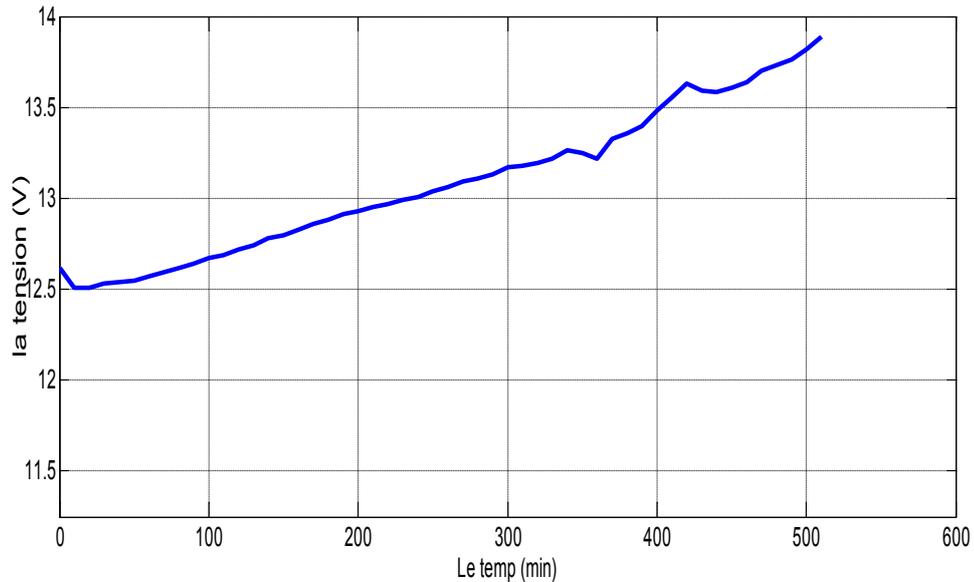


Figure (III.16) : La tension de la batterie pendant 1ère phase de charge.

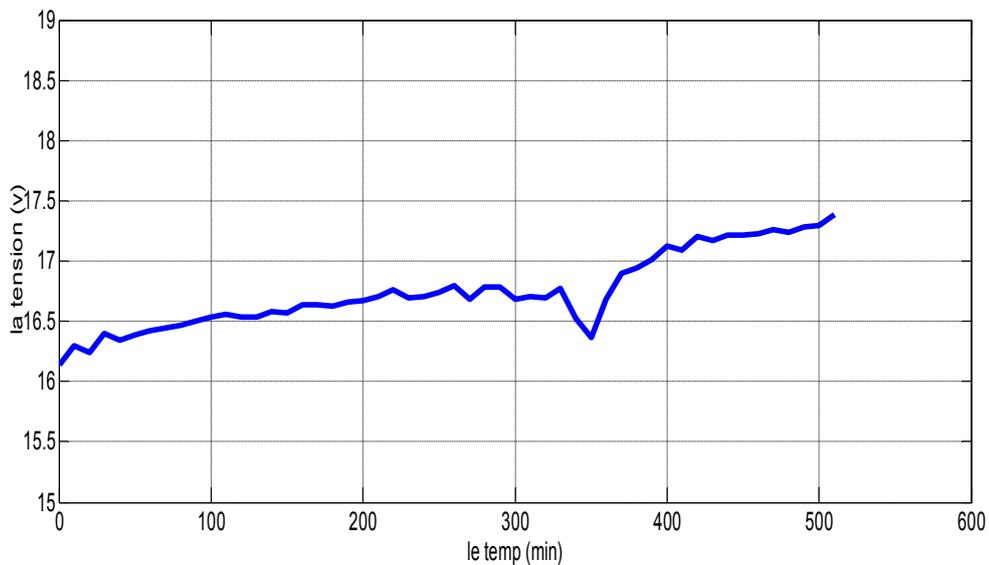


Figure (III.17) : La tension du panneau pendant 1ère phase de charge.

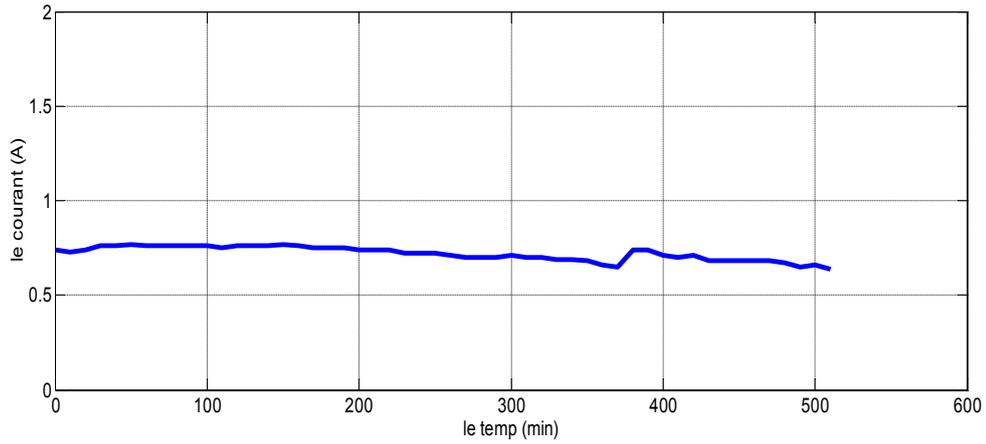


Figure (III.18) : Courant de la batterie pendant 1ère phase de charge.

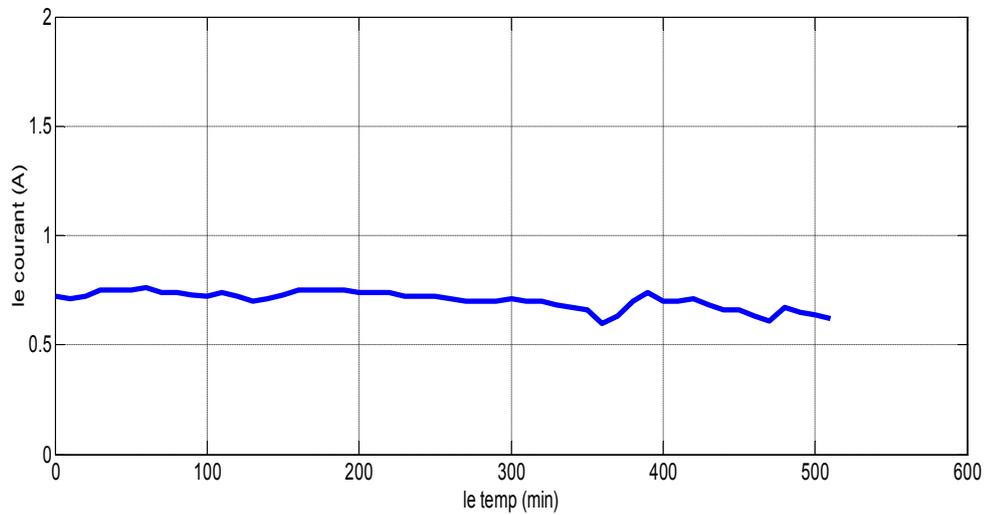


Figure (III.19) : Courant du panneau pendant 1ère phase de charge.

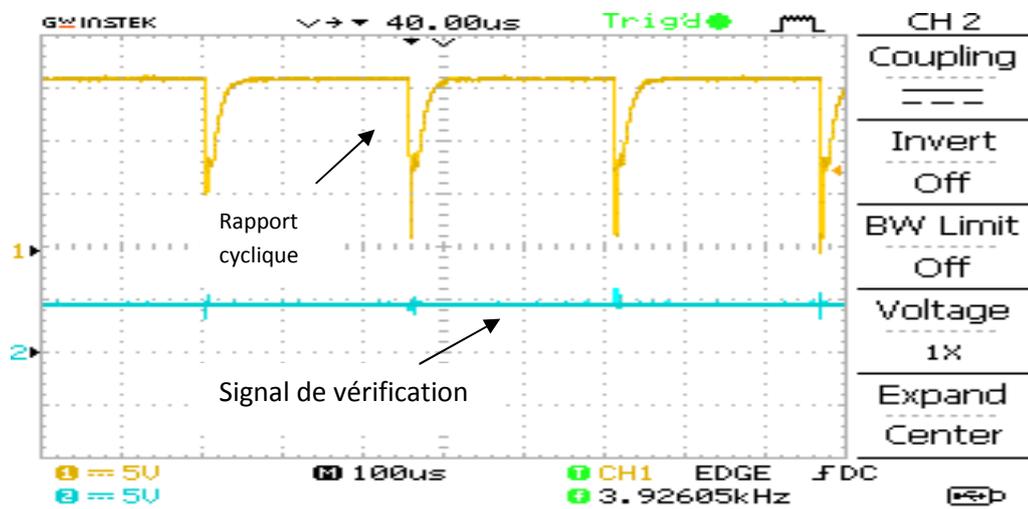


Figure (III.20) : Le rapport cyclique pour 1 ère phase.

Interprétation et discussion

Pendant cette première phase, où la tension de batterie débutée de 12.5v, l’algorithme MPPT est compilé, et ce jusqu’à atteindre 13.8V. Comme on peut la remarque sur la figure III.16, la tension augmente lentement pendant 9 heures. Le module PV opère toujours en MPPT, où sa tension bascule entre 16.5 et 17.5, et un courant I_{pv} autour de 0.7A.

Le courant de la batterie est presque constant $0.65 \leq I_{bat} \leq 0.73$ car le rapport cyclique est proche de 1, et le signal de vérification de MPPT est toujours égal à 5v

III.6.2.2. Résultat de la deuxième phase

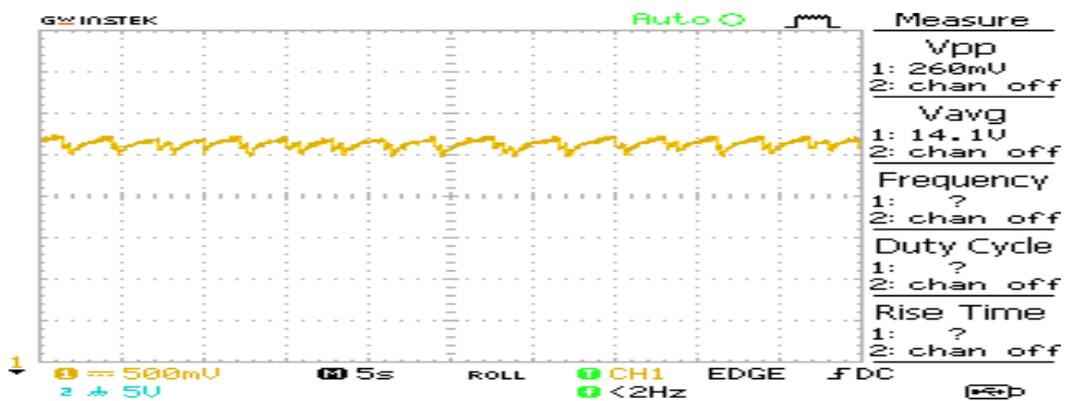


Figure (III.21) : La tension de la batterie pendant 2ème phase de charge.

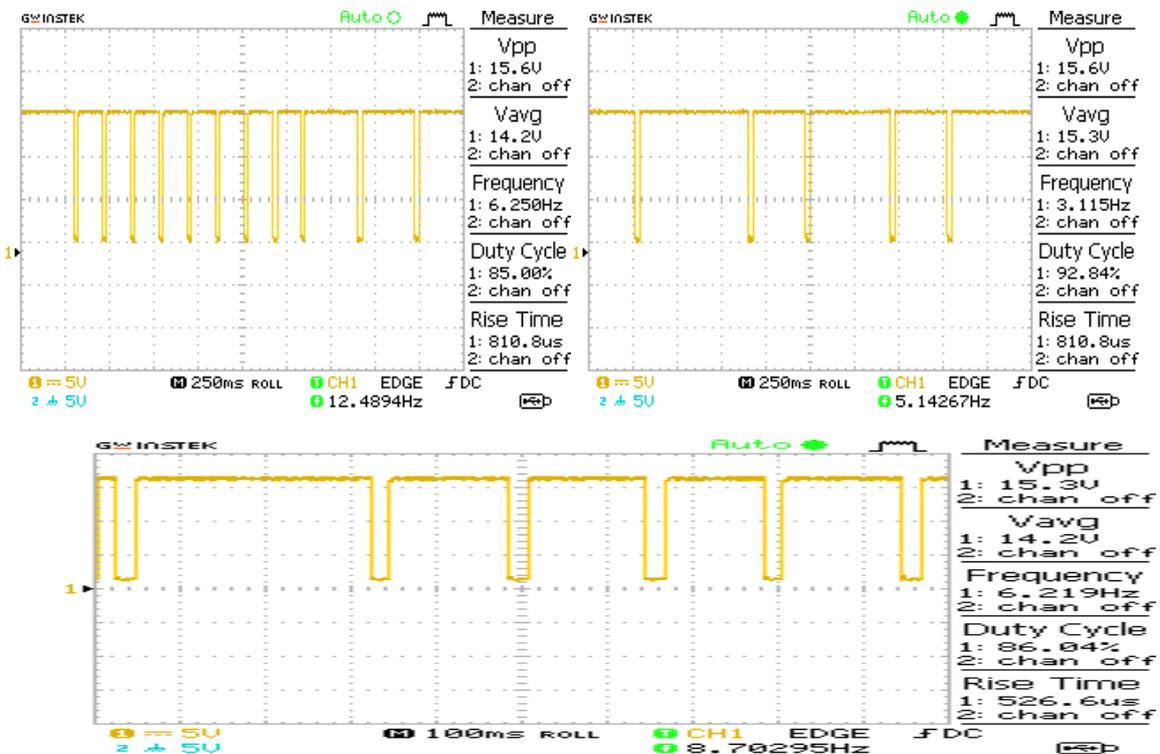


Figure (III.22) : Evolution du rapport cyclique (α) en 2ème phase.

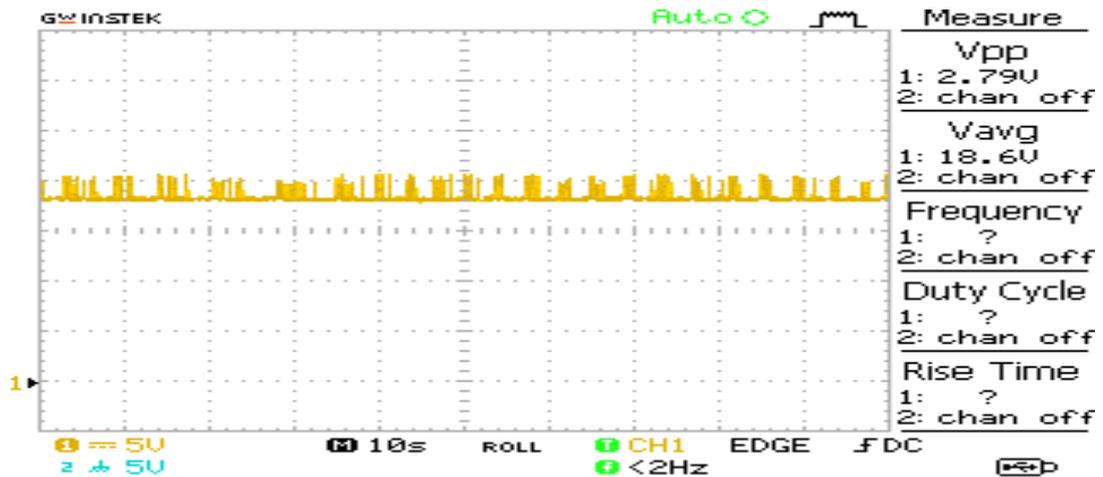


Figure (III.23) : La tension du panneau pendant 2ème phase de charge.

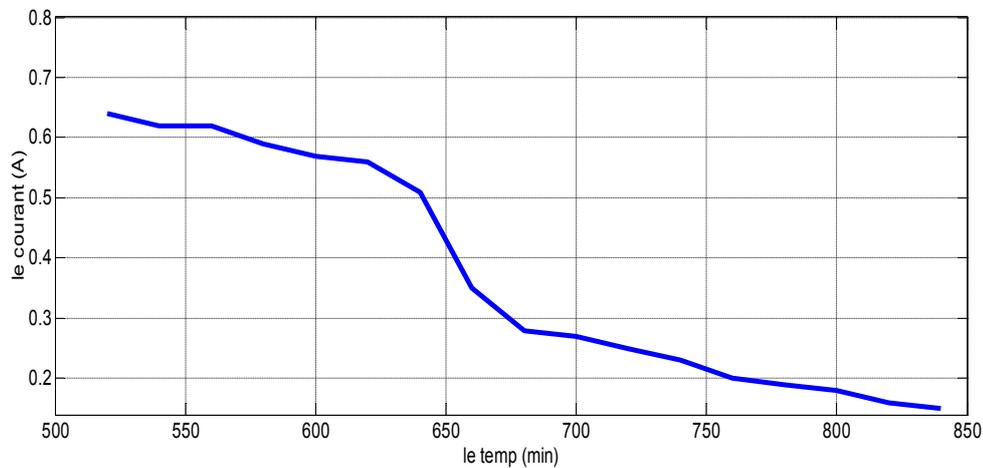


Figure (III.24) : Le courant de la batterie pendant 2ème phase de charge.

Interprétation et discussion

Dans cette phase, on remarque que la tension de batterie oscille toujours entre 14V et 14.2V, avec une bande d'hystérésis $\Delta v=0.2v$, ce qui permet un fonctionnement à tension constante, le courant de la batterie, illustré sur la figure III.24, diminue en permanence de 0.65A à 0.14 A, présentant 2% C_N pendant 5 heures.

A cet état confirme que la batterie est totalement chargée. Côté PV, la tension de module oscille entre 17V et 19 V, où le système ne fonctionne pas en MPPT.

En conclusion, sur les figures III.25 et III.26 sont tracées les allures globales de la tension de la batterie et son courant pendant toute la phase d'expérimentation.

On remarque bien, que pendant la première phase, un fonctionnement à courant constant est vérifié, alors qu'en deuxième phase, une opération à tension constant est utilisée, pour compléter le processus de charge.

III.6.3. Les caractéristiques globales de charge de batterie

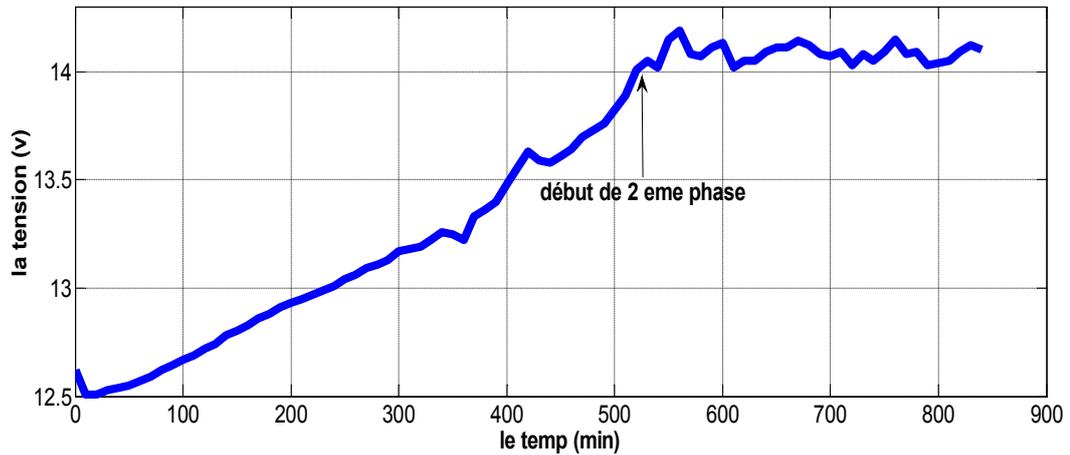


Figure (III.25) : La tension de charge de batterie.

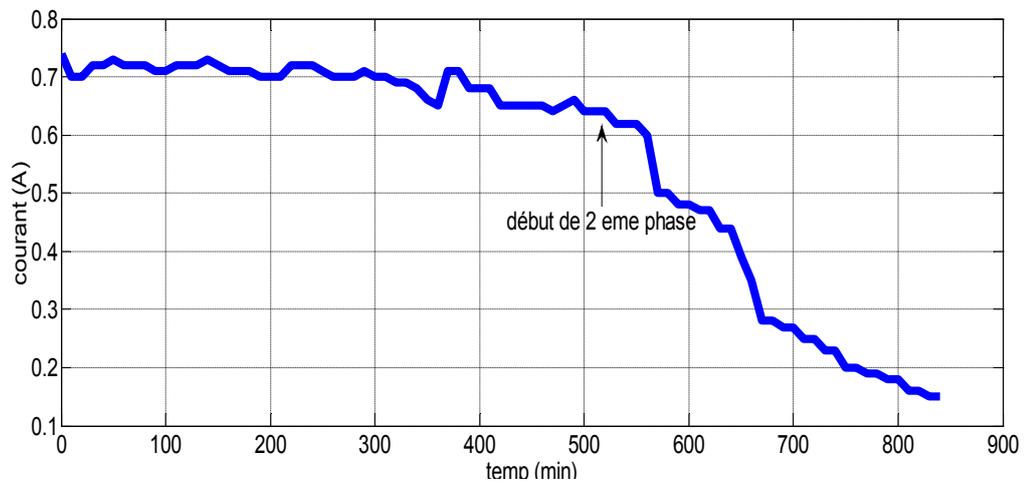


Figure (III.26) : Le courant de charge de batterie.

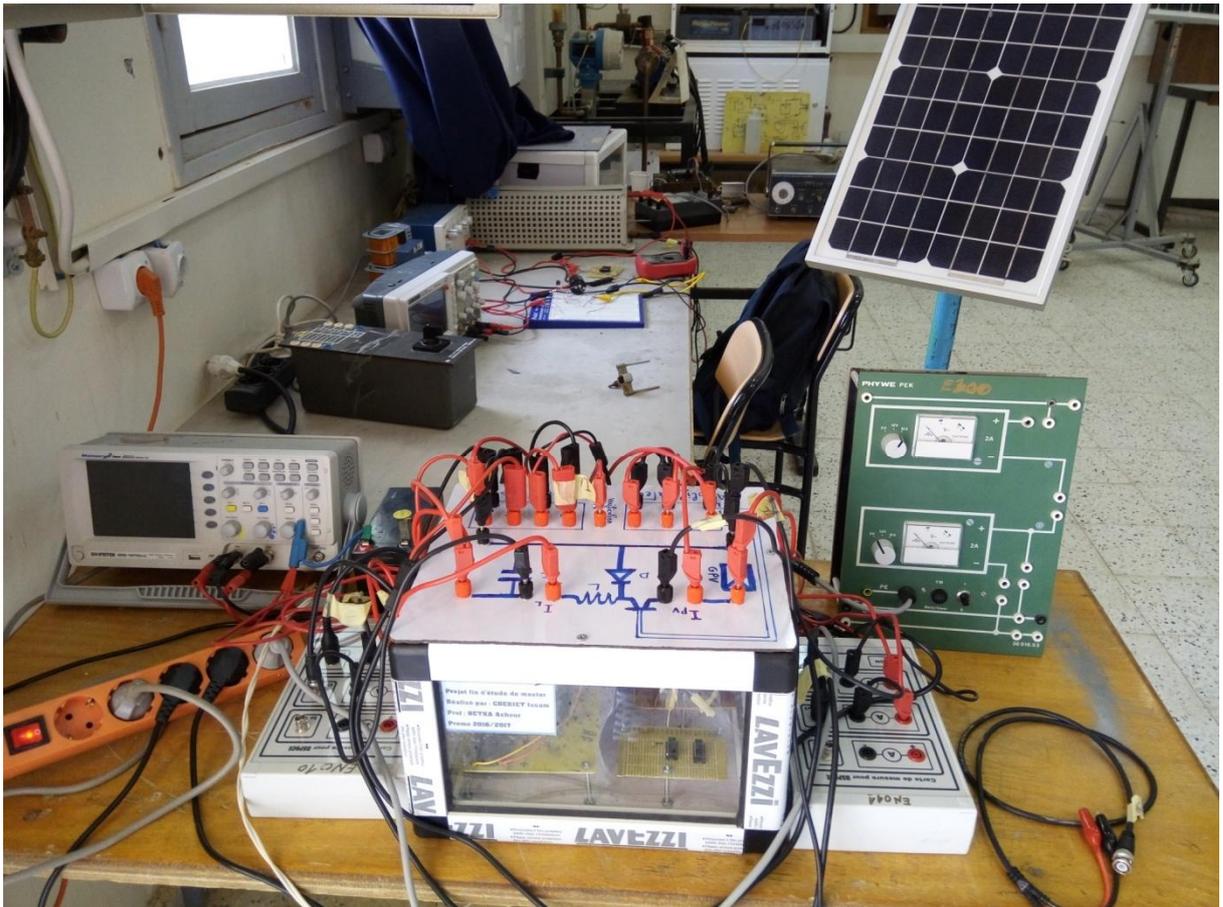


Figure (III.27) : Photo du chargeur de batterie réalisé

III.7. CONCLUSION

Dans ce chapitre, le principe de la charge de batterie par deux phases a été présenté.

Les résultats expérimentaux obtenus ont pu vérifier cette approche de charge, et ce suivant multiples essais de validation.

Conclusion Générale

CONCLUSION GENERALE

Le travail présenté dans ce mémoire traite la conception et la réalisation d'un régulateur de charge à deux phases d'une batterie à plomb.

On a commencé par des notions de base concernant l'effet photovoltaïque, principe de fonctionnement des cellules photovoltaïques, modélisation, domaines d'utilisation et conception d'une installation photovoltaïque. Dans cet étape nous sommes intéressés à l'influence des différentes paramètres (éclairage, température) sur la caractéristique « courant-tension » du module photovoltaïque et leurs influences. Ensuite nous avons exposé l'algorithme de charge à suivre, en partant par des définitions préliminaires des différents paramètres relatifs à la batterie en question, son principe de fonctionnement « charge et décharge », les deux méthodes de charge communément utilisées « charge à courant constant et charge à tension constante ».

Après, nous avons abordé la partie algorithmique de la charge à deux phases : phase de charge à MPPT, et charge à tension constante, ainsi que le circuit de puissance autour d'un hacheur Buck.

Enfin, nous avons développé l'ensemble du dispositif expérimental, où nous avons décrit en détail chacune des pièces qui composent notre régulateur solaire, ainsi que les résultats expérimentaux obtenus via le calculateur arduino.

Annexe

ANNEXE

Dimensionnement du bloc de puissance :

Le bloc de puissance consiste en fait à un convertisseur DC/DC, basé sur un IGBT PUB314, et assurant le transfert de toute de la puissance extraire du panneau solaire vers une charge résistive. Le dimensionnement de ce bloc de puissance dépend des contraintes imposées par le cahier de charge.

Cahier des charges :

Le cahier des charges que nous sommes imposés est le suivant :

- Ondulation du courant dans l'inductance L : $\Delta iL = 400 \text{ mA}$.
- Ondulation de la tension aux bornes du condensateur C2 : $\Delta VC2 = 100 \text{ mV}$.
- Ondulation de la tension aux bornes du condensateur C1 : $\Delta VC1 = 100 \text{ mV}$.
- Fréquence de commutation : $f = 3.9 \text{ KHz}$

Détermination des valeurs de L, C1 et C2 :

$$L \geq \frac{V_{pv}}{4 \cdot \Delta iL_{\max} \cdot f} \rightarrow L \geq \frac{17.14}{4 \times 0.4 \times 3.9 \times 10^3} \quad L \geq 2.724 \text{ mH}.$$

En pratique, l'inductance utilisé est à noyau de fer, qui présente comme valeur $L = 3.25 \text{ mH}$.

Pour respecter la condition sur l'ondulation de la tension de sortie, la capacité du condensateur C2 doit vérifier l'expression :

$$C2 \geq \frac{\Delta iL}{4 \cdot \Delta Vc_{\max} \cdot f} \rightarrow C2 \geq \frac{0.4}{4 \times 0.1 \times 3.9 \times 10^3} \quad C2 \geq 256 \mu\text{F}.$$

La valeur que nous utiliserons est $330 \mu\text{F}$.

Pour la tension d'entrée, le condensateur choisi présente : $C1 = 220 \mu\text{F}$.

Bibliographies

BIBLIOGRAPHIES

- [1] **BOUKHERS Djamil** «Optimisation d'un Système d'énergie Photovoltaïque Application Au Pompage» » mémoire de magister, Université de Mentouri. Constantine 2007.
- [2] **K. Benlarbi** « Optimisation Floue, Neuronale et Neuro-Floue d'un système de Pompage Photovoltaïque Entraînées par différents machines électriques », Thèse de Magister, Université de Batna 2003.
- [3] **R.REZOUG** et **A.LOUAR** « étude et réalisation d'un variateur de vitesse (hacheur) à basse d'IGBT», mémoire d'ingénieur, université de Oum-Al Bouagui.
- [4] **A. T.SINGO** « Système d'alimentation photovoltaïque avec stockage hybride pour l'habitat énergétiquement autonome» Thèse de doctorats, université Henri Poincaré, Nancy-I,2010.
- [5] **M. Djarallah** « contribution a l'étude des systèmes photovoltaïques résidentiels couples au réseau électrique», Thèse de doctorat université de Batna 2008.
- [6] - **B.Equer** « Le Pompage Photovoltaïque Manuel de cours », énergie solaire photovoltaïque ellipses 1993.
- [7] - **Y. Bakelli** « étude et dimensionnement d'un convertisseur statique pour la connexion d'un générateur photovoltaïque » mémoire de magister, Université de Boumerdes 2005.
- [8] - **A. Betka** « Optimisation d'un Système de Pompage Photovoltaïque au Fil du Soleil », Thèse de Magistère, Université de Biskra.1997.
- [09]. **CABAL Cédric**. «Optimisation énergétique de l'étage d'adaptation électronique dédié à la conversion photovoltaïque », thèse de doctorat, „université de Toulouse III.2008.
- [10]. **A. Cid-Pastor**, “Conception et réalisation de modules photovoltaïque électronique”, thèse de doctorat, Université Paul Sabatier, Toulouse 2006.
- [11]. www.total-energie.fr.
- [12] **HELALI KAMELIA** « Modélisation d'une cellule photovoltaïque : Etude comparative » thèse de Magister. Université Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou.2012

- [13]. **Vincent BENAMARA** «Étude et simulation d'un panneau solaire raccordé au réseau avec périphérique de stockage, mémoire d'ingénieur, MONTRÉAL 2012.
- [14]. **N. Achaïbou** «Introduction à l'Etude du Système de Stockage dans un Système Photovoltaïque». CDER Bouzaréah, Alger.
- [15]. Charge des batteries d'accumulateur au plomb. L'institut national de recherche et de sécurité. Mémoire technique.
- [16]. **Eric P. Usher and Michael M.D. Ross** «Recommended practices for charge controllers» Report IEA PVPS T3-05:1998.
- [17]. **James P. Dunlop, P.E.** « Batteries and Charge Control In Stand-Alone Photovoltaic Systems » Fundamentals and Application, January 15, 1997. Florida Solar Energy Centre.
- [18]. **Laszlo. Balogh** «Implementing Multi-State Charge Algorithm with the UC3 909 Switch mode Lead-Acid Battery Charger Controller », U-155 Application Note, Unitrode Product & Applications Handbook, 1997, pp. 3-488 -3-5 16.
- [19] **S.Ait-cheikh**, Etude, « Investigation et conception d'algorithmes de commande appliqués aux systèmes photovoltaïques », thèse de Doctorat d'état, école nationale polytechnique, Alger,Algerie,2007.
- [20] Wei Gu, Dongbing Zhang, Designing a SEPIC Converter. National Semi-conductor Application Note 1484, April 30, 2008.
- [21]. <http://www.raggiopower.com/enview.php?id=3053&flid=227#>.
- [22]. **Rahmoune Karima et Zouzou Sara** « simulation et implémentation de MPPT d'un panneau solaire » mémoire d'ingénieur, Universitaire de Biskra, 2010.
-
-