

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

UNIVERSITÉ IBN-KHALDOUN DE TIARET

FACULTÉ DES SCIENCES APPLIQUÉES

DÉPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE



MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

Pour l'obtention du diplôme de Master

Domaine : Sciences et Technologie

Filière : Electronique

Spécialité : Électronique des systèmes embarqués

THÈME

**Réalisation et optimisation des régulateurs
de charge solaire**

Préparé par :

- *Yamani Abdelhamid*
- *Diba Chehba Achwak*

Devant le Jury :

Nom et prénoms	Université	Qualité
M.Mohamed KOUADRIA	U-Tiaret	Président
M. Belgacem SAHLI	U-Tiaret	Examineur
M. Djilali NASRI	U-Tiaret	Co-Encadreur
M. Mustapha BELARBI	U-Tiaret	Encadreur

PROMOTION 2019 /2020

Remerciement

Nous tenons tout d'abord à remercier Allah, qui nous a donné la force et la patience d'accomplir ce modeste travail.

En second lieu, nous tenons à remercier Mr Djilali Nasri & Mr Mustapha Belarbi enseignants à l'université Ibn-Khaldoun Tiaret, pour leur bienveillance, disponibilité, remarques et surtout pour leurs conseils, et leurs patiences.

Nous voudrions également remercier les membres du jury pour avoir accepté et d'évaluer ce travail et pour toutes leurs remarques et critiques, ainsi que les enseignants du Département Génie Electrique à l'Université d'Ibn Khaldoun.

Nous tenons aussi un remerciement spécial pour nous enseignants de la promotion de 2020 Master Electronique des systèmes embarqués pour leur soutien.

Nous remercions enfin tous ceux qui, d'une manière ou d'une autre, ont contribué à la réussite de ce travail et qui n'ont pas pu être cités ici.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail :

A mes très chers parents ;

Mon père mon exemple éternel, mon soutien moral et ma source de joie et de bonheur, celui qui s'est toujours sacrifié pour me voir réussir, que dieu te garde pour nous.

Ma mère, ma force et celle qui n'a pas cessé de m'encourager et de prier pour moi, qui m'a soutenu et m'entouré d'amour et qui a fait tout pour ma réussite, puisse dieu te préserve et t'accorder santé, longue vie et bonheur.

A mon adorable Sœur Manel et mes frères Abdelkader et Rayen, à tous les membres de la famille Yamani , à Yusra pour la beauté de la vie qu'elle m'as offerte et le soutien dont elle a fait preuve pendant toute la durée de cette thèse, vous avez toujours été présents pour les bons conseils et pour m'encourager, je vous dédie ce travail avec tous mes vœux de bonheur, de santé et de réussite.

Aux membres de club Scientifique Eureka pour leur sincère amitié, leur soutien inconditionnel et leur encouragement.

Aux personnes qui m'ont toujours aidé et encouragé, qui étaient toujours à mes côtés, et qui m'ont accompagné durant mon chemin d'études.

Et enfin je la dédie à toute ma promotion de 2^{ème} Année Master Electronique.

Yamani Abdelhamid

Dédicace

Je rends grâce à Dieu de m'avoir donné le courage et la patience pour faire mon devoir.

Je dédie ce travail à mes parents qui ont consacré leur vie à veiller à ma réussite et m'ont donné toute leur affection, bénédiction et amour.

Je tiens également à remercier toute personne ayant contribué de près ou de loin à la concrétisation de ce mémoire.

Diba Chehba Achwak

Sommaire

Sommaire

LISTE DES FIGURES	1
INTRODUCTION GENERALE	3
CHAPITRE I : GENERALITES SUR LES SYSTEMES PHOTOVOLTAÏQUES	
1. Introduction :.....	5
2. Energies Renouvelable :	5
3. Energie photovoltaïque :.....	5
4. Structure d'un système photovoltaïque :.....	6
5. La Cellule Photovoltaïque :.....	6
5.1 Les différents types de cellules solaires photovoltaïques :.....	7
5.2 Fonctionnement de la cellule photovoltaïque :	7
5.3 Modélisation de la cellule photovoltaïque :.....	9
5.3.1 Cellule PV idéale - Modèle simple :	9
5.3.2 Cellule PV réelle - Modèle précis :.....	10
5.4 Caractéristique Courant I / Tension V :	11
5.5 Les différents paramètres qui influent sur la cellule solaire :.....	13
5.5.1 Effet de la variation d 'éclairage sur la caractéristique tension-courant.....	13
5.5.2 Effet de la variation de la température sur la caractéristique tension-courant :.....	14
5.6 Avantages et inconvénients de la conversion PV :	15
5.6.1 Avantages :	15
5.6.2 Limites :	16
6. Le Module Photovoltaïque :	16
6.1 Les caractéristiques d'un module PV :	17
6.1.1 La tension en circuit ouvert :.....	17
6.1.2 Le courant de court-circuit :.....	17
6.1.3 La puissance maximale :	17
6.1.4 Le rendement :.....	17
6.2 Association en série et en parallèle d'une module PV :	17
6.2.1 Association en série.....	18
6.2.2 Association en parallèle.....	18
7. Stockage de l'énergie avec des batteries.....	18
7.1 Les types de batteries :.....	19

7.2 Différents modèles de batterie solaire :	20
7.2.1 Batteries acide-au-plomb :	20
7.2.2 Batteries nickel-cadmium (NiCD) :	20
7.2.3 Batteries nickel-metal-hydrure (NiMH) :	20
7.3 Caractéristiques principales d'une batterie solaire [10] :	20
7.3.1 Poids et volume:	20
7.3.2 Tension:	20
7.3.3 Capacité:	21
7.3.4 Durée de vie:	21
7.4 Régulation de la charge/décharge :	21
8. Conclusion :	22

CHAPITRE II: REGULATEUR DE CHARGE SOLAIRE

1. Régulateur de charge solaire :	23
2. Les fonctions du régulateur de charge :	23
3. Les différents types de régulateur de charge :	25
3.1 Les régulateurs de charge shunt :	25
3.2 Les régulateurs de charge Série :	25
3.3 Les régulateurs de charge MLI :	26
3.4 Les régulateurs de charge MPPT :	26
4. La commande MPPT :	26
4.1 Classification des commandes MPPT selon le type de recherche :	26
4.2 Classification des commandes MPPT selon les paramètres d'entrée :	27
5. Aperçu des algorithmes MPPT :	28
5.1 L'algorithme MPPT de perturbation et observation :	28
5.2 Etude comparative :	29
6. Conception de régulateur de charge MPPT numérique :	30
6.1 Le Bloc d'Alimentation :	30
6.2 Le Bloc de puissance :	30
6.2.1 Circuit de protection contre les inversions de polarités	30
6.2.2 Circuit de protection sur les surintensités :	31
6.3 Le Bloc de commande :	33
6.3.1 Contrôleur de charge de la batterie :	33
6.3.2 Circuit de mesure :	34
6.3.2.1 Mesure des tensions :	34
6.3.2.2 Mesure de courant :	35
6.3.3 Isolation Galvanique :	37

6.3.4 Le microcontrôleur :	38
7. Conclusion :	42
CHAPITRE III : REVERSE ENGINEERING	
1. Introduction :	44
2. Reverse engineering :	44
2.1 Pourquoi inversons-nous les circuits imprimés ?	44
2.2 Processus de rétro-ingénierie d'une carte de circuit imprimé :	44
3. La rétro-ingénierie pour les circuits de régulateur de charge solaire :	45
3.1 Le régulateur de charge solaire SOLARIX:	45
3.2 Logiciels utilisés :	46
3.2.1 Logiciel de traitement d'image GIMP :	46
3.2.2 Logiciel de schématisation PROTEUS :	47
4. Les cartes électroniques SOLARIX PRS :	47
4.1 Solarix PRS 2020 :	48
4.1.1 Boîtier du circuit :	48
4.1.2 Les composantes du circuit :	48
4.1.3 Schéma du circuit SMD :	49
4.1.4 Traçage du circuit :	49
4.1.5 Traçage du Schéma sur ISIS :	50
4.2 Solarix PRS 1515 :	51
4.2.1 Boîtier du circuit :	51
4.2.2 Les composantes du circuit :	51
4.2.3 Schéma du circuit SMD :	52
4.2.4 Traçage du circuit :	52
4.2.5 Traçage du Schéma sur ISIS :	53
5. Analyse des circuits :	54
5.1 Caractéristiques du produit SOLARIX [22] :	54
5.2 Fonctions de protection électroniques [22] :	54
5.3 Affichages [22] :	55
6. Dimensionnement du régulateur de charge solaire :	55
6.1 Dimensionnement du bloc d'alimentation :	55
6.2 Dimensionnement du bloc de puissance :	55
6.2.1 Dimensionnements des circuits de protections contre inversion de polarité :	55
6.2.2 Dimensionnements des circuits de protection contre les surintensités :	57
6.3 Dimensionnement du bloc de commande :	59
6.3.1 Dimensionnement du circuit régulateur de charge de la batterie :	59

6.3.2	Mesure des tensions V_{pv} , V_{Batt} :.....	64
6.3.3	Isolation galvanique :	65
7.	Le schéma complet de régulateur de charge solaire :.....	66
8.	Conclusion.....	69
Annexe	30

LISTE DES FIGURES

CHAPITRE I : GENERALITES SUR LES SYSTEMES PHOTOVOLTAÏQUES

Figure I- 1: Schéma synoptique décrivant le système photovoltaïque le plus général	6
Figure I- 2 : Différents types de cellules solaires.....	7
Figure I- 3 : Diagrammes de bandes d'énergie au voisinage de la jonction	8
Figure I- 4 : Schéma du circuit électrique équivalent d'une cellule solaire idéale connectée à une charge	9
Figure I- 5 : Schéma du circuit électrique équivalent d'une cellule solaire réelle connectée à une charge.....	10
Figure I- 6 : Caractéristique U-I d'une cellule solaire en conditions	11
Figure I- 7: Caractéristique tension-courant d'un module formé de 36 cellules	12
Figure I- 8 : Caractéristique tension-puissance d'un module PV	13
Figure I- 9 : Effet sur la caractéristique tension-courant d'une variation.....	14
Figure I- 10 : Caractéristique tension-courant en fonction de la température des cellules	14
Figure I- 11 : Lieu des points à puissance optimum	15
Figure I- 12 : Configuration des cellules photovoltaïques	16
Figure I- 13: Caractéristique résultante d'un groupement de n s cellules en série.	18
Figure I- 14 : Caractéristique résultante d'un groupement de np cellules en parallèle	18

CHAPITRE II: REGULATEUR DE CHARGE SOLAIRE

Figure II 1 : Schéma de base d'un régulateur de charge.....	23
Figure II 2 : Régulateur charge/décharge [13].....	24
Figure II 3: Principes de fonctionnements d'un régulateur de charge de type shunt.....	25
Figure II 4: Principes de fonctionnements d'un régulateur de charge de type série.....	25
Figure II 5: Algorithme d'une commande MPPT basée sur la méthode P&O [25]	29
Figure II 6: Bloc Alimentation DC 5V	30
Figure II 7 : Circuit de protection contre inversion de polarité	31
Figure II 8 : Circuit de protection contre les surintensités.....	32
Figure II 9 : Schéma bloc d'un circuit de protection hybrid contre les surintensités	33
Figure II 10 : Circuit de commutation du contrôleur de charge de la batterie du panneau solaire.....	34
Figure II 11 : Diviseur de tension	35
Figure II 12 : Schéma du circuit de détection de courant	36
Figure II 13 : Capteur de courant ACS712	37
Figure II 14 : Circuit d'isolation galvanique Optocoupler 4N25.....	38
Figure II 15 : Architecture interne du PIC 16F877A.....	39

CHAPITRE III : REVERSE ENGINEERING

Figure III- 1 : Processus de rétro-ingénierie d'une carte de circuit imprimé	44
Figure III- 2 :Boîtier de régulateur de charge solaire SOLARIX PRS [22]	45
Figure III- 3: Les données techniques des circuits Solarix PRS [22]	46
Figure III- 4: Les démarches à suivre et les logiciels utilisés pour obtenir le schéma du circuit électronique	46

Figure III- 5: Exemple d'une photo d'un circuit électronique traiter avec l'outil GIMP	47
Figure III- 6: Exemple d'un schéma créé sous le logiciel ISIS	47
Figure III- 7: Boitier de régulateur de charge solaire Solarix PRS 2020.....	48
Figure III- 8: Face supérieure du circuit Solarix PRS 2020	49
Figure III- 9: Face supérieure et inférieur du circuit Solarix PRS 2020.....	49
Figure III- 10: Face supérieure avec traçage du circuit Solarix PRS 2020	49
Figure III- 11: Le schéma complet de la carte de Solarix PRS 2020	50
Figure III- 12: Boitier de régulateur de charge solaire Solarix PRS 1515.....	51
Figure III- 13: Face supérieure du circuit Solarix PRS 1515	52
Figure III- 14: Face supérieure et inférieur du circuit Solarix PRS 1515.....	52
Figure III- 15: Face supérieure avec traçage du circuit Solarix PRS 1515	52
Figure III- 16: Le schéma complet de la carte de Solarix PRS 1515	53
Figure III- 17 : Bloc d'Alimentation DC 5V.....	55
Figure III- 18 : Circuit de protection contre inversion de polarité	56
Figure III- 19 : Circuit de protection contre inversion de polarité (Polarité Inversé) Circuit Bloquée	56
Figure III- 20: Circuit de protection contre inversion de polarité (Polarité Directe) Circuit Ouverte.....	56
Figure III- 21: Circuit de protection contre les sur intensité	57
Figure III- 22: Test de Circuit de protection contre les sur intensité ($I_s > 6A$ - Court-circuit)	58
Figure III- 23: Test de Circuit de protection contre les sur intensité ($I_s < 6A$ - Etat normal).....	58
Figure III- 24 : Circuit chargeur de la batterie.....	59
Figure III- 25: Organigramme de régulateur de charge PWM	60
Figure III- 26: Circuit de régulateur de charge PWM à base du pic 16F877	61
Figure III- 27: Signal PWM avec un cycle de service de 50%.....	62
Figure III- 28: Tension de commande et de sortir du circuit chargeur de batterie (le panneau solaire de 21V)	63
Figure III- 29: Tension de commande et de sortir du circuit chargeur de batterie (le panneau de 18V).....	63
Figure III- 30: Tension de commande et de sortir du circuit chargeur de batterie (le panneau de 15V).....	64
Figure III- 31: Schéma de diviseur de tension.....	65
Figure III- 32: Broches du 4N25	65
Figure III- 33: Circuit d'isolation partie commande et puissance	66
Figure III- 34 : Organigramme de la carte de régulateur de charge solaire.....	66
Figure III- 35 : Le schéma complet de la carte de régulateur de charge solaire.....	68

Introduction Général

Introduction Générale

Depuis quelques années, la communauté scientifique est concentrée sur la menace présumée la plus préoccupante pour l'avenir de la planète : le réchauffement climatique. Ce phénomène est la conséquence de l'augmentation des émissions de gaz à effet de serre liées à l'activité humaine.

Les énergies renouvelables se manifestent comme une solution potentielle à la réduction des émissions de gaz à effet de serre. Parmi les moyens de production prometteurs micro éolien, micro hydraulique, et le photovoltaïque (PV) qui apparaît aujourd'hui comme le plus approprié et le plus abouti à la production d'électricité d'origine renouvelable pour l'habitat.

Il existe de nombreux sites isolés dans le monde, alimentés par des systèmes autonomes de génération d'électricité, ces générateurs utilisent les sources renouvelables locales, on y trouve des panneaux photovoltaïques, des éoliennes et des microturbines, l'électricité provenant des sources renouvelables est intermittente, et dépendante des conditions climatiques.

L'énergie PV est obtenue directement à partir du rayonnement du soleil, elle peut même se transformer en énergie électrique grâce à l'effet photovoltaïque, les panneaux PV composés des cellules PV ont la capacité de transformer les photons en électrons l'énergie sous forme de courant continu est ainsi utilisable.

Les panneaux solaires, bien qu'ils soient en plus performants, ont des rendements qui restent assez faibles , c'est pourquoi il faut exploiter le maximum de puissances qu'ils peuvent générer en réduisant au maximum les pertes d'énergie, une caractéristique électrique importante de ces panneaux est que la puissance maximale disponible est fournie seulement en un seul point de fonctionnement appelé le point de puissance maximale (MPP : Maximum power point), définie par une tension et un courant donné, ce point se déplace en fonction des conditions météorologiques (ensoleillement, température, etc.) , ce rendement peut être amélioré par des solutions utilisant le techniques de poursuite du point de puissance maximale (dite technique MPPT : Maximum power point tracking),cette technique fait appel à une interface entre le panneau et la charge qui est généralement un dispositif de conversion de puissance.

L'objectif principal de notre travail est l'étude d'un circuit électronique d'un régulateur de charge solaire qui permet d'extraire le maximum de puissance disponible à partir du générateur photovoltaïque (GPV) et donc améliorer le rendement de la chaîne de système solaire.

Afin de mener à bien notre travail nous avons adopté la méthodologie suivante :

Dans le premier chapitre, nous avons présenté des généralités concernant les systèmes photovoltaïques, des définitions sur l'énergie photovoltaïque et la structure d'un système photovoltaïque (La cellule PV , le module PV et le système de stockage de l'énergie) .

Introduction Générale

Le second chapitre se caractérise par des notions sur les régulateurs de charge solaire leurs rôles sur la chaîne du système solaire et ces différents types dans notre étude nous avons étudié le régulateur MPPT, nous avons cité les classifications des commandes MPPT ensuite les algorithmes MPPT donnant des définitions pour quelques algorithmes et une étude comparative entre eux, passant vers une étude théorique des différents blocs d'alimentation, Puissance expliquant les circuits de protections et enfin le bloc de commande qui contient le contrôleur de charge de la batterie, les circuits de mesure, le microcontrôleur et l'isolation galvanique.

Le troisième chapitre présente le processus de rétro-ingénierie du circuit de régulateur de charge solaire le schéma électrique obtenu et sa caractéristique après on a fait le dimensionnement de la carte de régulateur de charge solaire proposée.

Enfin, nous terminerons notre travail par une conclusion générale.

Chapitre I :
GENERALITES SUR
LES SYSTEMES
PHOTOVOLTAÏQUES

1. Introduction :

Les énergies renouvelables sont ainsi multiples et fondamentalement diverses par leurs mécanismes physiques, chimiques ou biologiques. On parle de nos jours d'énergie renouvelables pour désigner en fait des sources anciennes dont la mise en œuvre est optimisée avec des technologies modernes ou bien d'énergies dont le principe est entièrement nouveau, comme le photovoltaïque où la lumière du soleil produit directement de l'électricité.

2. Energies Renouvelable :

Les énergies renouvelables connaissent depuis le milieu de l'année 1990 une vogue qui semble se renforcer d'année en année. Ces énergies sont les plus anciennement utilisées par l'humanité, elles sont essentiellement tirées des cinq éléments : la terre, l'eau, l'air et le feu et du soleil. Les énergies renouvelables sont inépuisables et d'un usage immémorial. On désigne aujourd'hui par énergies renouvelables un ensemble de filières diversifiées dont la mise en oeuvre n'entraîne en aucune façon l'extinction de la ressource initiale. Les sources d'énergie renouvelables sont celles qui produisent de l'électricité ou de l'énergie thermique sans épuiser nos ressources. En font partie les énergies solaire, éolienne, hydraulique et géothermique, et celles que l'on tire de la biomasse et des déchets. Tirées du vent, l'énergie éolienne permet la production d'électricité. Provenant du soleil, le solaire photovoltaïque permet la production d'électricité, de même que le solaire thermodynamique, tandis que le solaire thermique permet la production de chaleur ou de froid. Extrayant la chaleur de la terre, la géothermie conduit à l'obtention de chaleur, de froid ou d'électricité [1].

3. Energie photovoltaïque :

L'énergie solaire photovoltaïque provient de la transformation directe d'une partie du rayonnement solaire en énergie électrique. Cette conversion d'énergie s'effectue par un phénomène physique appelé effet photovoltaïque qui consiste à produire une force électromotrice lorsque la surface de la cellule PV est exposée à la lumière. La tension générée peut varier en fonction du matériau utilisé pour la fabrication de la cellule. L'association de plusieurs cellules PV en série/parallèle donnent lieu à un générateur photovoltaïque (GPV) qui a une caractéristique courant-tension (I-V) non linéaire présentant un point de puissance maximale [2].

4. Structure d'un système photovoltaïque :

Bien que fondamental dans la chaîne que représente un système, le module photovoltaïque à lui seul ne peut pas grand-chose : pour répondre à un besoin défini, il faut en fait l'associer étroitement à un système complet correspondant à une application bien spécifique. Un système photovoltaïque sera donc constitué d'un générateur PV, généralement associé à l'un ou plusieurs des éléments suivants :

- Un système d'orientation ou de suivi (rencontré assez rarement sous nos latitudes),
- Une gestion électronique (stockage, mise en forme du courant, transfert de l'énergie),
- Un stockage palliant la nature aléatoire de la source solaire,
- Un convertisseur DC/AC
- Une charge en courant continu basse tension ou en courant alternatif standard [3].

La Figure I-1 représente symboliquement les divers éléments du système le plus général. Dans la pratique, bien sûr, les systèmes utilisent les éléments appropriés au type de charge et aux

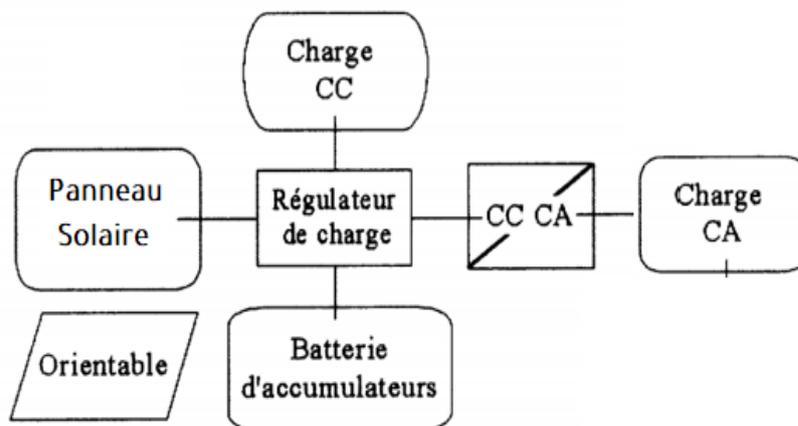


Figure I- 1: Schéma synoptique décrivant le système photovoltaïque le plus général conditions locales.

5. La Cellule Photovoltaïque :

L'effet photovoltaïque correspond à l'apparition d'une différence de potentiel entre les deux côtés d'une jonction semi-conductrice sous l'action d'une radiation lumineuse. Cette conversion photovoltaïque est effectuée à l'aide des cellules photovoltaïques fabriquées généralement en silicium cristallin. Si une charge est placée aux bornes de la cellule, les électrons de la zone N rejoignent les trous de la zone P via la connexion extérieure, donnant naissance à une différence de potentiel et un courant électrique circule [4] , (Figure I-2).

5.1 Les différents types de cellules solaires photovoltaïques :

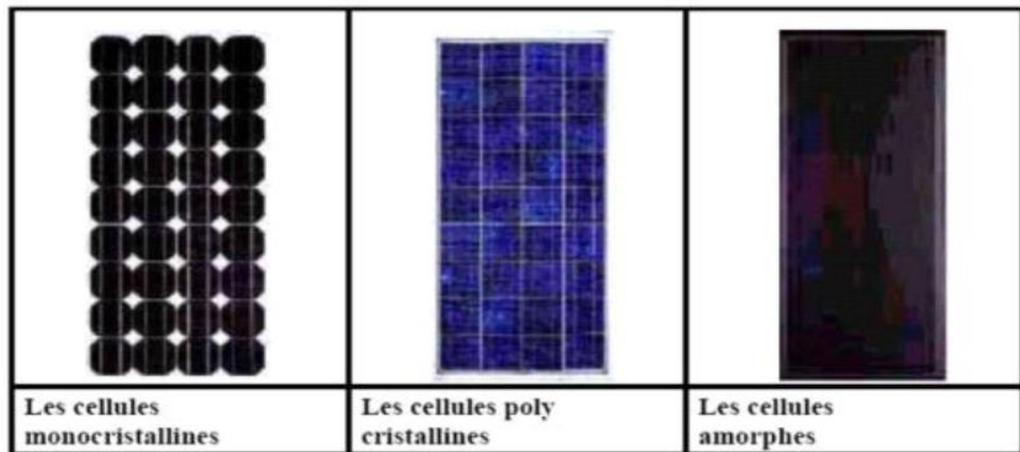


Figure I- 2 : Différents types de cellules solaires

Les cellules photovoltaïques sont constituées de semi-conducteurs à base de silicium (Si), de germanium (Ge), de sélénium (Se), de sulfure de cadmium (CdS), de tellure de cadmium (CdTe) ou d'arséniure de gallium (GaAs). Le silicium est actuellement le matériau le plus utilisé pour fabriquer les cellules photovoltaïques, car il est très abondant dans la nature. On le trouve dans la nature sous forme de pierre de silice. La silice est un composé chimique (dioxyde de silicium) et un minéral de formule SiO_2 . Il est le principal constituant des roches sédimentaires détritiques (sables, grès).

- Les différents types de cellules PV existants sont :

- Cellule en silicium amorphe (rendement : 6 à 10%)
- Cellule en silicium monocristallin (rendement : 13 à 17%)
- Cellule en silicium polycristallin (rendement : 11 à 15%)
- Cellule Tandem
- Cellule en matériaux organiques (rendement : 3.6%)

5.2 Fonctionnement de la cellule photovoltaïque :

Le fonctionnement des cellules PV repose sur un effet physique appelé : l'effet photovoltaïque, qui se traduit par la transformation directe de la lumière en électricité (courant continu cc). Son principe réside en une collision des photons incidents (flux lumineux) avec les électrons libres et les électrons de valence en leur communiquant une énergie ($h\nu$), si cette énergie est supérieure ou égale à l'énergie de gap de ce semi-conducteur ($E_g = E_C - E_V$), l'électron passe de la bande de valence à la bande de conduction en laissant un trou derrière lui, d'où l'apparition des paires électron-trou dans différents points de la jonction figure (I-3). Donc toute particule

minoritaire près de la jonction a une probabilité très forte pour la traverser et la jonction s'oppose uniquement le passage des porteurs majoritaires.

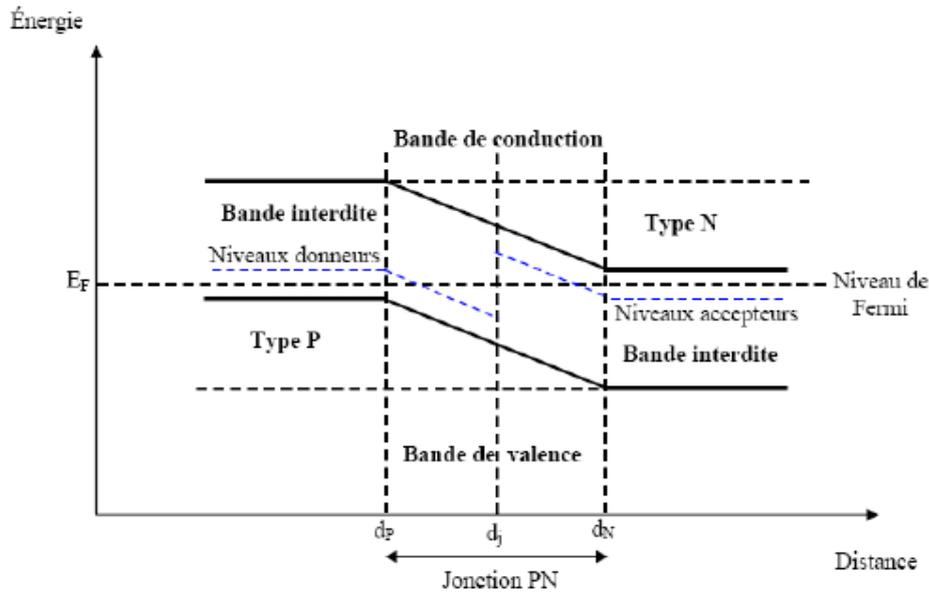


Figure I- 3 : Diagrammes de bandes d'énergie au voisinage de la jonction

Si les photons ont une énergie très supérieure à E_g , ils passent de la bande de valence à un niveau instable de la bande de conduction. L'excès d'énergie sera transmis sous forme de phonons au réseau cristallin puis perdu en chaleur et l'électron prendra un niveau stable dans la bande de conduction.

Si les photons ont une énergie inférieure E_g ils ne seront pas absorbés et leurs énergies ne contribuent pas à la conversion photovoltaïque. La longueur d'onde correspondant au maximum de photons est de l'ordre de 650nm- 670nm.

L'expression qui exprime l'énergie d'un photon est donnée par la relation :

$$E = \frac{h \cdot c}{\lambda} \quad \text{I-1}$$

Où :

h : La constante de Planck.

λ : Longueur d'onde.

c : La vitesse de la lumière.

Ainsi, plus la longueur d'onde est courte, plus l'énergie du photon est grande. Cette découverte valut à Albert Einstein le prix Nobel en 1905.

De même, toute l'énergie des photons n'arrivant pas à se transformer en électricité est absorbée par le matériau sous forme thermique.

5.3 Modélisation de la cellule photovoltaïque :

5.3.1 Cellule PV idéale - Modèle simple :

Une cellule PV idéale peut être représentée par le circuit électrique équivalent illustrer sur la figure (I-4). Ce circuit est constitué d'une diode qui représente la jonction P-N de la cellule, et d'une source de courant constant dont l'amplitude du courant dépend de l'intensité du rayonnement, une résistance ajustable est connectée à la cellule en guise de charge. L'utilisation du circuit électrique équivalent permet de modéliser les caractéristiques ou le comportement de la

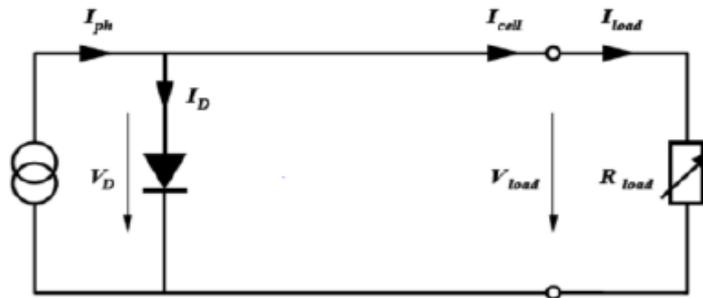


Figure I- 4 : Schéma du circuit électrique équivalent d'une cellule solaire idéale connectée à une charge

cellule PV.

Avec :

I_{ph} : photo-courant.

I_{cell} : courant délivré par la cellule.

V_{cell} : tension aux bornes de la cellule.

I_{load} : courant à travers la charge.

I_D : courant à travers la diode.

V_{load} : tension aux bornes de la charge.

Le courant de la cellule PV idéale illuminée est donné par (Loi de Kirchoff)

$$I_{cell} = I_{ph} - I_D = I_{ph} - I_s \left(e^{\frac{qV_{cell}}{nkT}} - 1 \right) \quad \text{I-2}$$

avec :

I_{ce} : courant fourni par la cellule [A]

V_{cell} : tension aux bornes de la cellule [V]

q: charge électrique élémentaire [$1.6 \cdot 10^{-19} \text{As}$]

k : constante de Boltzmann [$8.5 \cdot 10^{-5} \text{eV} / k = 1.381 \cdot 10^{-23} / \text{J}$]

T : température absolue de la cellule

I_s : courant de saturation de la jonction non éclairée [A]

n : facteur d'idéalité de la jonction

Le courant de saturation I_s caractérise le phénomène de diffusion des porteurs minoritaires dans la zone de déplétion.

Lorsque les bornes du circuit sont court circuité ($R_{load}= 0$), la tension de sortie est nulle, d'après L'équation (I.1), le courant fournit par la cellule est à son maximum. Ce courant est appelé courant de court-circuit I (short-circuit).

$$I_{sc} = I_{ph} \quad \text{I-3}$$

Pour une charge infiniment grande (circuit ouvert), le courant de sortie est nul et la tension aux bornes de la cellule est maximale. Cette tension est appelée tension de circuit ouvert V (open-circuit). A partir de l'équation (I.2), on peut écrire :

$$V_{th} = \frac{nkT}{q} \ln \left(\frac{I_{ph}}{I_s} + 1 \right) = V_{th} \ln \left(\frac{I_{ph}}{I_s} + 1 \right) \quad \text{I-4}$$

$V_{th} = \frac{nkT}{q}$, est appelée tension thermique.

V_{oc} est déterminé par les propriétés du semi-conducteur, car il dépend de I_s qui lui-même dépend de la densité de courant de saturation du matériau utilisé.

5.3.2 Cellule PV réelle - Modèle précis :

En ce qui concerne le comportement d'une cellule solaire réelle, deux résistances parasites sont prises en considération pour une description plus exacte [5] .

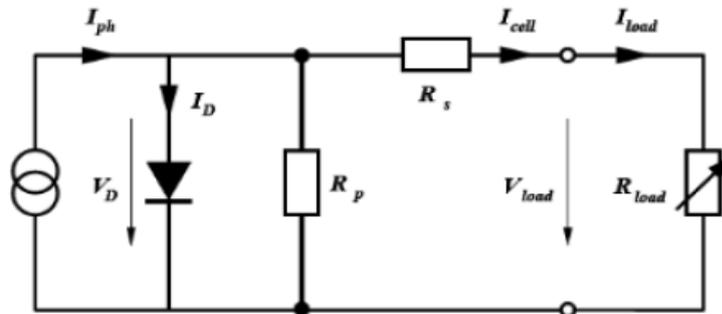


Figure I- 5 : Schéma du circuit électrique équivalent d'une cellule solaire réelle connectée à une charge

Avec :

R_p résistance parallèle caractérisant le courant de fuite à la surface de la cellule dû à l non idéalité de la jonction P-N et des impuretés près de la jonction.

R_s résistance série représentant les diverses résistances de contact et la résistance du semiconducteur.

En pratique, la résistance parallèle R_p est très importante (de l'ordre du méga Ohm) et la résistance série R_s est très faible (de l'ordre de quelques milli-ohms).

Avec un tel circuit électrique équivalent, on peut écrire :

$$I_{cell} = I_{ph} - I_D - \frac{V_D}{R_p} \quad \mathbf{I-5}$$

$$I_D = I_{ph} \left(e^{\frac{V_D}{V_{th}}} - 1 \right) \quad \mathbf{I-6}$$

$$V_{cell} = V_{cell} + R_s I_{cell} \quad \mathbf{I-7}$$

D'où :

$$I_{cell} = I_{ph} - I_s \left(e^{\frac{(V_{cell}) + R_s I_{cell}}{V_{th}}} - 1 \right) - \frac{V_{cell} + R_s I_{cell}}{R_p} \quad \mathbf{I-8}$$

5.4 Caractéristique Courant I / Tension V :

Une cellule solaire est caractérisée par une relation entre la tension u et le courant i à ses bornes. L'allure de cette relation est indiquée à la figure suivante : [6]

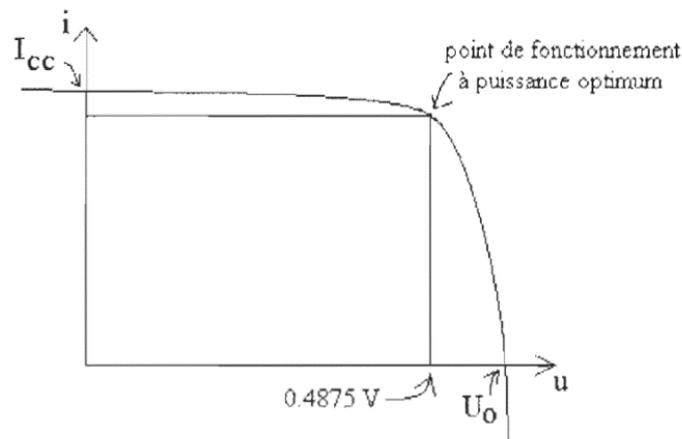


Figure I- 6 : Caractéristique U-I d'une cellule solaire en conditions

La tension fournie par une cellule solaire est assez faible, un peu moins de 0.5 V au point de puissance optimale pour une cellule au silicium cristallin.

Cette tension est insuffisante pour la plupart des utilisations, pour cette raison, un module contient habituellement plusieurs cellules connectées en série.

Dans ces conditions, le courant que peut débiter le module n'est pas plus grand que celui que peut fournir une cellule. Par contre, la tension du module est la somme des tensions des cellules. Donc, si le module contient n cellules identiques éclairées de la même façon, sa tension est n fois plus grande que celle d'une cellule.

Autrement dit, la caractéristique tension-courant du module s'obtient en dilatant la caractéristique tension-courant d'une cellule d'un facteur n dans le sens horizontal. On peut encore, ce qui revient au même, garder le graphe inchangé, mais réduire l'échelle des tensions d'un facteur n [6] .

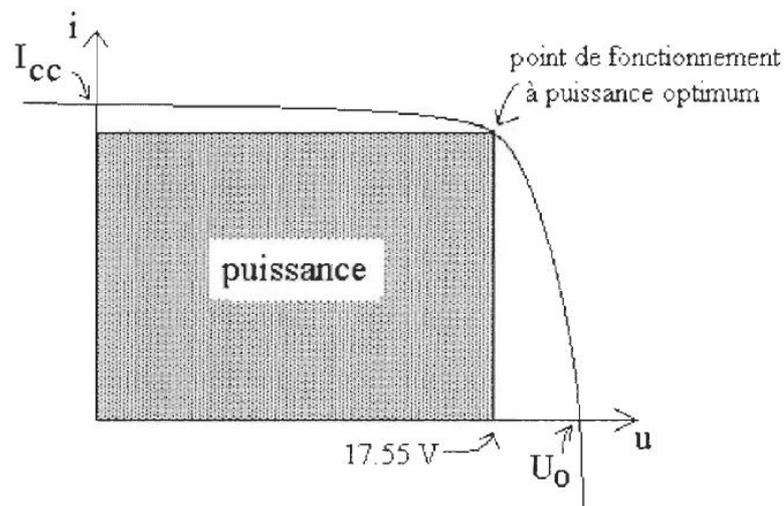


Figure I- 7: Caractéristique tension-courant d'un module formé de 36 cellules

Dans notre cas, il s'agit de la puissance débitée par la cellule ou le module solaire. Cette puissance dépend fortement de la charge à laquelle la cellule est connectée, car c'est cette charge qui fixe le point de fonctionnement. Si le point de fonctionnement correspond à un courant nul (fonctionnement à vide) ou à tension nulle (fonctionnement en court-circuit), il est clair que la puissance débitée $p = u \cdot i$ est nulle. Entre ces deux cas particuliers, la puissance fournie est positive. La puissance correspond à l'aire du rectangle dont les axes forment deux côtés et le point de fonctionnement un angle comme la montre la figure I-8.

Il existe un point particulier pour lequel la puissance fournie est maximum.

La façon dont la puissance évolue lorsque l'on s'éloigne de la tension optimum est indiquée à la figure suivante :

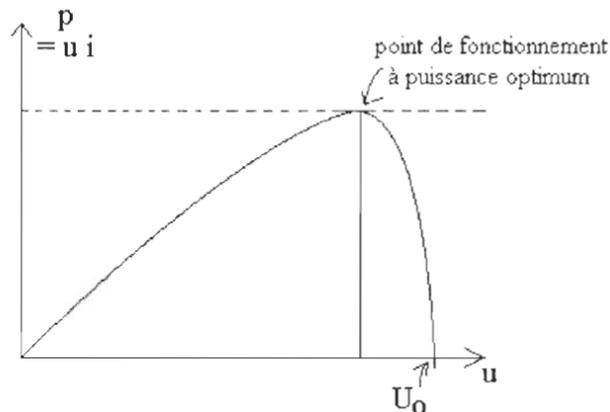


Figure I- 8 : Caractéristique tension-puissance d'un module PV

Propriété intéressante du point à puissance maximum : $\frac{du}{di} = \frac{u}{i}$.

5.5 Les différents paramètres qui influent sur la cellule solaire :

5.5.1 Effet de la variation d'éclairement sur la caractéristique tension-courant

La caractéristique tension-courant examinée à la figure I-8 correspond à un éclairement donné (par exemple l'éclairement nominal, de $1000 \text{ W } m^{-2}$). Pour un éclairement différent, on obtient une courbe présentant la même allure, mais située au-dessus (si l'éclairement est supérieur à $1000 \text{ W } m^{-2}$) ou en dessous (si l'éclairement est inférieur à $1000 \text{ W } m^{-2}$).

Si l'éclairement est nul, la caractéristique tension-courant passe par l'origine des axes. En effet, dans le cas contraire, certains points de la caractéristique correspondraient à une production d'énergie, ce qui est impossible dans l'obscurité. Cette caractéristique porte le nom de caractéristique d'obscurité. Tous ses points correspondent à des situations où la cellule absorbe de l'énergie électrique.

On observe que les différentes caractéristiques tension-courant correspondant à des éclairements différents ont pratiquement la même forme. Elles sont décalées par rapport à la caractéristique d'obscurité d'une distance proportionnelle au rayonnement solaire incident. Ce décalage s'effectue dans une direction presque verticale du diagramme (voir droite en pointillés sur le diagramme de la figure I-9).

La tension à vide, nulle dans l'obscurité, croît d'abord rapidement avec le rayonnement, mais prend bientôt une valeur presque constante. Le courant de court-circuit, par contre, reste à peu près proportionnel à l'éclairement jusqu'à des valeurs très élevées de celui-ci.

La tension et le courant correspondant à la puissance optimale croissent aussi avec le rayonnement incident. La figure I-9 indique quelle est l'allure du lieu des points à puissance optimale [3].

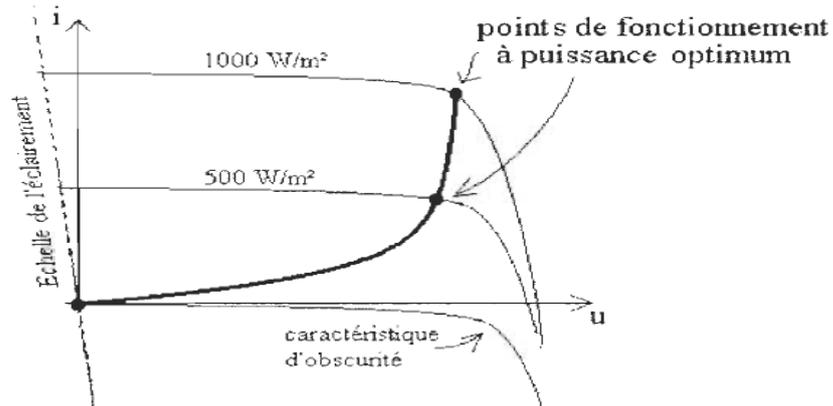


Figure I- 9 : Effet sur la caractéristique tension-courant d'une variation

La puissance optimale augmente avec l'éclairement, mais l'augmentation devient moins rapide aux forts niveaux d'éclairement.

5.5.2 Effet de la variation de la température sur la caractéristique tension-courant :

L'expérience montre que la tension à vide d'une cellule solaire diminue avec la température de la cellule. Un ordre de grandeur courant est de $2.3 \text{ mV } / \text{ } ^\circ\text{C} / \text{ cellule}$. Le courant de court-circuit, par contre, augmente légèrement avec la température de la cellule (environ 0.05 % par degré Celsius). L'influence de la température sur la caractéristique tension-courant est indiquée à la figure I-10 [6].

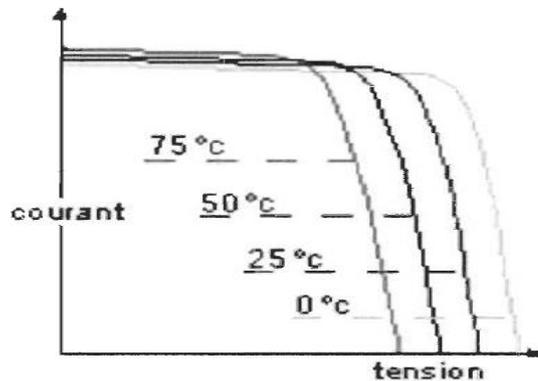


Figure I- 10 : Caractéristique tension-courant en fonction de la température des cellules

Comme la tension diminue plus vite avec la température et que le courant augmente, la puissance optimale diminue avec la température de la cellule.

En fait, la température des cellules est supérieure à la température ambiante, car, bien que la plus grande partie du rayonnement incident soit absorbée, la puissance électrique fournie par un module n'est qu'une petite partie de la puissance absorbée. La différence entre la puissance absorbée et la puissance fournie sous forme électrique correspond à un dégagement de chaleur.

La chaleur dégagée est évacuée par conduction jusqu'à la surface du module, puis par convection et rayonnement. On notera que l'efficacité de la convection dépend fortement de la vitesse du vent.

Les cellules solaires sont donc portées à une température supérieure à la température ambiante, la différence entre les deux températures dépend essentiellement du rayonnement incident. Cette différence diminue lorsque la puissance électrique produite ou la vitesse du vent augmente.

Ainsi, si l'on veut étudier sur un diagramme courant-tension le lieu des points à puissance optimale correspondant à une variation du rayonnement, les autres conditions ambiantes étant constantes, il faut considérer une température interne différente pour chaque valeur différente du rayonnement. On obtient ainsi un graphique tel que celui de la figure suivante:

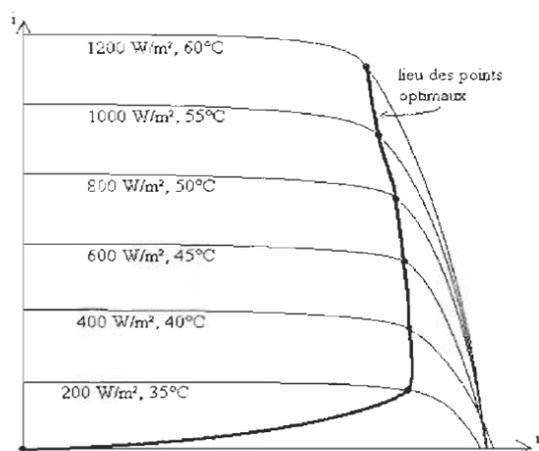


Figure I- 11 : Lieu des points à puissance optimum

5.6 Avantages et inconvénients de la conversion PV :

La conversion photovoltaïque est maintenant une technologie qui a fait ses preuves et qui s'annonce très prometteuse pour les affaires. Cette conversion est en mesure d'apporter un changement réel dans les communautés rurales ne bénéficiant pas de La conversion photovoltaïque est maintenant une technologie qui a fait ses preuves et qui s'annonce très prometteuse pour les affaires. Cette conversion est en mesure d'apporter un changement réel dans les communautés rurales ne bénéficiant pas de l'électricité et de créer une base commerciale pour les entrepreneurs dans des domaines à différentes échelles.

5.6.1 Avantages :

Les systèmes solaires électriques offrent de nombreux avantages, dont les suivants :

- Ils sont de fonctionnements sûrs, non polluants et silencieux.

- Ils sont très fiables.
- Ils n'exigent presque aucun entretien.
- Ils fonctionnent de façon rentable dans les régions éloignées et dans de nombreuses applications résidentielles et commerciales.
- Ils sont flexibles et peuvent être élargis à n'importe quel moment pour répondre à vos besoins en matière d'électricité.
- Ils vous donnent une autonomie accrue - fonctionnement indépendant du réseau ou système de secours pendant les pannes d'électricité.

5.6.2 Limites :

Vous devriez être également conscient des limites pratiques des systèmes PV :

- Ils ne conviennent pas aux utilisations à forte consommation d'énergie comme le chauffage. Si vous souhaitez utiliser l'énergie solaire à cette fin, considérez d'autres solutions de rechange comme un chauffe-eau solaire, qui produit de la chaleur beaucoup plus efficacement.
- Les systèmes raccordés au réseau sont rarement économiques, surtout parce que le coût actuel de la technologie PV est beaucoup plus élevé que celui de l'énergie traditionnelle. Étant donné que ces systèmes peuvent être coûteux.

6. Le Module Photovoltaïque :

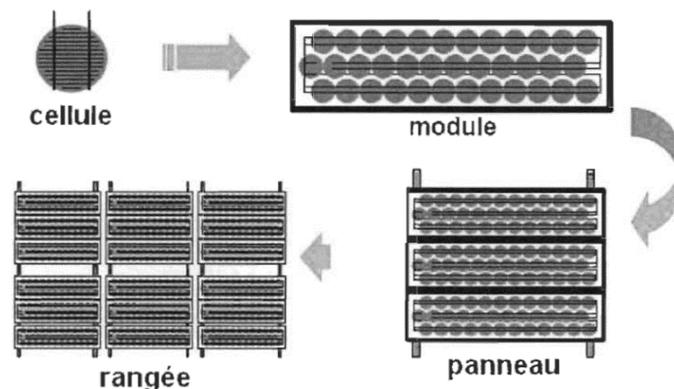


Figure I- 12 : Configuration des cellules photovoltaïques

Les cellules photovoltaïques sont reliées électriquement en série et/ou en parallèle pour produire des tensions et/ou des courants plus élevés. Les modules photovoltaïques se composent par des cellules photovoltaïques liés entre eux, ces modules peuvent former une unité d'un panneau photovoltaïque complet. Les panneaux photovoltaïques incluent plus d'un module de PV

assemblé comme unité pré câblée et peut s'installer sur place, qui est l'unité génératrice de puissance complète [7] .

6.1 Les caractéristiques d'un module PV :

6.1.1 La tension en circuit ouvert :

Si l'on place une photopile sous une source lumineuse constante, sans aucune charge à sa borne, celle-ci va produire une tension continue d'environ 0,6 V, appelée tension en circuit ouvert UCO ou à vide (elle varie légèrement avec la température et l'éclairement) [8] .

6.1.2 Le courant de court-circuit :

A l'inverse du cas précédent, si l'on place une photopile en court-circuit, elle va débiter un courant maximal à tension nulle. Ce courant est dit courant de court-circuit ICC , de plus, comme nous l'avons vu au paragraphe précédent, le photo-courant fourni par la cellule est proportionnel à l'intensité lumineuse et à la surface du panneau mis en œuvre, Ainsi, plus ces deux paramètres seront élevés, plus l'intensité produite sera grande [8] .

6.1.3 La puissance maximale :

L'objectif principal de l'utilisateur de générateur photovoltaïque est que l'énergie produite soit la plus optimale possible, c'est la puissance électrique maximum que peut fournir le module, qui est associé à une tension maximale U_m et à une intensité maximale I_m . Lorsqu'il est question de puissance maximale dans les conditions normalisées d'ensoleillement STC standard (25°C et un éclairement de 1000 W/m²), on parle alors de puissance crête, mesurée en watts-crête (Wc) [8].

6.1.4 Le rendement :

Le rendement énergétique est défini comme étant le rapport entre la puissance maximale produite et la puissance du rayonnement solaire parvenant au module. Soit S la surface du module et E l'éclairement en W/m², ce rendement a pour formule [8] :

$$\eta = \frac{P_m}{S * E} \quad \text{I-9}$$

Le facteur de forme pour une cellule de bonne qualité est supérieur à 0.7, Il diminue avec l'augmentation de la température.

6.2 Association en série et en parallèle d'une module PV :

Les modules peuvent également être connectés en série et en parallèle pour construire le champ photovoltaïque afin d'augmenter la tension et l'intensité d'utilisation. Toutefois, il importe

de prendre quelques précautions car l'existence de cellules moins efficaces ou l'occlusion d'une ou plusieurs cellules (dues à de l'ombrage, de la poussière ...etc) peuvent endommager les cellules de façon permanente [9].

6.2.1 Association en série

En additionnant des cellules ou des modules identiques en série, le courant de la branche reste le même mais la tension augmente proportionnellement au nombre de cellules (modules) en série.

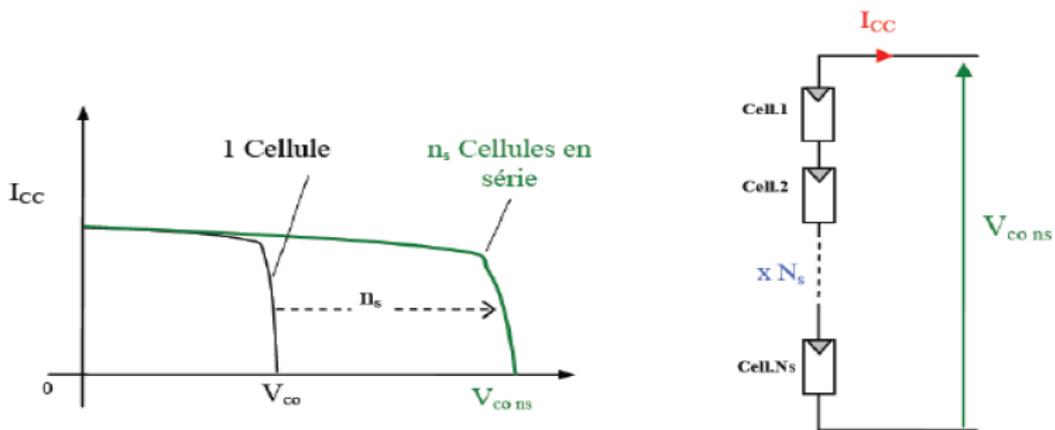


Figure I- 13: Caractéristique résultante d'un groupement de ns cellules en série.

6.2.2 Association en parallèle

En additionnant des modules ou cellules identiques en parallèle, la tension de la branche est égale à la tension de chaque module et l'intensité augmente proportionnellement au nombre de modules en parallèle dans la branche.

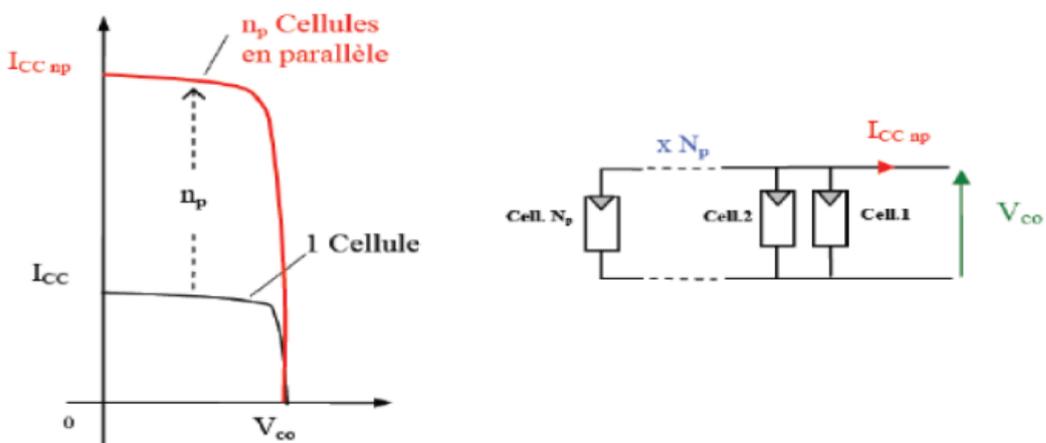


Figure I- 14 : Caractéristique résultante d'un groupement de np cellules en parallèle

7. Stockage de l'énergie avec des batteries

La batterie sert à stocker l'énergie produite par le champ de modules photovoltaïques. Il y a nécessité de stockage chaque fois que la demande énergétique est décalée dans le temps vis-à-vis de l'apport énergétique solaire.

En effet, la demande énergétique est une fonction de la charge à alimenter et les appareils utilisés. L'apport énergétique solaire est périodique (alternance jour/nuit). Ce décalage entre la demande et l'apport énergétique nécessite un stockage d'électricité.

Le système tampon utilisé le plus couramment pour les systèmes photovoltaïques est les batteries d'accumulateurs électrochimiques.

Les batteries sont des accumulateurs d'énergie, ont une durée de vie et un nombre de cycles prédéterminés à l'avance par le climat (température ambiante) et par le type d'utilisation que l'on va en faire (profondeur de décharge). Le coût de l'investissement et le coût induit par leur durée de vie, vont dépendre de leur qualité de fabrication et du type de technologie.

Dans un système photovoltaïque, la batterie remplit trois fonctions importantes :

- Autonomie : Une batterie permet de répondre aux besoins de la charge en tout temps, même la nuit ou par temps nuageux.
- Courant de surcharge : Une batterie permet de fournir un courant de surcharge pendant quelques instants, c'est-à-dire un courant plus élevé que celui que peut fournir le champ photovoltaïque. Ceci est nécessaire pour faire démarrer les moteurs et les autres appareils requérant un courant de démarrage de 3 à 5 fois supérieur au courant d'utilisation.
- Stabilisation de la tension : Une batterie permet de fournir une tension constante, en éliminant les écarts de tension du champ photovoltaïque et en permettant aux appareils un fonctionnement à une tension optimisée.

7.1 Les types de batteries :

Il existe deux types de batteries :

- Les batteries ouvertes : sont des batteries au plomb contenant de l'électrolyte liquide dont l'eau doit être contrôlée.
- Les batteries étanches : ne contiennent pas de liquide, mais du gel. Ainsi, elles peuvent fonctionner dans toutes les positions et ne demandent absolument aucun entretien puisqu'il n'y a pas d'eau à rajouter [10] .

7.2 Différents modèles de batterie solaire :

7.2.1 Batteries acide-au-plomb :

Les batteries au plomb fermées avec un électrolyte gélifié. Elles ont l'avantage d'être sans entretien, facilement manipulable (pas de fuite) avec une stabilité parfaitement contrôlée par le fabricant. Elles ont les inconvénients d'être plus chères et d'avoir une durée de vie plus courte. Elles fournissent en général environ 400 cycles à 80 % de décharge

7.2.2 Batteries nickel-cadmium (NiCD) :

De moins en moins utilisée à cause de leur prix et de la toxicité du cadmium ; elles ont été remplacées par les batteries nickel-hydrure métallique NiMH. Elles souffrent d'un effet mémoire, c'est-à-dire qu'il faut complètement la décharger avant de la recharger, car dans le cas contraire sa capacité diminue définitivement. Une réglementation européenne a été mise en place visant à interdire l'usage du cadmium par les particuliers.

7.2.3 Batteries nickel-metal-hydrure (NiMH) :

Les NiMH ont une grande densité énergétique et peuvent être complètement déchargée sans porter préjudice à leur durée de vie. Elles ont l'inconvénient d'être de faible capacité elles fournissent en général entre 500 et 700 cycles à 80 % de décharge.

7.3 Caractéristiques principales d'une batterie solaire [10] :

Le poids et le volume sont deux caractéristiques qu'il ne faut pas les négliger. Mais ce qui définit principalement la batterie est sa tension (en volts, V), sa capacité (en ampères-heures, Ah) et sa durée de vie (en cycles) .

7.3.1 Poids et volume:

On ne choisit pas une batterie en fonction de son poids ou de son volume, mais il faut savoir que les batteries au plomb (les plus utilisées) sont, par exemple, au minimum 5 fois plus lourdes que les batteries Li-ion. Le principal intérêt d'une batterie légère est que l'on facilite le transport. Étant donné qu'une batterie légère est souvent moins résistante, il vaut mieux ne pas se concentrer sur le poids et le volume pour faire son choix, à moins de devoir respecter des contraintes très particulières.

7.3.2 Tension:

Une batterie est constituée d'éléments de base ayant une tension nominale de 2 volts (en réalité entre 1.9 et 2.1 volts selon l'état de charge). Il existe bien entendu des batteries 6 V, 12 V ou 24 V, mais ce n'est qu'un assemblage en série de plusieurs éléments (respectivement 3 x 2 V, 6

x 2 V et 12 x 2 V). Vu de l'extérieur, on ne voit pas cet assemblage sauf pour les batteries à électrolyte liquide qui disposent de bouchons sur chaque élément pour la remise à niveau.

La batterie 12 V est la plus utilisée, car un certain nombre d'appareils électriques fonctionnent sous cette tension : les lampes à économie d'énergie, la plupart des appareils électriques des camping-cars ou des bateaux, etc.

7.3.3 Capacité:

La capacité d'une batterie correspond à la quantité d'énergie qui peut être restituée sur une période donnée. Cette capacité s'exprime en ampères-heures (Ah) et se note C. Elle fait partie des données les plus importantes puisqu'elle permet de connaître la quantité d'énergie qu'il est possible de stocker dans la batterie. Une batterie qui possède une grande capacité vous donnera plus d'autonomie, à condition que les modules soient suffisamment grands pour la recharger.

7.3.4 Durée de vie:

La durée de vie d'une batterie est rarement indiquée, car elle dépend énormément des conditions d'utilisation. On parle en général d'une durée de vie de 300 cycles, un cycle correspondant à une décharge et une recharge. Cela ne correspond pas à 300 jours. Ce qui conditionnera le plus l'espérance de vie de la batterie est le taux maximum de décharge qu'on lui fera subir. Ainsi, si une batterie est prévue pour 300 cycles à 100% de décharge, elle pourra tenir 600 cycles à 50% de décharge, 900 cycles à 33% de décharge, et ainsi de suite.

7.4 Régulation de la charge/décharge :

L'utilisation d'un système de stockage (batterie) dans les systèmes solaires amène à choisir des batteries à faible autodécharge (< 5%), faible maintenance et une durée de vie supérieure à 5 ans. Puisque, elles sont branchées en permanence sur le système photovoltaïque il est nécessaire de prévoir un régulateur de charge/décharge afin d'éviter le problème de surcharge, limiter la profondeur de décharge et par conséquent prolonger la durée de vie de la batterie [11]. A cette fin, un régulateur de charge doit être monté dans le système photovoltaïque pour contrôler l'état de charge et de décharge de la batterie et assurer l'optimisation du transfert de l'énergie du champ PV à l'utilisation.

8. Conclusion :

Nous avons présenté dans ce chapitre des généralités concernant les systèmes photovoltaïques. Nous avons commencé par une introduction sur les énergies renouvelables, des définitions sur l'énergie photovoltaïque Puis, nous avons présenté une étude grossière sur les la structure d'un système photovoltaïque : la cellule photovoltaïque avec son fonctionnement et sa modélisation électrique, le module photovoltaïques et ces association séries et parallèle Ensuite nous avons présenté les différents types de batteries utilisées pour le stockage de l'énergie et leurs caractéristiques.

Chapitre 02

RÉGULATEURS DE

CHARGE SOLAIRE

1. Régulateur de charge solaire :

Le régulateur de charge joue un rôle primordial dans un système photovoltaïque autonome. Il doit cependant être réalisé avec le plus grand soin pour répondre aux exigences de coût, de simplicité, et de fiabilité, il est mis en place dans le système solaire entre les panneaux solaires et la batterie son rôle est de délivrer une tension normalisée (12,24 ou 48v) à la batterie de stockage [12].

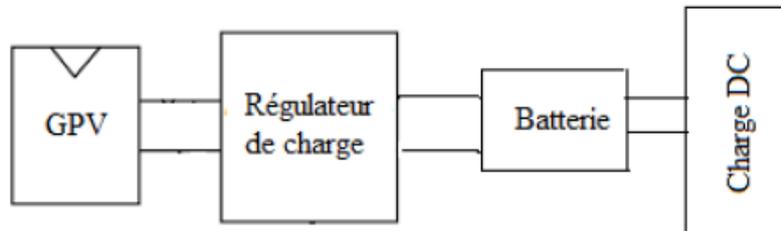


Figure II 1 : Schéma de base d'un régulateur de charge

2. Les fonctions du régulateur de charge :

Un régulateur de charge solaire remplit 2 fonctions :

- La surcharge (ou charge excessive) : quand la tension de la batterie dépasse un seuil déterminé.
- La décharge profonde : quand la batterie est déchargée de plus de 90% de sa capacité nominale.

On réalise ces deux fonctions avec un régulateur charge/décharge connecté avec les panneaux, la batterie et l'utilisation,

Dans le cas de la surcharge quand la tension aux bornes de la batterie atteint 14,5 V (seuil haut typique pour une batterie au plomb de 12 V nominale), le régulateur coupe la liaison avec le panneau, ce qui implique que la batterie n'est plus chargée. Cette charge est rétablie vers 13,5 V.

De même dans le cas de la décharge, quand la tension atteint 11,5 V (seuil bas typique pour 12 V), le régulateur coupe la liaison avec le récepteur, ce qui ne permet plus son utilisation, puisqu'il met ainsi l'appareil hors service jusqu'à ce que la tension batterie soit revenue à un niveau de 12,5 V. Il rétablit alors l'utilisation [13].

Notons que la protection surcharge est presque toujours indispensable, car une alimentation solaire est excédentaire en énergie une partie du temps (l'été surtout). Il n'en est pas de même de la protection décharge, qui est davantage une sécurité en cas d'incident en effet, si le

dimensionnement est bon et les composants bien adaptés, la batterie ne doit pas entrer en décharge profonde. Si cela se produit, ce ne peut être qu'accidentel [13].

On mettra une protection décharge lorsqu'il y a un risque de surconsommation (appareil laissé allumer par erreur, par exemple), ou une batterie très onéreuse. Dans ce cas, on préférera interrompre l'utilisation plutôt que d'endommager la batterie par décharge profonde en cas d'incident [13].

En pratique, ces fonctions anti retour et régulation de charge sont réalisées par des boîtiers électroniques avec une logique à relais ou à transistors. Ils peuvent être de type shunt (pour les basses puissances) ou de type série (pour les puissances élevées) [13].

Entre autres caractéristiques, ils sont déterminés par le courant d'entrée (courant maximal des panneaux) et le courant de sortie (courant maximal de l'utilisation) qu'ils supportent [13].

La figure suivante montre le principe d'un régulateur charge/décharge de type série. Ce système mesure en permanence la tension batterie et agit en conséquence, selon son état de charge

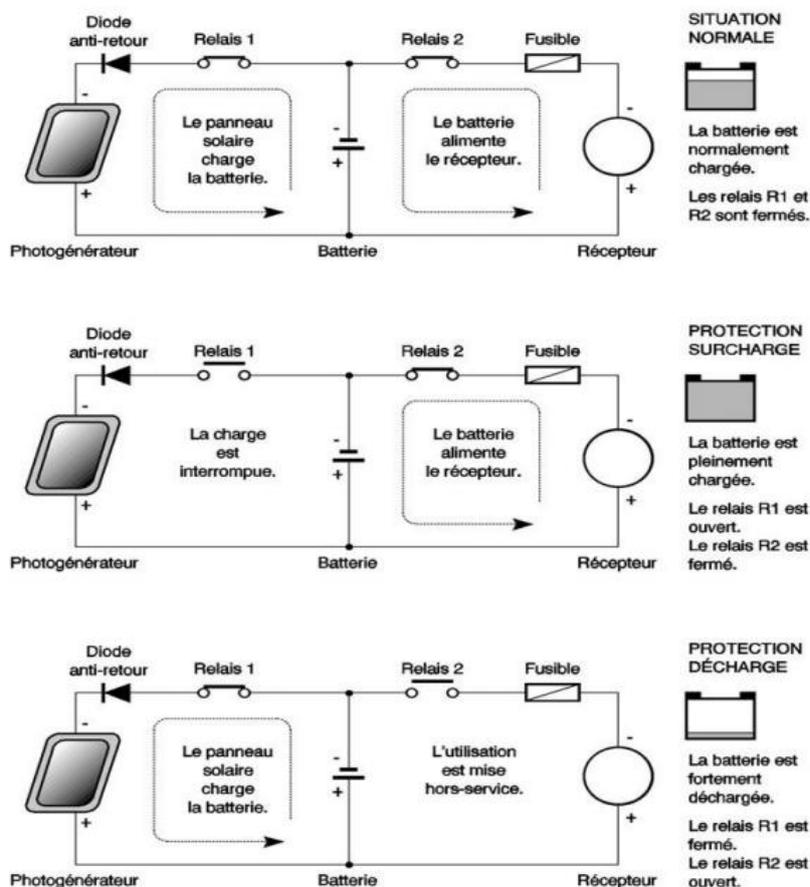


Figure II 2 : Régulateur charge/décharge [13]

3. Les différents types de régulateur de charge :

Les régulateurs de charge de systèmes PV peuvent se caractériser en trois groupes principaux :

3.1 Les régulateurs de charge shunt :

Ce type de régulateur est très répandu et a supplanté le régulateur shunt. L'interrupteur de charge est ici en série avec les batteries et il s'ouvre lorsque la fin de charge est atteinte.

La différence avec la technique « shunt », c'est que le relais peut être commutant en laissant passer le courant vers un autre récepteur. Cette propriété permet d'utiliser la totalité de la puissance solaire en alimentant un récepteur auxiliaire (ventilation, pompage..).

3.2 Les régulateurs de charge Série :

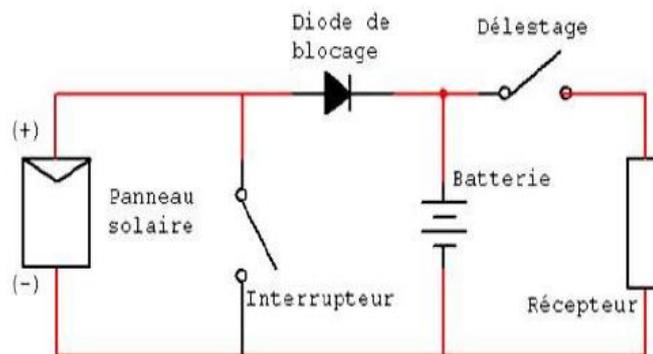


Figure II 3: Principes de fonctionnements d'un régulateur de charge de type shunt

Dans ce modèle, on ajoute une source de courant parallèle avec l'interrupteur pour réaliser l'égalisation des batteries par flottement : un transistor contrôlé par une simple résistance en série avec une diode.

Le désavantage par rapport au type « shunt » est que l'interrupteur, selon sa résistance de passage, ajoute une chute de tension supplémentaire entre les panneaux et les batteries.

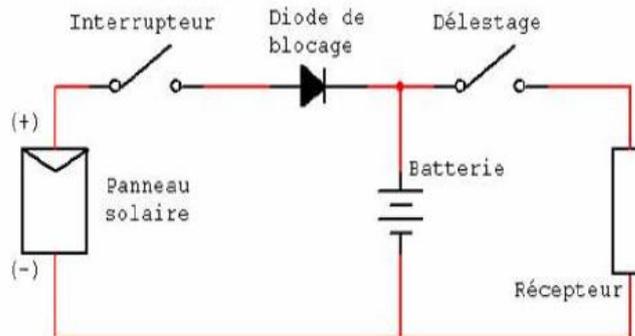


Figure II 4: Principes de fonctionnements d'un régulateur de charge de type série

3.3 Les régulateurs de charge MLI :

Le régulateur MLI (Modulation de la Largeur d'Impulsion) gère de façon optimale les connexions et les déconnexions du module au reste du système. Selon l'état de charge de la batterie, il effectue des coupures plus ou moins longues et plus ou moins fréquentes. Cette technologie permet de charger la batterie à 100 % de sa capacité. Ce type de régulateur devient le plus utilisé dans les installations photovoltaïques autonomes. Pour la régulation de la charge, une réduction du courant de charge est effectuée lorsque la batterie est chargée ; autrement dit, lorsque la tension par élément dépasse la tension de surcharge. Tandis que, la régulation de décharge s'effectue par une comparaison entre la tension de la batterie et le seuil bas de la tension prééglée, pour informer le circuit de commande. Ce dernier arrête la décharge de la batterie lorsque la tension par élément devient inférieure à la tension seuil.

3.4 Les régulateurs de charge MPPT :

Actuellement, le régulateur de charge solaire le plus utilisé est celui basé sur l' algorithme MPPT (Maximum power point tracking). Il est plus développé, plus cher et présente de nombreux avantages par rapport au contrôleur de charge PWM. Il a une efficacité de 30 à 40% à basse température.

Le contrôleur MPPT ajustera sa tension d'entrée pour obtenir le maximum de puissance des panneaux solaires, puis convertir cette énergie pour répondre aux différentes exigences de tension de la batterie et de la charge. Généralement, le contrôleur MPPT est plus efficace que celui basé sur le PWM dans un climat avec des températures basses, tandis que les deux contrôleurs ont presque les mêmes performances dans un climat semi-tropical ou tropical [14].

4. La commande MPPT :

Nous pouvons classer d'une manière générale les commandes du MPPT selon le type d'implémentation électronique : analogique, numérique ou mixte. Il est cependant plus intéressant de les classer selon le type de recherche qu'elles effectuent et selon les paramètres d'entrée de la commande du MPPT. Bien qu'il existe un grand nombre de publications scientifiques qui présentent des commandes du MPPT plus ou moins complexes [15] .

4.1 Classification des commandes MPPT selon le type de recherche :

4.1.1 MPPT Indirect :

Ce type de commandes MPPT utilise le lien existant entre les variables mesurées (I_{sc} : Courant de court-circuit ou V_{oc} : La tension en circuit ouvert), qui peuvent être facilement déterminées, et

la position approximative du MPP (Maximum power point). Il compte aussi les commandes se basés sur une estimation du point de fonctionnement du générateur photovoltaïque GPV réalisé à partir d'un modèle paramétrique défini au préalable. Il existe aussi des commandes qui établissent une poursuite de la tension optimale en prenant en compte uniquement les variations de la température des cellules donnée par un capteur [5].

4.1.2 MPPT Direct :

Ce type de commande MPPT détermine le point de fonctionnement optimal (MPP) à partir des courants, tensions ou puissances mesurés dans le système. Il peut donc réagir à des changements imprévisibles du fonctionnement du GPV.

Généralement, ces procédures sont basées sur un algorithme de recherche, avec lequel le maximum de la courbe de puissance est déterminé sans interruption du fonctionnement. Pour cela, la tension du point de fonctionnement est incrémentée dans des intervalles réguliers. Si la puissance de sortie est plus grande, alors la direction de recherche est maintenue pour l'étape suivante, sinon elle sera inversée. Le point de fonctionnement réel oscille alors autour du MPP. Ce principe de base peut être préservé par d'autres algorithmes contre des erreurs d'interprétation. Ces erreurs peuvent survenir, par exemple, à cause d'une mauvaise direction de recherche, résultant d'une hausse de puissance qui est due à une augmentation rapide du niveau de rayonnement [5].

L'avantage de ce type de commandes est leurs précisions et leur rapidité de réaction.

4.2 Classification des commandes MPPT selon les paramètres d'entrée :

4.2.1 Commande MPPT fonctionnante à partir des paramètres d'entrée du convertisseur :

Ce type de commandes MPPT effectue une recherche du MPP selon l'évolution de la puissance fournie par le GPV. La commande nécessite alors la mesure du courant et de la tension en entrée du convertisseur [16].

D'autres types de commandes MPPT sont basées sur la régulation du courant du GPV, supposant que ce dernier soit une image proportionnelle à la puissance. Ceci permet de s'approcher le plus proche possible du courant optimal I_{opt} . Ce type de commande ayant besoin d'un seul capteur est plus facile à mettre en œuvre et a un coût bas.

4.2.2 Commande MPPT fonctionnante à partir des paramètres de sortie du convertisseur :

Dans la littérature, il existe des algorithmes basés sur les paramètres de sortie du convertisseur statique CS, en effet, ce type utilise la tension et le courant de sortie du CS ou alors uniquement

l'un des deux. Les commandes MPPT basées sur la maximisation du courant de sortie sont principalement utilisées quand la charge est une batterie [16].

Tous les systèmes utilisant les paramètres de sortie, une approximation de P_{MAX} (Puissance maximale fournie par le module en STC « Standard Test Conditions ») est faite à travers le rendement du convertisseur. Plus l'étage de conversion est bon, plus cette approximation est valable. Par contre, tous les systèmes avec un seul capteur sont imprécis.

La plupart de ces systèmes ont été conçus à l'origine pour le spatial.

5. Aperçu des algorithmes MPPT :

Il existe dans la littérature plusieurs algorithmes MPPT. Les plus utilisés sont [17] :

- Algorithme de la Tension Constante (CV, Constant Voltage).
- Algorithme du Courant constant (Constant Current).
- Perturbation et Observation (P&O, Perturb and Observe).
- Conductance Incrémentale (IncCond, Incremental Conductance).

Les algorithmes P&O et IncCond font partie de la technique appelée Hill Climbing (monté de Pente).

5.1 L'algorithme MPPT de perturbation et observation :

La méthode de P&O est largement adoptée pour la recherche de MPP parce qu'elle est simple et ne requiert que des mesures de la tension (V_{PV}) et du courant (I_{PV}) du panneau PV.

Le principe de cette technique consiste à perturber la tension V_{PV} d'une faible amplitude autour de sa valeur initiale et d'analyser le comportement de la variation de puissance instantanée P_{PV} du panneau photovoltaïque avant et après la perturbation, Si le changement dans la puissance de sortie (d_{VP}) augmente, V_{PV} est réglée dans le même sens que dans le cycle précédent. Si d_{VP} est négatif, cela signifie que le système est loin d'être le point optimal, donc la taille de perturbation doit être réduite afin d'apporter le point de fonctionnement autour au MPP . La figure II-5 montre le diagramme décrivant les étapes de mise en œuvre de la P&O algorithme.

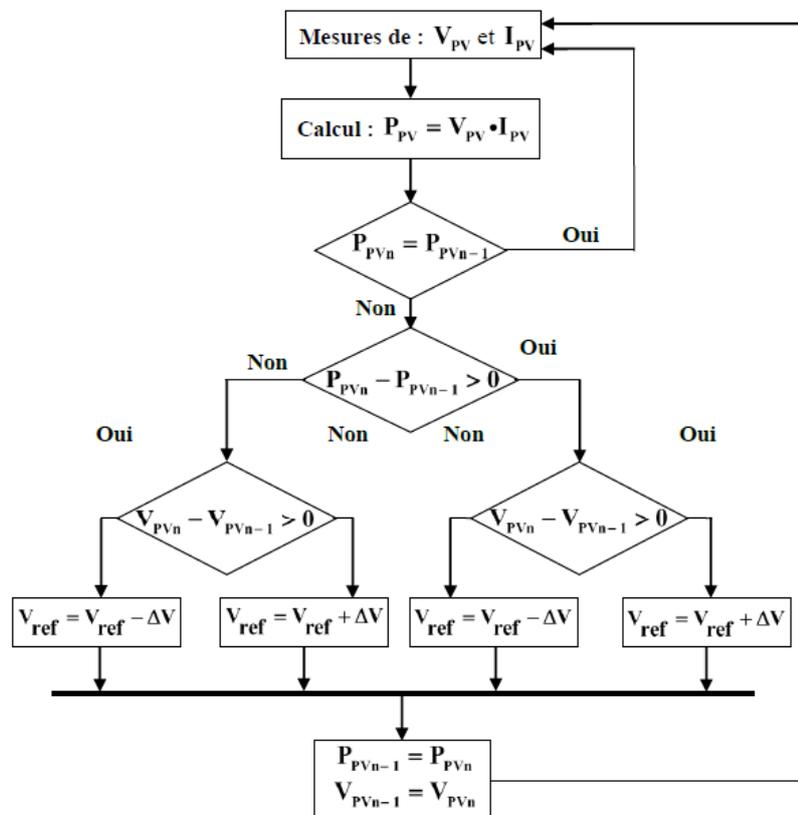


Figure II 5: Algorithme d’une commande MPPT basée sur la méthode P&O [25]

5.2 Etude comparative :

Le tableau suivant représente une étude comparative entre les techniques de commande MPPT classique « Perturbe & Observe » et « Incrément des conductances ».

Algorithmes MPPT	P&O	IncCond
Type de capteurs utilisés.	1 Tension. 1 Courant.	1 Tension. 1 Courant.
Identification des Paramètres du panneau PV.	Non nécessaire.	Non nécessaire.
Complexité.	Basse.	Moyenne.
Nombre d’itérations.	45	48
Vitesse de convergence.	Moyenne.	Moyenne.
Précision.	95%	98%

Tableau II-1 : Comparaison des techniques MPPT P&O et IncCond [18]

6. Conception de régulateur de charge MPPT numérique :

Dans cette section, la conception de régulateur de charge avec la régulation PWM sur un microcontrôleur (μC) du type PIC seront décrite, le système se compose de trois blocs : bloc d'alimentation, bloc de puissance et le bloc de commande.

6.1 Le Bloc d'Alimentation :

Le fonctionnement de notre circuit de commande exige une alimentation à une seul niveaux de tensions. Pour cela, on a la réalisé à base d'un régulateur de tension figure II-6.

Le régulateur de tension LM 7805 alimenter le microcontrôleur par une tension fixe égale à 5 V.

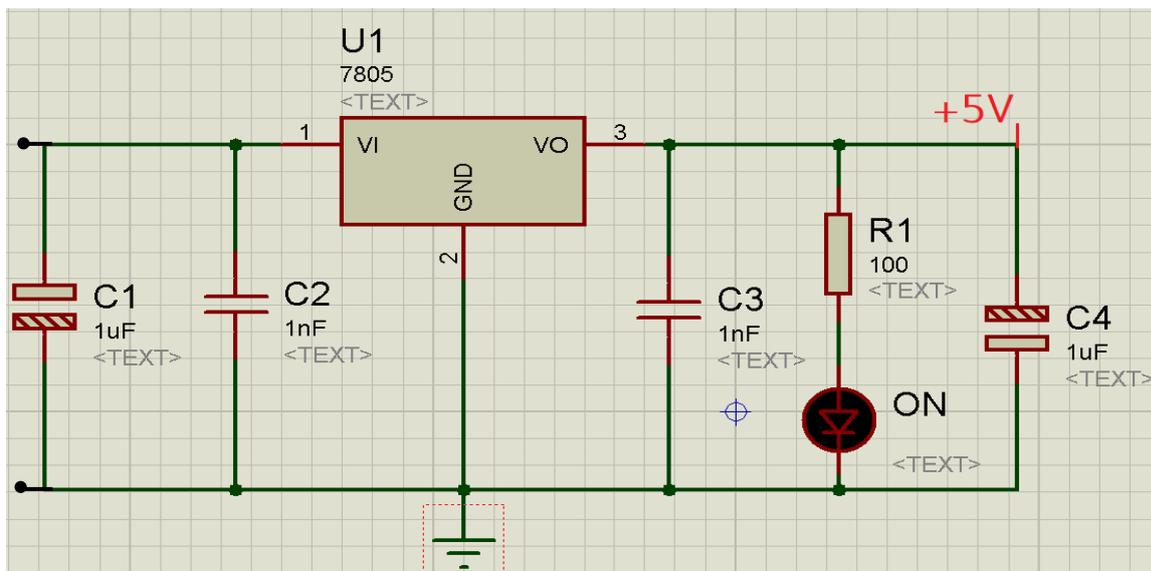


Figure II 6: Bloc Alimentation DC 5V

Les différents condensateurs placés en amont servent au filtrage des tensions, et sert à minimiser le bruit à la sortie du régulateur.

6.2 Le Bloc de puissance :

Le bloc de puissance consiste en fait à circuit de protection contre l'inversion de polarité,

6.2.1 Circuit de protection contre les inversions de polarités [19]:

Protéger un appareil contre les inversions de polarité n'est pas simple, surtout pour bloquer un courant inverse sans occasionner de chute de tension d'alimentation.

Nous pouvons remédier à ce problème en exploitant les propriétés évoquées dans un transistor MOSFET (figure II-7), On peut dire que le transistor MOSFET se comporte comme une diode parfaite, Il est possible de remplacer ce MOSFET par un relais avec une diode en série dans la

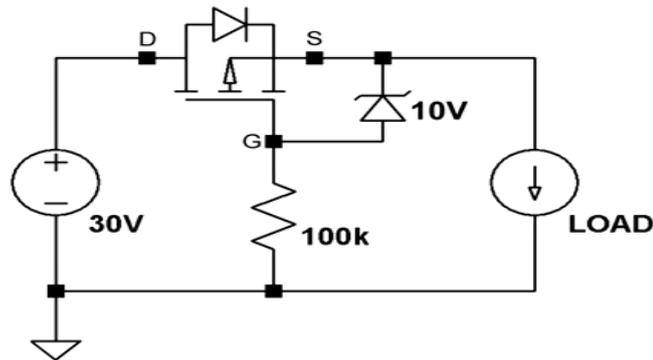


Figure II 7 : Circuit de protection contre inversion de polarité

bobine ; cette solution simple, mais encombrante et gourmande en courant.

Pour les applications à haute tension La gâchette d'un transistor MOSFET est isolée, encore faut-il ne pas dépasser +/- 20 V de tension par rapport à la source, sinon on risque de voir un courant apparaitre par la protection interne (deux diodes Zener en opposition) [19].

Nous allons simplement ajouter un circuit de protection avec une diode zener de 15 V et une résistance de 1 k Ω environ. Celui-ci entrera en action si l'on dépasse 15 V ou si la tension est négative sur la gâchette. En utilisation normale entre 6 et 14,6 V le dispositif ne consommera aucun courant sur l'alimentation ou la batterie.

La gâchette d'un MOSFET de puissance étant très capacitive (environ 10 nF), nous avons préféré ajouter une résistance de forte valeur entre gâchette et source pour décharger celle-ci de toute accumulation de charge électrostatique. Ainsi nous empêchons toute conduction du transistor même si rien n'est connecté en aval.

Pour des raisons de sécurité, une batterie doit obligatoirement posséder un fusible de protection au plus près du pôle positif. Cette protection indispensable en cas de court-circuit évite tout risque d'incendie ainsi que la fonte des câbles.

6.2.2 Circuit de protection sur les surintensités :

Le courant de court-circuit est en général une forte intensité produite par un défaut de résistance négligeable entre des points présentant une différence de potentiel en service normal. [20]

Pour remédier à ce problème dans les circuits électronique il existe plusieurs montages :

- **Montage hard :**

Comme montre la figure II-8 ce montage de protection est constitué de deux transistors qui sont connectés en antiparallèle et le buzzer du dispositif de sortie, et deux LED (rouge) et (verte). L'ensemble de ce circuit est connecté à la source d'alimentation qui est appliquée au circuit de charge cible.

Le fonctionnement de ce circuit est simple, considérez les transistors Q1 et Q2 comme un interrupteur. Lorsque le flux d'alimentation normal est Q2 en condition ON et Q1 OFF, la LED verte devient polarisée et elle est en état allumé. Lorsqu'un court-circuit se produit, Q2 sera en condition OFF et Q1 passera en état ON afin que le buzzer et la LED rouge avertissent l'utilisateur du danger de surintensité ou éventuel court-circuit.

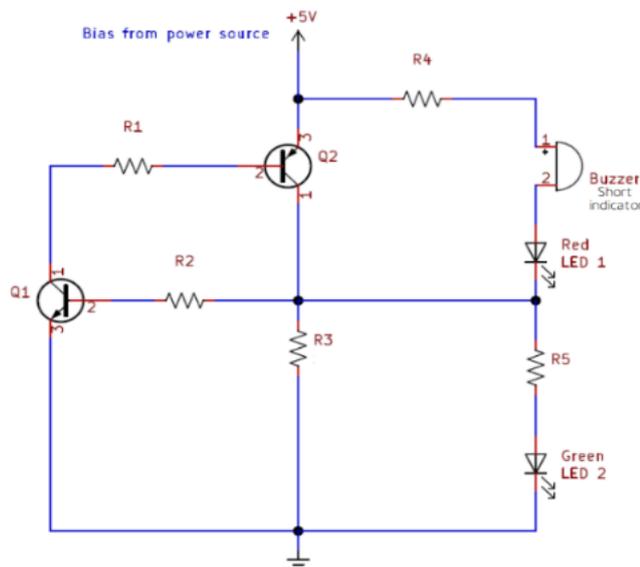


Figure II 8 : Circuit de protection contre les surintensités

- **Montage hybride :**

La figure ci-dessous représente la méthode de protection contre les surintensité avec l'utilisation d'une unité de traitement c'est un circuit hybride constitué d'un circuit analogique (hard) et un programme (soft) , concernant la mesure de courant les différents méthodes sont démontré sur le bloc de commande la partie des circuits de mesure.

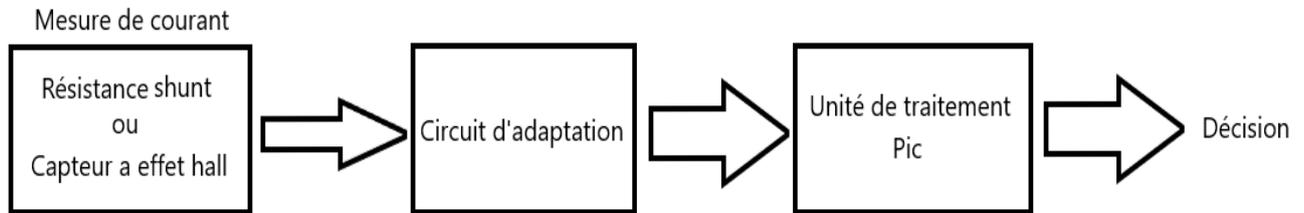


Figure II 9 : Schéma bloc d'un circuit de protection hybrid contre les surintensités

6.3 Le Bloc de commande :

Le bloc de commande est composé de quatre parties essentielles : la première partie est le contrôleur de charge qui empêche la surcharge et la décharge profond de la batterie et obtenir le maximum de tension des panneaux solaires et en suite c'est les circuit de mesure qui permet de lire la tension et le courant de notre panneau photovoltaïque la troisième partie c'est le circuit de détection de surintensité a l'entrée de panneau photovoltaïque , la dernière partie constitue d' un microcontrôleur PIC 16F877 qui permet de programmer les différentes fonctionnalités (envoi de signal de control PWM pour contrôler le chargement de la batterie , arrêter le système c'est on a une surintensité , afficher les info sur un afficheur LCD),et en fin l'isolation entre le bloc de commande et le bloc de puissance .

6.3.1 Contrôleur de charge de la batterie :

Le contrôleur de charge a été considéré comme l'un des dispositifs importants dans les systèmes photovoltaïques pour éviter que la batterie ne soit endommagée en raison d'une surcharge et décharge excessive, le contrôleur régule la puissance d'alimentation et empêche ainsi la surcharge.

Le circuit sur la figure II 10 est notre choix de mettant en œuvre un contrôleur de charge.

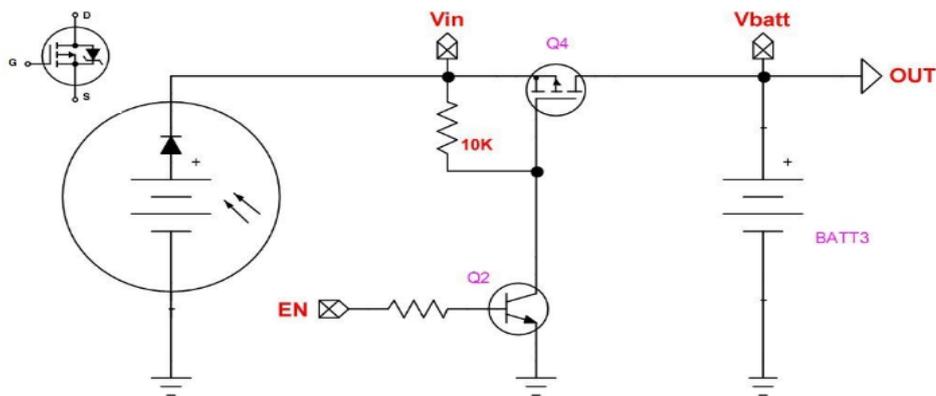


Figure II 10 : Circuit de commutation du contrôleur de charge de la batterie du panneau solaire

le montage au-dessus consiste à contrôler le chargement de la batterie par une commande PWM généré le microcontrôleur sur la base du transistor bipolaire Q2 ; le signal de commande gère de façon optimale les connexions et les déconnexions du panneau solaire et la batterie. Selon l'état de charge de la batterie, il effectue des coupures plus ou moins longues et plus ou moins fréquentes

- Si $EN=1 \rightarrow Q2=ON \rightarrow Q4=ON \rightarrow$ chargement de batterie.
- Si $EN=0 \rightarrow Q2=OFF \rightarrow Q4=OFF \rightarrow$ pas de chargement.

Cette technique permet de charger la batterie à 100 % de sa capacité, une réduction de tension de charge est effectuée lorsque la batterie est chargée. Tandis que, la régulation de décharge s'effectue par une comparaison entre la tension de la batterie et le seuil bas de la tension prééglée, pour informer le circuit de commande. Ce dernier arrête la décharge de la batterie lorsque la tension par élément devient inférieure à la tension seuil.

6.3.2 Circuit de mesure :

6.3.2.1 Mesure des tensions :

L'ordre de grandeur de la puissance consommée au niveau du circuit de commande est toujours inférieur de la puissance que transite le circuit de puissance, par conséquent pour qu'elle puisse être traitée par le microcontrôleur, les tensions mesurées de telle sorte que le régulateur traite des valeurs qui leur sont proportionnelles.

Afin que le microcontrôleur puisse lire la tension du panneau photovoltaïque nous devons effectuer de l'opération de transformer une tension de 0 à 12 V en une tension de 0 à 5 V.

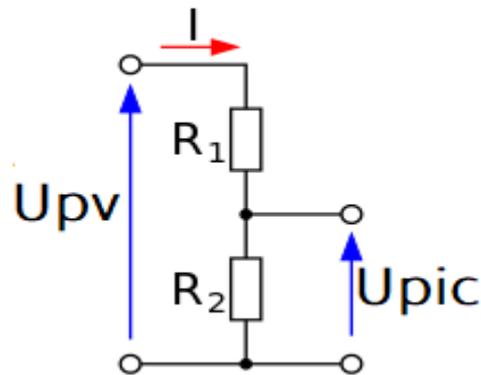


Figure II 11 : Diviseur de tension

C'est donc avec un simple pont diviseur de tension que nous réalisons cette opération comme il est illustré dans la figure II 11 . La tension entrée au PIC (U_{pic}) sera connectée au pin AN1 du port A configuré en entrée.

6.3.2.2 Mesure de courant :

- **Méthode de la résistance shunt :**

Pour la mesure du courant issu du module PV, on a utilisé un moyen très courant (figure II 12) à consiste à utiliser une résistance de puissance de très faible valeur en série avec la charge qu'on souhaite mesurer (résistance shunt). Lorsqu'elle est traversée par un courant, il en résulte une tension entre ces bornes. Cette tension peut être ensuite mesurée par l'ADC d'un microcontrôleur.

Ces dispositifs ont une gamme d'applications, avec des capteurs à effet Hall, ces dispositifs intelligents sont utilisés dans divers domaines, l'un des domaines c'est l'électronique et l'un des applications c'est le capteur du courant comme le ACS712.

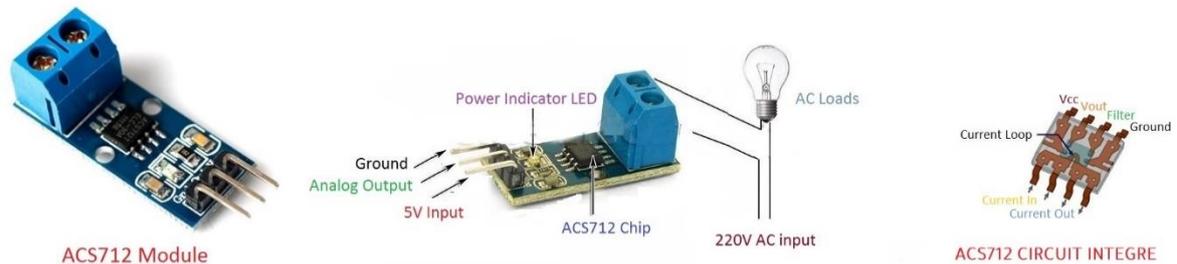


Figure II 13 : Capteur de courant ACS712

ACS712 est un capteur de courant alternatif ou continu, utilisé pour mesurer le courant alternatif ou continu. La valeur maximale du courant alternatif et continu pouvant être mesurée est de 30A, son signal de courant de sortie peut être lu via le port d'E/S analogique d'un microcontrôleur. Il est également disponible en version 5A et 20A qui fournit des solutions précises et économiques pour la détection de courant alternatif ou continu dans les systèmes industriels et commerciaux. ACS712 se compose d'un circuit de capteur Hall linéaire précis et à faible décalage avec un chemin de conduction en cuivre situé près de la surface du mourir.

L'ACS712 est utilisé dans différents projets industriels et appareils électriques commerciaux, y compris les alimentations à découpage de commande de moteur, la détection de charge, la gestion et la protection contre les surintensités.

6.3.3 Isolation Galvanique :

Afin d'assurer une isolation galvanique entre le bloc de puissance et le bloc de commande, on utilise un optocoupleur le 4N25, permettant en outre comme driver pour le commutateur de puissance. L'optocoupleur de la figure II-14, encore appelé photo-coupleur est composé de deux éléments :

- un photoémetteur, dans le visible ou l'infrarouge.
- un photorécepteur, le plus souvent un phototransistor.

L'optocoupleur transmet des informations logiques ou analogiques sous forme de signal électrique, via une liaison optique qui isole électriquement l'entrée de la sortie.

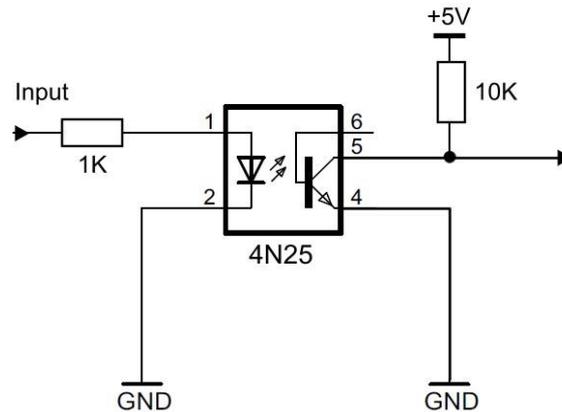


Figure II 14 : Circuit d'isolation galvanique
Optocoupleur 4N25

6.3.4 Le microcontrôleur :

a. Définition :

Un microcontrôleur est un ordinateur monté dans un circuit intégré. Il est capable d'exécuter et de traiter l'information à laquelle on a ajouté des périphériques internes permettant de réaliser des montages sans nécessité l'ajout de composants annexes. Comme tout ordinateur, le μC peut intégrer dans un seul boîtier l'environnement minimal d'un système à microprocesseur (les mémoires, le processeur et les périphériques). Les microcontrôleurs sont présents dans la plupart des systèmes électroniques embarqués ou dédiés à une application unique.

Il en existe plusieurs types des microcontrôleurs selon les sociétés qu'ils ont fabriquées comme : le 8051 de 'Intel', le 68HC11 de 'Motorola'... et les PIC de 'Microchip', Le nom PIC signifie « Peripheral Interface Controller » (interface périphérique de commande).

b. Différentes familles des microcontrôleurs :

Il existe plusieurs familles de microcontrôleurs dont les plus connues sont:

- **Microship:** PIC ; familles 12Cxxx, 12Fxxx, 16Cxxx, 16Fxxx, 18Fxxx...
- **Intel:** famille 80C186XX.
- **Atmel:** AT; familles AT89Sxxxx, AT90xxx...
- **Motorolla:** famille 68HCxxx...
- **STMicroelectronics:** famille STX.
- **Analog Devices:** famille ADuC.

c. Présentation du PIC 16F877A :

Le microcontrôleur 16F877A fait partie de la sous famille des 16F87X. Cette branche fait partie intégrant de la famille des Pics Mid-Range, le PIC 16F877A se présente sous la forme d'un boîtier PDIP de 40 broches, le numéro peut être suivi d'un «A», et d'un «-XX» qui donne la fréquence d'horloge maximum du composant. À l'heure actuelle, la version la plus courante est la version -20. Donc la fréquence maximale sera de 20 MHz.

d. Description générale du pic 16F877A :

La figure II-15 présente le synoptique simplifié de μ C qui sera utilisé dans notre carte numérique

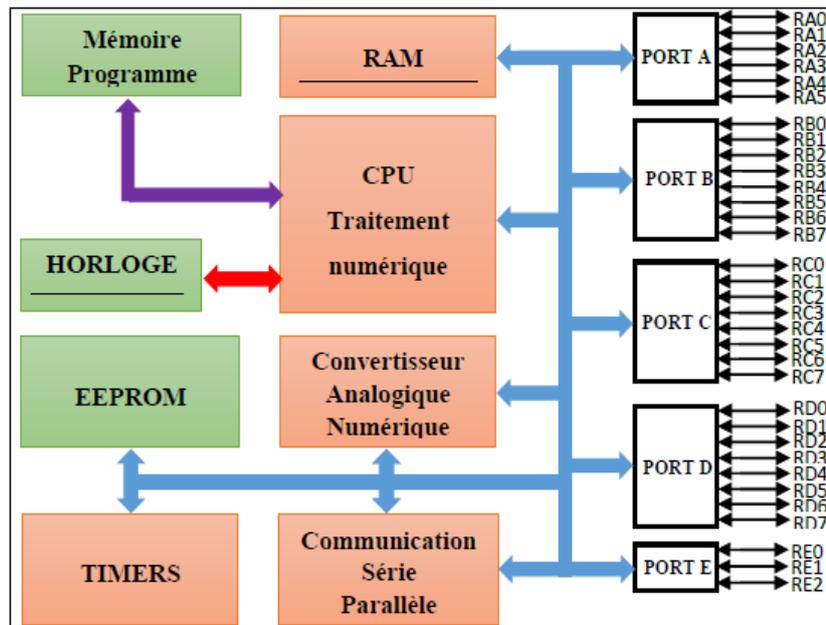


Figure II 15 : Architecture interne du PIC 16F877A.

- **L'unité de traitement (CPU : Central Processing Unit) :**

L'unité de traitement numérique exécute les instructions du programme (codées sur 14 bits). Il traite et produit des opérations sur des informations numériques uniquement.

- **Les mémoires :**

Elles se divisent en trois blocs distincts :

- la mémoire EEPROM PROGRAMME de capacité 8000 mots de 14 bits.
- la RAM (368 octets) est utilisée pour le stockage temporaire des données et résultats,

- EEPROM DES DONNÉES de capacité 256 octets qui peuvent être lus et écrits depuis le programme. Ces octets sont conservés après une coupure de courant et sont très utiles pour conserver des paramètres semi-permanents.

- **L'horloge :**

L'horloge peut être soit interne ou soit externe. L'horloge interne est constituée d'un oscillateur à quartz ou d'un oscillateur RC. Avec l'oscillateur à quartz, on peut avoir des fréquences allant jusqu'à 20 MHz selon le type de microcontrôleur utilisé. Par contre, avec l'oscillateur RC, la fréquence de l'oscillation peut varier légèrement d'un circuit à l'autre (Elle est fixée par la tension d'alimentation (Vdd), la résistance externe (Rext) et le condensateur externe Cext).

Dans certains cas, une horloge externe au microcontrôleur peut être utilisée pour synchroniser le PIC sur un processus particulier. Elle génère le signal qui cadence l'exécution des instructions.

Quel que soit l'oscillateur utilisé, l'horloge système dite aussi horloge instruction est obtenue en divisant la fréquence par 4. Par exemple, un quartz de 4 MHz, on obtient une horloge instruction de 1 MHz, soit le temps pour exécuter une instruction de 1 μ s.

- **Les ports :**

Pour communiquer avec l'extérieur, le **PIC 16F877A** dispose de 5 ports (PORTA, PORTB, PORTC, PORTD et PORTE). Chaque broche d'un port peut être configurée soit en entrée soit en sortie à l'aide des registres de direction TRISA, TRISB, TRISC et TRISD et TRISE.

Le microcontrôleur reçoit les informations sur un port d'entrée :

- Informations logiques issues de capteurs sur un ou plusieurs bits d'un port d'entrée,
- Informations numériques codées sur 8 bits sur un port entier (le code d'une touche d'un clavier par exemple).
- Informations analogiques variables dans le temps (une tension représentative d'une température par exemple) si le PIC est doté d'un convertisseur analogique / numérique.

Le μ C traite ces données et les utilise pour commander des circuits qui sont connectés sur un port de sortie.

- **Les timers :**

Les compteurs qui dans un certain sens peuvent s'appeler timers, sont l'une des sous-fonctions les plus importantes d'un microcontrôleur. Le PIC 16F877A dispose de 3 timers : ce sont des modules programmables dont les fonctions principales sont :

- La génération de signaux périodiques (astable).

- La génération d'impulsions (monostable).
- Le comptage d'évènements extérieurs sur des fronts montants ou descendants (compteur).
- La génération de signaux PWM (modulation de largeur d'impulsions pour les MCC).
- La mesure des durées.
- La réalisation des temporisations précises puisqu'ils utilisent des oscillateurs de référence à quartz.

- **Le convertisseur analogique numérique (CAN) :**

Ce module est constitué d'un convertisseur Analogique Numérique 10 bits dont l'entrée analogique peut être connectée sur l'une des 8 entrées analogiques externes. Il peut convertir 8 tensions analogiques (variables entre 0 et 5 V) appliquées sur ses 8 entrées (PORT A et PORT E qu'ils sont configurés à l'aide des registres TRISA et/ou TRISE) en nombres binaires codés sur 10 bits. Les résultats des conversions sont stockés dans des registres internes de le μC .

- **Les modules CCP1 et CCP2 (C.C.P. : Capture Compare PWM) :**

Chacun des modules CCP1 et CCP2 peuvent fonctionner dans l'un des trois modes ci-dessous :

- Mode capture (CAPTURE) : ce mode permet en outre d'effectuer des mesures de temps.
- Mode comparaison (COMPARE) : ce mode permet en outre de générer des événements périodiques.
- Mode PWM (Pulse With Modulation) : ce mode permet de générer des signaux dont le rapport cyclique est variable.

Ces modules sont associés aux broches RC2/CCP1 et RC1/T1OSI/CCP2. Suivant le mode choisit, les timers 1 ou 2 vont être utilisés. Les modes Capture et Comparaison utilisent le timer 1, tandis que le mode PWM utilise le timer 2.

- **Représentation de l'état de charge sur un afficheur LCD**

Pour indiquer l'état de charge de la batterie, on a utilisé deux méthodes :

- Visualisation de l'état avec 2 témoins LED : Rouge pour batterie déchargée, Vert pour batterie totalement chargé.

Grâce à la commande par un microcontrôleur ces afficheurs permettent de réaliser un affichage de messages aisés.

Les différentes broches de l'afficheur LCD ont comme rôle :

- VCC, Masse : alimentation de l'afficheur LCD avec 5 V, 0 V respectivement,
- Contraste : entrée entre 0 V et 5 V permettant le réglage du contraste de l'afficheur,
- VLED : tension permettant de commander le rétro-éclairage,
- E (Enable) : entrée de validation permettant de valider les données sur un front descendant.

Lorsque $E=0$ alors le bus de données est à l'état haute impédance.

- RS (Register Select) : cette entrée permet d'indiquer à l'afficheur si l'on souhaite réaliser une commande ($RS=0$) par des instructions spécifiques ou écrire une donnée (envoi du code du caractère à afficher) sur le bus ($RS=1$).
- R/W : entrée de lecture ($R/W=1$) et d'écriture ($R/W=0$).
- D7 ... D0 : bus de données bidirectionnel, il permet de transférer les instructions ou les données à l'afficheur LCD.

- **Langages de programmation pour les PIC :**

Les microcontrôleurs sont des composants programmables. Ils font ce que leur dit de faire le programme et rien d'autre. Le programme est une suite d'instructions. Elles sont codées en binaire pour pouvoir être exécutées par le microcontrôleur (code machine).

La programmation débute par un algorithme qui décrit l'enchaînement des actions à réaliser. A partir de là, le programmeur traduit chaque étape de l'algorithme en langage évolué. Il est possible d'utiliser différents langages de programmations de haut niveau (BASIC, C, C++, JAVA) ou bien de bas niveau comme Assembleur.

Pour écrire un programme, il existe plusieurs logiciels de programmation des microcontrôleurs comme MPLAB, FLOWCODE et mikro C. Pour notre cas, les trois algorithmes MPPT testés (P&O, Hill-climbing et conductance incrémentale) ont été programmés en langage C, grâce au logiciel « mikro C PRO FOR PIC ».

Le langage C pour PIC a trouvé une large application pour le développement de systèmes embarqués sur la base de microcontrôleur.

7. Conclusion :

Nous avons présenté dans ce chapitre les régulateurs de charge solaire commençant par les fonctions d'un régulateur solaire sur la chaîne du système solaire et ces différents types, nous avons cité les classifications des commandes MPPT, ces algorithmes et une étude comparative entre

eux et après nous avons détaillé les différents blocs dans notre circuit électronique la partie alimentation et la partie de puissance dont on a parlé des circuits de protection contre l'inversion de polarité, et enfin le bloc de commande qui contient le contrôleur de charge de la batterie, les circuits de mesure (Tension & Courant) et généralité sur les microcontrôleurs.

Chapitre 03

Reverse Engineering

1. Introduction :

Parfois, nous avons un appareil électronique qui nécessite des réparations en cas de panne ou des optimisations et des modifications pour l'adapter à une autre utilisation, ces appareils sont dotés de schéma de circuit électronique clair et détaillé pour dépanner ou tester de ces appareils. Mais la majorité des cet appareil ne dispose pas d'informations suffisante pour mener à bien les opérations de d'optimisation et de modifications des circuits, le seul moyen est de recréer le circuit électronique PCB c'est-à-dire faire de l'ingénierie inverse du circuit imprimé (Reverse engineering).

2. Reverse engineering :

Elle consiste à reproduire un schéma électronique fonctionnel en analysant les composants électroniques des circuits ainsi que les connexions qui les relie dans un circuit imprimé ou le dessin des masques d'un circuit intégré. On peut aussi, sur certains dispositifs informatisés, récupérer le code assembleur de leur firmware , est alors élaboré à partir de l'image mémoire de ces composants. [21]

2.1 Pourquoi inversons-nous les circuits imprimés ?

Nous effectuons une ingénierie inverse des PCB pour un certain nombre de raisons importantes ;

1. Pour remplacer les composants obsolètes de la carte
2. Pour repositionner certains composants
3. Pour améliorer la fonctionnalité du PCB
4. Analyser et renforcer les exigences de sécurité

2.2 Processus de rétro-ingénierie d'une carte de circuit imprimé :

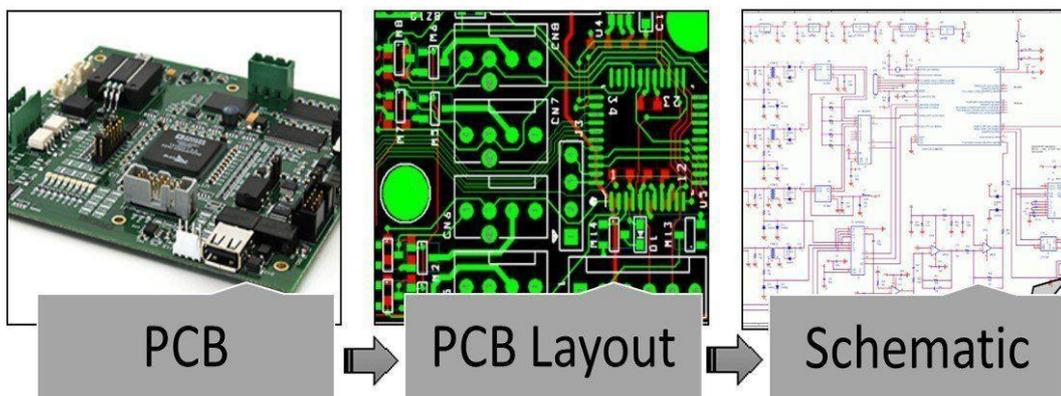


Figure III- 1 : Processus de rétro-ingénierie d'une carte de circuit imprimé

3. La rétro-ingénierie pour les circuits de régulateur de charge solaire :

Dans notre cas nous avons fait le reverse engineering pour les circuits de régulateur de charge SOLARIX PRS1515 et SOLARIX PRS2020.

3.1 Le régulateur de charge solaire SOLARIX:

Le régulateur de charge solaire Solarix PRS séduit non seulement par sa simplicité et ses performances mais également par son design moderne et son affichage très pratique, le tout à un prix extrêmement intéressant. [22]

Cet appareil fait appel aux algorithmes modernes qui assurent un entretien optimal de la batterie. Les régulateurs de charge Solarix PRS sont équipés d'un fusible électronique, ce qui leur permet de garantir une protection optimale, ils fonctionnent selon le principe du montage en série et séparent le panneau photovoltaïque de la batterie afin d'empêcher toute surcharge. [22]

Ces régulateurs de charge peuvent également être dotés de fonctions spéciales telles que la fonction éclairage nocturne et la possibilité de choisir entre diverses tensions finales de charge et tensions de protection contre les décharges profondes. [22]

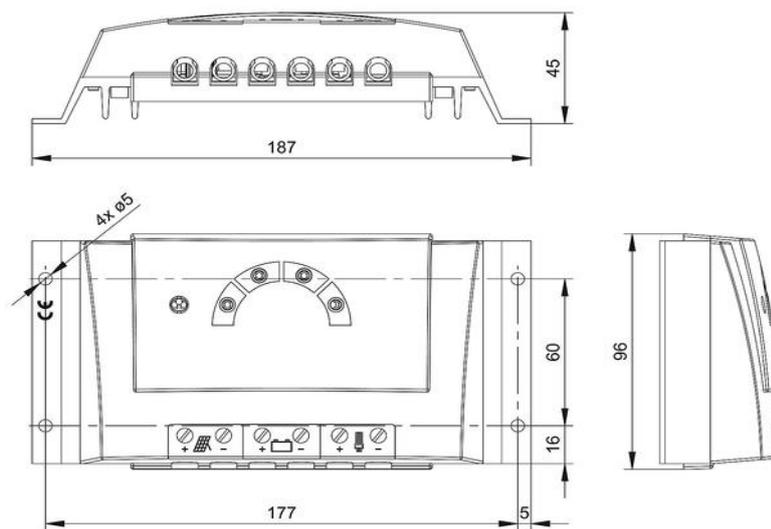


Figure III- 2 :Boitier de régulateur de charge solaire SOLARIX PRS [22]

	1010	1515	2020	3030
Caractérisation des performances de fonctionnement				
Tension de système	12 V (24 V)			
Consommation propre	< 4 mA			
Côté entrée DC				
Tension à vide du panneau photovoltaïque (à la température de service minimale)	< 47 V			
Courant du panneau	10 A	15 A	20 A	30 A
Côté sortie DC				
Courant du consommateur**	10 A	15 A	20 A	30 A
Point de référence de réenclenchement (LVR)*	12,4 V ... 12,7 V (24,8 V ... 25,4 V)			
Protection contre la décharge profonde (LVD)*	11,2 V ... 11,6 V (22,4 V ... 23,2 V)			
Côté batterie				
Tension de l'accumulateur	9 V ... 17 V (17,1 V ... 34 V)			
Tension finale de charge*	13,9 V (27,8 V)			
Tension de charge rapide*	14,4 V (28,8 V)			
Charge d'égalisation*	14,7 V (29,4 V)			
Conditions de fonctionnement				
Température ambiante	-25 °C ... +50 °C			
Installation et construction				
Réglage du type d'accumulateur	liquide			
Borne de raccordement (à fils fins / à un fil)	16 mm ² / 25 mm ² - AWG 6 / 4			
Degré de protection	IP 31			
Dimensions (X x Y x Z)	187 x 96 x 45 mm			

Figure III- 3: Les données techniques des circuits Solarix PRS [22]

3.2 Logiciels utilisés :

①



photos réel de la carte électronique

②



Traitement des photos + extraction du schéma

③



Traçage du schéma sur isis

Figure III- 4: Les démarches à suivre et les logiciels utilisés pour obtenir le schéma du circuit électronique

3.2.1 Logiciel de traitement d'image GIMP :

Il existe plusieurs outils et logiciels pour traiter les images dans notre projet nous avons choisi GIMP (GNU Image Manipulation Program) qui est un outil d'édition et de retouche d'image, diffusé sous la licence GPLv3 comme un logiciel gratuit et libre.

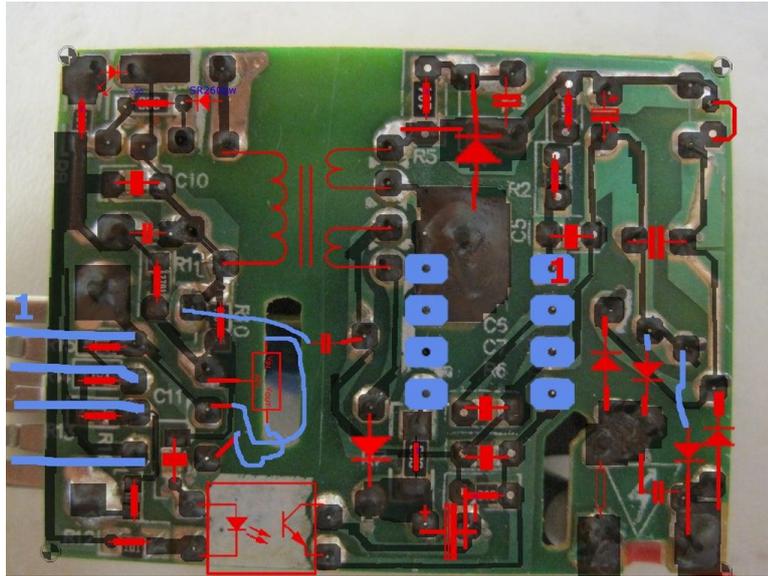


Figure III- 5: Exemple d'une photo d'un circuit électronique traiter avec l'outil GIMP

3.2.2 Logiciel de schématisation PROTEUS :

PROTEUS permet de saisir les schémas électronique (ISIS), soit en page simple, soit en hiérarchique. L'environnement de saisie est entièrement paramétrable, la saisie schématique est très simple et intuitive, tout en restant un outil très puissant pour réaliser des ensembles très complexes et atteindre un requis industriel ISO. Comme il permet de gagner du temps dans la conception ou la vérification en faisant des recherches / modifications ou affectations conditionnelles dans le schéma.

4. Les cartes électroniques SOLARIX PRS :

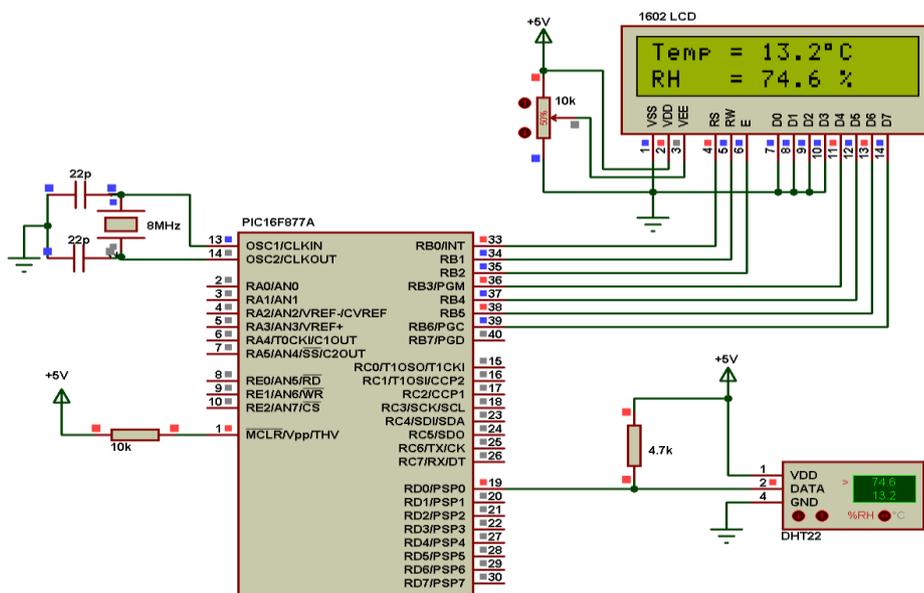


Figure III- 6:Exemple d'un schéma créé sous le logiciel ISIS

4.1 Solarix PRS 2020 :

4.1.1 Boitier du circuit :



Figure III- 7: Boitier de régulateur de charge solaire Solarix PRS 2020

4.1.2 Les composants du circuit :

- **17 RESISTORS**

R1=47.5 k Ω (4752) R2=1 k Ω (1001) R3=100 k Ω (1003) R4=3.32 M Ω (3324) R5= 3.32 k Ω (3321)
R6= 10 M Ω (1005) R7= 1 k Ω (1001) R8= 1 k Ω (1001) R9= 3.32 k Ω (3321) R10= 820 Ω (8200)
R11= ? (000) R12= 274 k Ω (2743) R13= 100 k Ω (1003) R14= 27.4 k Ω (2742) R15= 47.5 k Ω (4752)
R16= 562 Ω (5620) R17= 22 k Ω (2202)

- **10 CAPACITORS**

C2 C3 C4 C5 C6 C7 C8 C9 C10

- **8 DIODES**

D1= Y2 (BZX84-C12) D2= Y2 (BZX84-C12) D3= A7W D4= 1317BJT (DIODE) D5= CXW7 (DIODE) D6= CM2 (CMHZ5257B) D7= CM2 (CMHZ5257B) D8= Y2 (BZX84-C12)

- **5 TRANSISTOR BIPOLAR**

Q1= 1BW (BC846B) Q2= 1BW (BC846B) Q3= 1BW (BC846B) Q4= 1FT (BC847BS/BC847B)
Q5= 3BW (BC856A)

- **PR**

PR1= 100 k Ω PR2= 100 k Ω

RN = 470kd10 (Varistor)

- **4 TRANSISTORS MOSFET**

T1= (IRF3205) T2= (IRF3205) T3= (IRF1407) T4= (IRF1407)

4.1.3 Schéma du circuit SMD :



Figure III- 8: Face supérieure du circuit Solarix PRS 2020

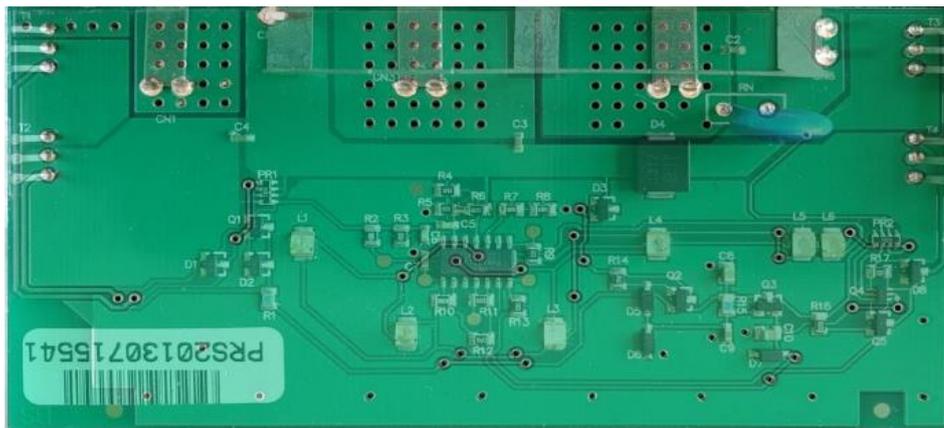


Figure III- 9: Face supérieure et inférieure du circuit Solarix PRS 2020

4.1.4 Traçage du circuit :

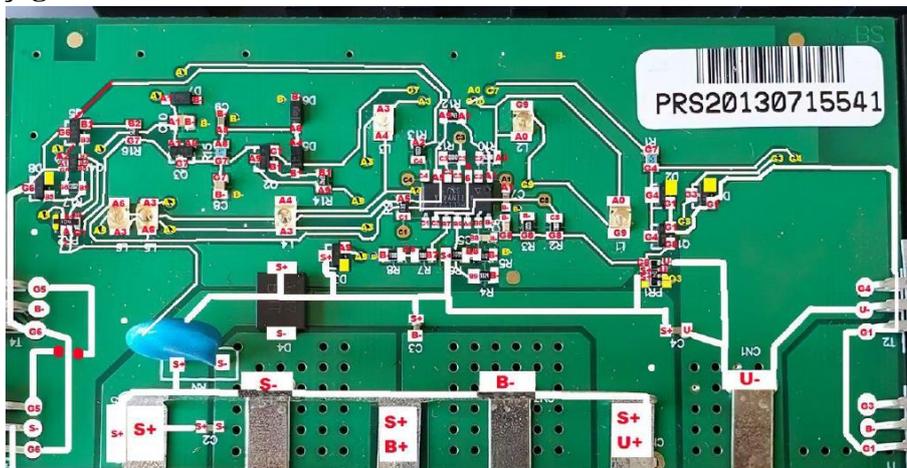


Figure III- 10: Face supérieure avec traçage du circuit Solarix PRS 2020

4.1.5 Traçage du Schéma sur ISIS :

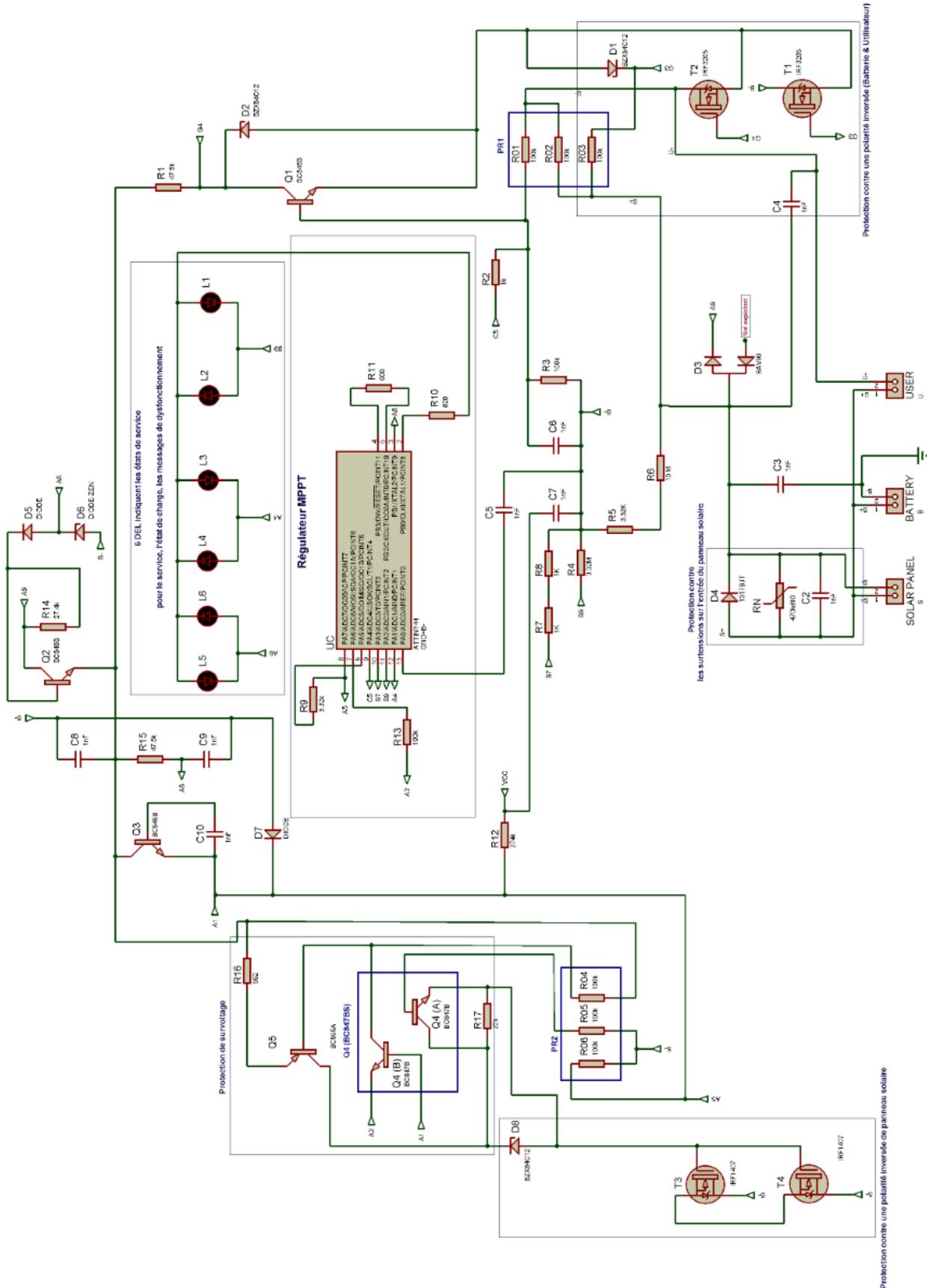


Figure III- 11:Le schéma complet de la carte de Solarix PRS 2020

4.2 Solarix PRS 1515 :

4.2.1 Boitier du circuit :



Figure III- 12: Boitier de régulateur de charge solaire Solarix PRS 1515

4.2.2 Les composants du circuit :

- **17 RESISTORS**

R1=47.5 k Ω (4752) R2=1 k Ω (1001) R3=100 k Ω (1003) R4=3.32 M Ω (3324) R5= 3.32 k Ω (3321)
R6= 10 M Ω (1005) R7= 1 k Ω (1001) R8= 1 k Ω (1001) R9= 3.32 k Ω (3321) R10= 820 Ω (8200)
R11= ? (000) R12= 274 k Ω (2743) R13= 100 k Ω (1003) R14= 27.4 k Ω (2742) R15= 47.5 k Ω (4752)
R16= 562 Ω (5620) R17= 22 k Ω (2202)

- **10 CAPACITORS**

C2 C3 C4 C5 C6 C7 C8 C9 C10

- **8 DIODES**

D1= Y2 (BZX84-C12) D2= Y2 (BZX84-C12) D3= A7W D4= 1317BJT (DIODE) D5= CXW7 (DIODE)
D6= CM2 (CMHZ5257B) D7= CM2 (CMHZ5257B) D8= Y2 (BZX84-C12)

- **5 TRANSISTOR BIPOLAR**

Q1= 1BW (BC846B) Q2= 1BW (BC846B) Q3= 1BW (BC846B) Q4= 1FT (BC847BS/BC847B)
Q5= 3BW (BC856A)

- **PR**

PR1= 100 k Ω PR2= 100 k Ω
RN = 470kd10 (Varistor)

- **4 TRANSISTORS MOSFET**

T1= (IRF2807) T2= (IRF2807) T3= (IRFZ48N) T4= (IRFZ48N)

4.2.3 Schéma du circuit SMD :

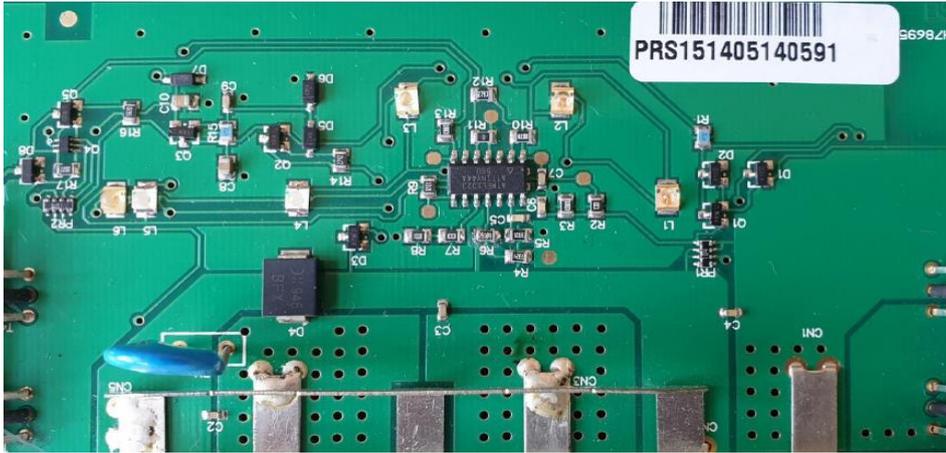


Figure III- 13: Face supérieure du circuit Solarix PRS 1515



Figure III- 14: Face supérieure et inférieure du circuit Solarix PRS 1515

4.2.4 Traçage du circuit :

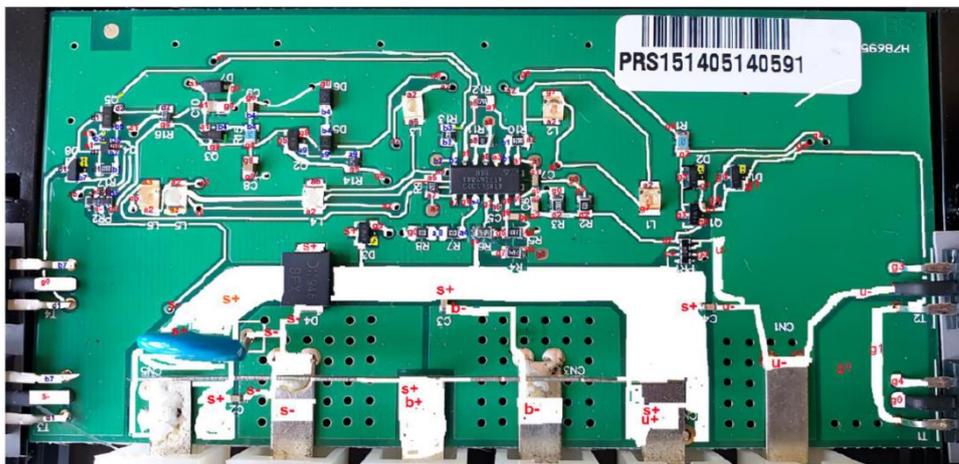


Figure III- 15: Face supérieure avec traçage du circuit Solarix PRS 1515

4.2.5 Traçage du Schéma sur ISIS :

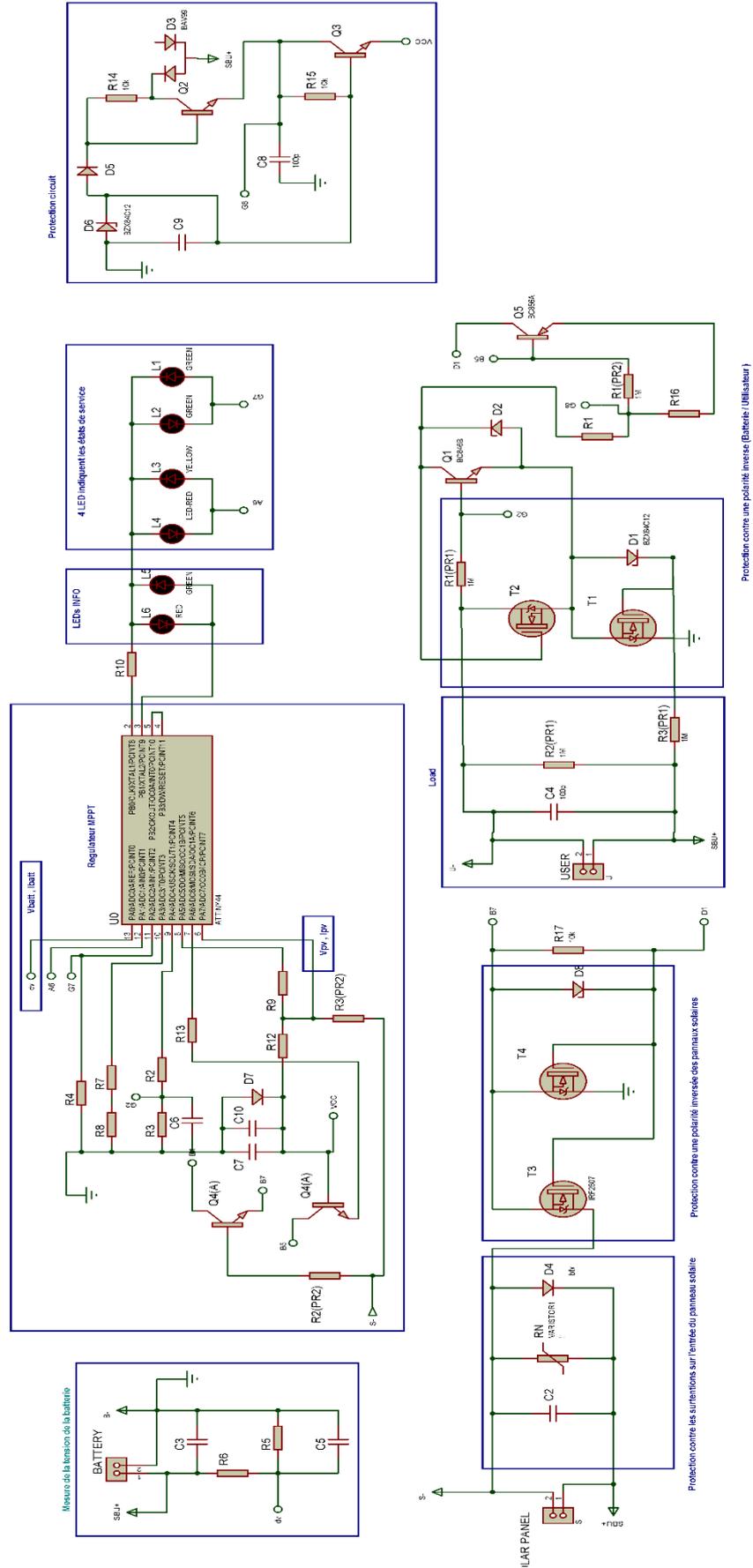


Figure III- 16: Le schéma complet de la carte de Solarix PRS 1515

5. Analyse des circuits :

Notre objectif de ce travail c'était de faire le reverse engineering des régulateurs de charge solaire extraire le schéma électronique et faire ensuite une optimisation de ce circuit, mais malheureusement le schéma électronique était tellement compliqué qu'on n'a pas pu l'analyser correctement et nous n'avons reconnu que quelques blocs qui font des fonctionnalités de base. à partir des schémas ainsi que le manuel d'utilisation de régulateur de charge SOLARIX, nous avons pris des fonctionnalités intéressantes et essayons de développer notre propre version du circuit.

5.1 Caractéristiques du produit SOLARIX [22] :

- Topologie de série avec MOSFETs.
- Sélection automatique de tension.
- Régulation de tension.
- Régulation MLI.
- Technologie de charge à plusieurs niveaux.
- Déconnexion de consommateurs en fonction du courant.
- Reconnexion automatique du consommateur.
- Compensation de température.
- Possibilité de mise à la terre négative d'une borne ou de mise à la terre positive de plusieurs bornes.
- Charge d'égalisation mensuelle.

5.2 Fonctions de protection électroniques [22] :

- Protection contre les surcharges.
- Protection contre les décharges profondes.
- Protection contre une polarité inversée des panneaux solaires(≤ 36 V), des consommateurs et de la batterie.
- Fusible électronique automatique.
- Protection contre les courts-circuits des consommateurs et des panneaux solaires.
- Protection contre les surtensions sur l'entrée du panneau solaire.
- Protection contre circuit ouvert sans batterie.
- Protection contre-courant inverse pendant la nuit.
- Protection contre sur-température et surcharge.
- Déconnexion de consommateurs en cas de surtension de la batterie.

5.3 Affichages [22] :

- Afficheur à DEL multifonction.
- DEL multicolore.
- 5 DEL indiquent les états de service.
- Pour le service, l'état de charge, les messages de dysfonctionnement.

6. Dimensionnement du régulateur de charge solaire :

6.1 Dimensionnement du bloc d'alimentation :

Le fonctionnement de notre circuit de commande exige une alimentation à un seul niveau de tension, Le régulateur de tension LM 7805 pour alimenter le microcontrôleur par une tension fixe égale à 5 V, les différents condensateurs ont les valeurs suivantes :

$C1=1000\mu\text{F}$. $C2=100\text{pF}$.

$C4=100\mu\text{F}$. $C3=100\text{pF}$.

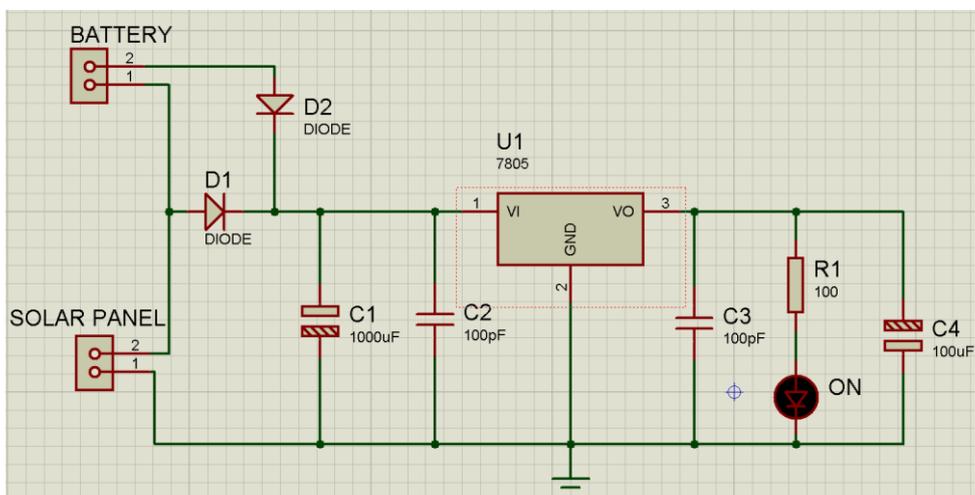


Figure III- 17 : Bloc d'Alimentation DC 5V.

On a mis à l'entrée de l'alimentation deux diodes D1 et D2 qu'ils font la sélectionner de la tension la plus élevée entre la batterie et le panneau solaire (l'entrée qui a la tension la plus élevée sera utilisée comme source d'alimentation).

6.2 Dimensionnement du bloc de puissance :

6.2.1 Dimensionnements des circuits de protections contre inversion de polarité :

Le cas 'inversion de polarité du panneau solaire ou de la batterie est très fréquente et peut induire la détérioration des circuits, Pour des raisons de sécurité, notre système sera doté d'un circuit de protection contre l'inversion de polarité des panneaux et batterie.

Pour mettre les entrées celle de panneau solaire et la batterie en protection contre inversion de polarité nous avons utilisé le circuit (figure III-18) qu'est déjà illustré dans le chapitre 02 :

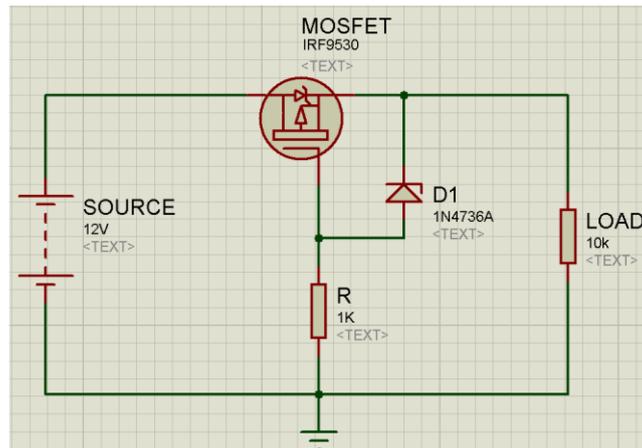


Figure III- 18 : Circuit de protection contre inversion de polarité

❖ Calcul de la puissance maximale dissipée et du courant admissible :

Pour dimensionner le transistor MOSFET dans les conditions les plus défavorables, on doit choisir une tension de $V_{DS} >$ tension de l'entrée dans notre cas on a choisi le MOSFET IRF9530 qui a une tension de $V_{DS} = +100V$ et une résistance R_{ds} faible que possible pour minimiser la dissipation de l'énergie le IRF9530 à une résistance $R_{ds} = 30m\Omega$.

Et le dernier facteur à choisir avec soin c'est le tension V_{GS} en cas d'inversion de polarité $V_{GS} = \pm 20V$, pour les mesures de protection nous avons ajouté une diode Zener de 7 V et une résistance de 1 k Ω environ. Celui-ci entrera en action si l'on dépasse 15 V ou si la tension est négative sur la gâchette plus de 20V.

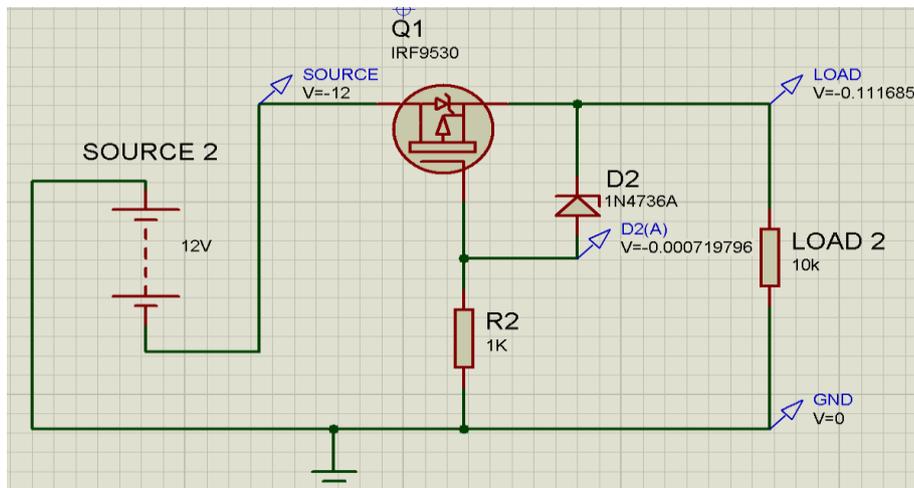
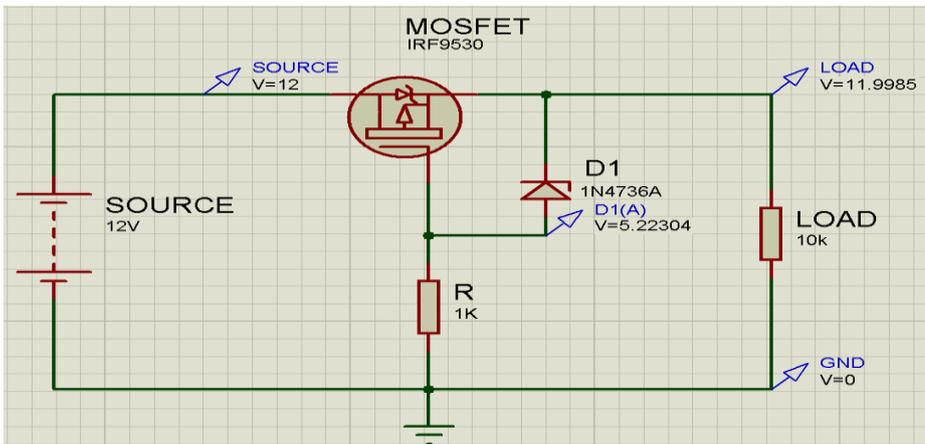


Fig Figure III- 19 : Circuit de protection contre inversion de polarité (Polarité Inversé) Circuit Bloquée



6.2.2 Dimensionnements des circuits de protection contre les surintensités :

Pour la protection contre la surintensité nous avons un circuit électronique hybride (Figure III-21), avec le montage ci-dessous il est facile de détecter le courant maximal de la charge. à la masse, car le courant résultant traversera la résistance shunt R6 et développera ainsi une tension à travers elle.

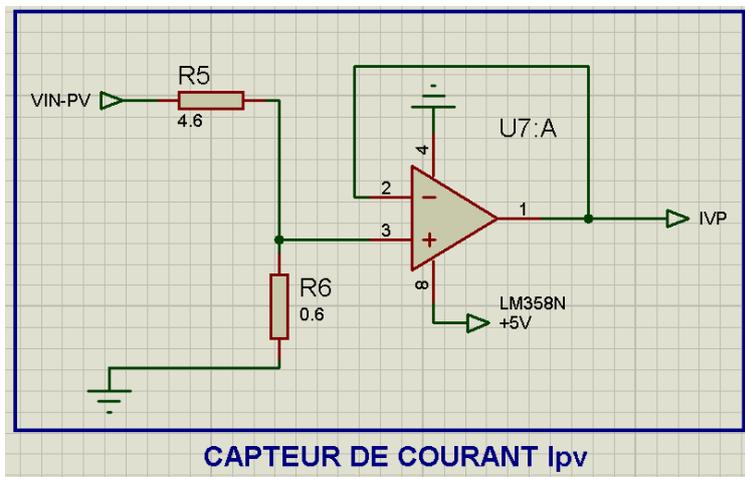


Figure III- 21: Circuit de protection contre les sur intensité

L’amplificateur opérationnel utilisé c’est un suiveur, grâce à son impédance d’entrée très importante et à sa faible impédance de sortie, il permet l’adaptation d’impédance entre le pic et le panneau solaire.

Calcul des résistances :

La sortie de l’amplificateur opérationnel est donnée par :

$$V_{out} = V_{in} \quad \text{III.1}$$

La valeur maximale débitée par le module **6 (A)** (courant de court-circuit du panneau PV) :

$$V_{RS} = R_s \cdot I_s \quad \text{III.2}$$

Comme l'indique les figures III-22 et la figure III-23 , c'est au microcontrôleur qui commande un relais statique ou électromécanique pour débrancher la charge dans de cas de surintensité.

6.3 Dimensionnement du bloc de commande :

6.3.1 Dimensionnement du circuit régulateur de charge de la batterie :

- **Circuit chargeur à base de transistor MOSFET**

Dans cette partie, nous détaillerons le dimensionnement des composants et fonctionnement de contrôleur de charge de la batterie à la figure III-24 :

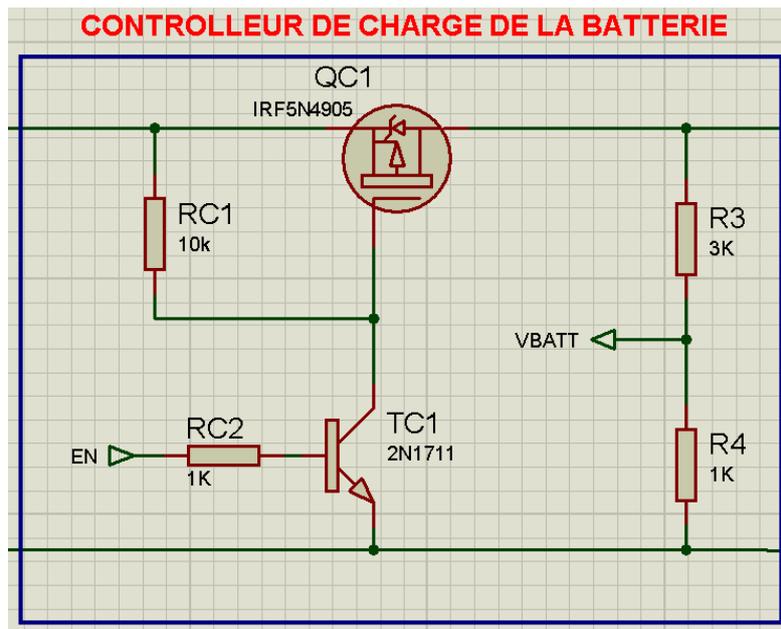


Figure III- 24 : Circuit chargeur de la batterie

Les résistances R3 et R4 permettent l'acquisition d'une image de la tension d'entrée V_{pv} du panneau solaire.

Les caractéristiques techniques du panneau PV sont données sur le tableau ci-dessous, Il s'agit d'un module de 36 cellules de silicium en série, d'une puissance maximale de 100 W.

Puissance Maximal (Pmax)	100 Wp	Tension à Puissance Maximal (Vmax)	17,7 V
Tension Circuit Ouvert (Voc)	21,2 V	Efficacité Module	6,52 %
Courant Circuit Court (Isc)	6 A	Tolérance de Puissance (+)	+ 3 %
Courant à Puissance Maximum (Cmax)	5,1 A		

Tableau 3.1 : Caractéristiques du panneau photovoltaïque.

❖ **Type d'interrupteur :**

Le MOSFET utilisé dispose les caractéristiques figurent sur le tableau 3.2 :

Numéro du composant	RDS(on)	VGS
IRF5N4905	25m Ω	$\pm 20V$

Tableau 3.2 : Caractéristiques Mosfet(IRF5N4905)

Avec :

Vgs : tension de gâchette-source

RDS : drain-source on résistance

- **Circuit du régulateur de charge :**

L'organigramme ci-dessous représente le fonctionnement du régulateur de charge PWM de notre montage :

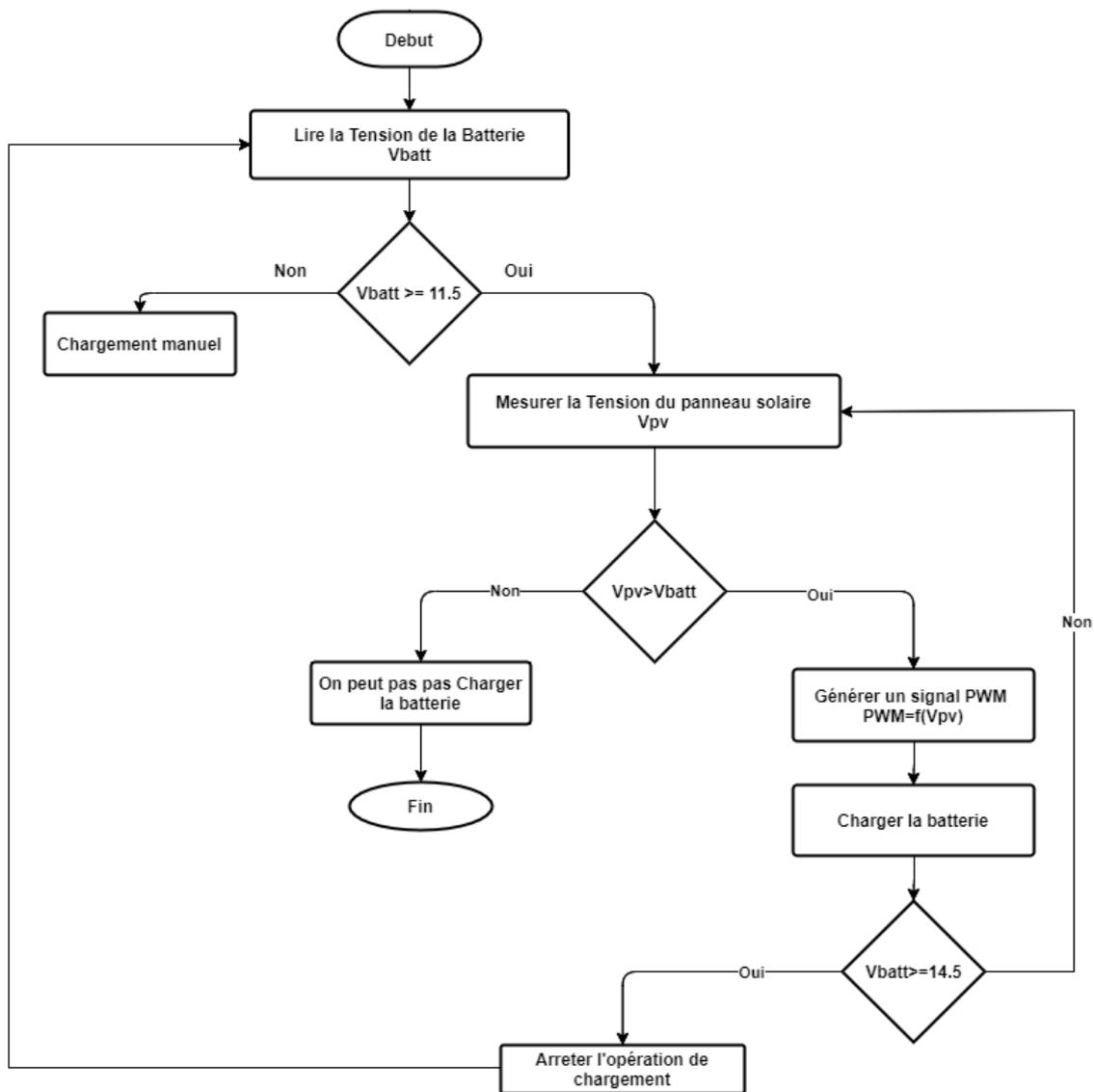


Figure III- 25: Organigramme de régulateur de charge PWM

Le circuit de régulateur de charge à base du pic 16F877 est bien présenté sur la figure III-26 Dans ce montage, le pic délivre un signal PWM dont la période est fixée à 1kHz et le rapport

cyclique est variable dépend de la tension du panneau solaire, le chargeur de batterie délivre une tension moyenne fixe de 13V pour charger la batterie quel que soit fluctuations de la tension du panneau du au nuage, certaines parties du panneau sont dans l'ombre.

Donc la batterie se charge si :

- La tension du panneau est supérieure à 13V
- La tension de batterie est inférieure à 11V

Ce processus de charge s'arrête si la batterie est chargée à 13V et si la tension du panneau solaire est supérieure à 13V.

Donc le microcontrôleur délivre un signal PWM de rapport cyclique de 0.6 lors que la tension du panneau est de 21V et un rapport cyclique de 1 si tension du panneau est de 13V

Si la tension du panneau $13 < V_p < 21$ alors le rapport cyclique $1 > r > 0.6$.

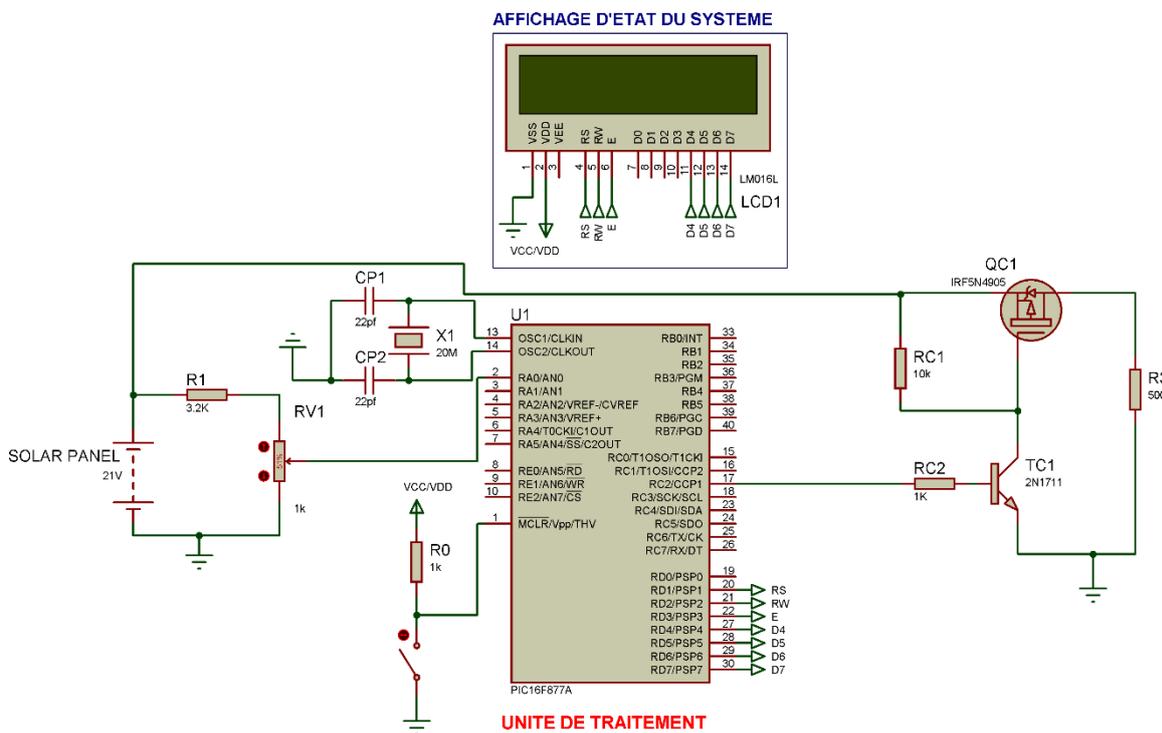


Figure III- 26: Circuit de régulateur de charge PWM à base du pic 16F877

❖ Le Signal PWM :

PWM (PULSE WIDTH MODULATION) est une technique qui permet de générer un signal rectangulaire de fréquence fixe et de largeur d'impulsion variable.

Les caractéristiques d'un signal PWM sont bien illustrés dans la figure III-27

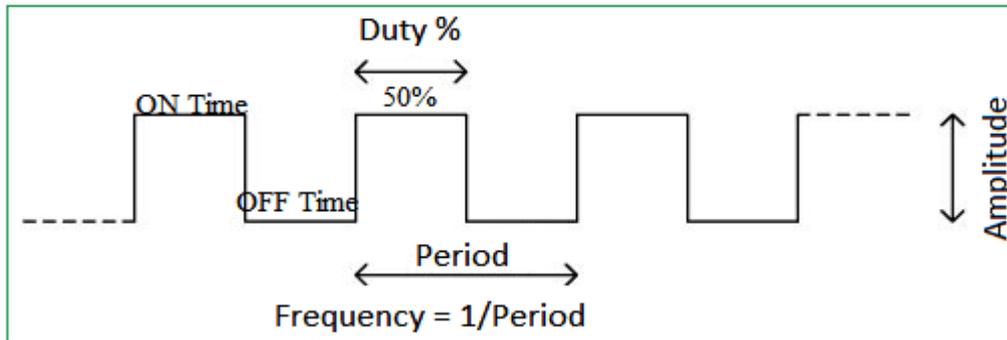


Figure III- 27: Signal PWM avec un cycle de service de 50%

En utilisant les caractéristiques du pic 16F877, le signal PWM est généré en suivant la méthodologie suivante :

La formule de la période d'un signal PWM est donnée par :

$$\text{PWM Period} = [(\text{PR2}) + 1] * 4 * \text{TOSC} * (\text{TMR2 Prescale Value}) \quad \text{III-4}$$

Avec:

PR2 : valeur de pré chargé du Timer

TOSC=1/Fréquence de pic

TMR2 : La valeur de pré-échelle peut être 1; 4 ou 16

Nous avons choisi de travailler avec une période de $T=1\text{ms} \rightarrow F=1\text{khz}$

Avec :

$$TOSC = \frac{1}{F_{pic}} = \frac{1}{4\text{mhz}}$$

$$T_{PWM} = 1\text{ms}$$

de la formule III-1 en obtient :

$$PR2 = \left(\frac{T_{pwm}}{(4.Tosc.TMR2)} - 1 \right) \quad \text{III-5}$$

Application numérique:

$$PR2 = \left(\frac{10^{-3}}{4 \cdot \frac{1}{4 \cdot 10^6 \cdot 4}} - 1 \right) \quad \text{III-6}$$

$$PR2 = 249$$

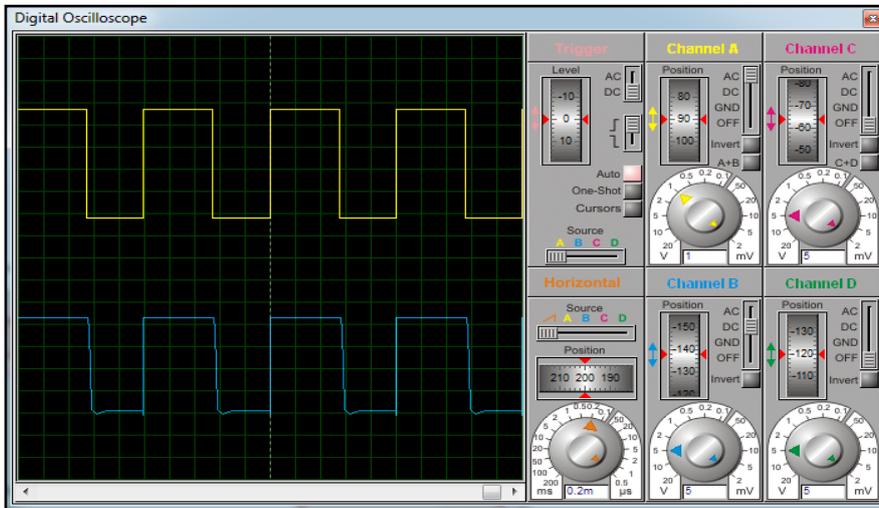


Figure III- 28: Tension de commande et de sortir du circuit chargeur de batterie (le panneau solaire de 21V)

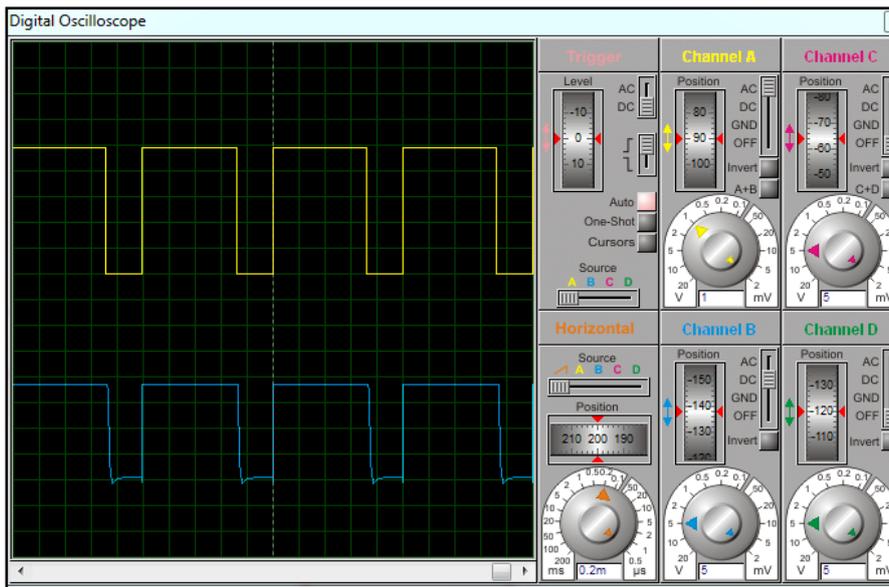


Figure III- 29: Tension de commande et de sortir du circuit chargeur de batterie (le panneau de 18V)

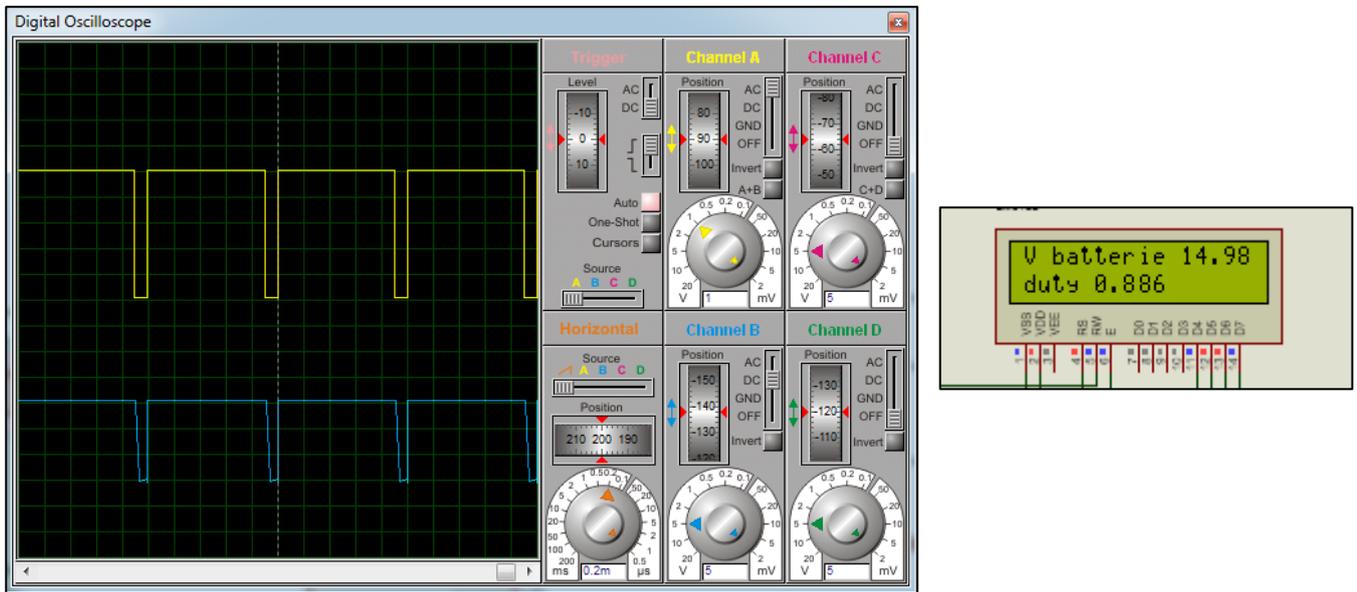


Figure III- 30: Tension de commande et de sortir du circuit chargeur de batterie (le panneau de 15V)

Les résultats de simulation du régulateur de charge sont représentés dans les figures III 28, 29 et 30 pour différentes valeurs de la tension du panneau solaire (21, 18 et 15V) respectivement, donc pour garder la tension de sortie moyenne de charge de batterie fixe est égale à 13V, les rapports cycliques des signaux PWM de commande sont estimer à 0.54, 0.71 et 0.88 pour les tensions respectives du panneau solaire (21, 18 et 15).

6.3.2 Mesure des tensions V_{pv} , V_{Batt} :

Pour la mesure des tensions on a mis un simple pont diviseur de tension que nous réalisons cette opération comme il est illustré dans la figure III-31. La tension entrée au PIC (Upic) sera connectée au pin AN0 du port A configuré en entrée.

- **Calcul des résistances :**

On choisit $V_{pv}=21.2V$ (Tension de circuit ouvert de panneau solaire) et $V_{pic}=5V$ comme valeur maximale d'entée du microcontrôleur :

$$V_{pic} = \left(\frac{R_2}{R_1+R_2} \right) \cdot V_{pv} \rightarrow \frac{V_{pic}}{V_{pv}} = \left(\frac{R_2}{R_1+R_2} \right) \quad \text{III.7}$$

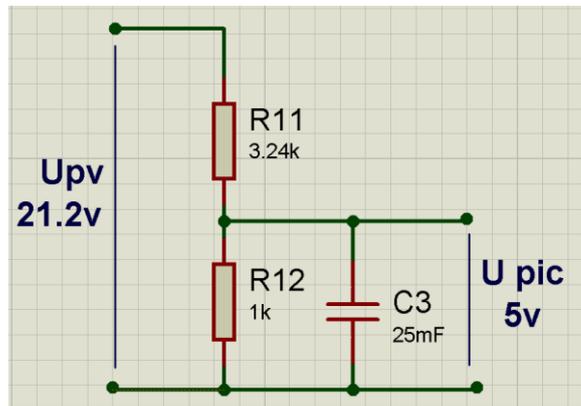


Figure III- 31: Schéma de diviseur de tension

Application numérique :

$$\left(\frac{R_2}{R_1 + R_2} \right) = \frac{5}{21.2}$$

III.8

Pour : $R_{12} = 1 \text{ k}\Omega \rightarrow R_{11} = 3.24 \text{ k}\Omega$

Dans le circuit de simulation nous avons utilisé une entrée $V_{pv} = 12\text{V}$ avec un diviseur de tension de $R_{12} = 10 \text{ k}\Omega \rightarrow R_{11} = 20 \text{ k}\Omega \rightarrow V_{pic} = 5\text{V}$

6.3.3 Isolation galvanique :

Afin d'assurer une isolation galvanique entre le bloc de puissance et le bloc de commande, on utilise un optocoupleur le 4N25, permettant en outre comme driver pour le commutateur de puissance. L'optocoupleur de la figure III-32, encore appelé photo-coupleur est composé de deux éléments :

- un photoémetteur, dans le visible ou l'infrarouge.
- un photorécepteur, le plus souvent un phototransistor.

L'optocoupleur transmet des informations logiques ou analogiques sous forme de signal électrique, via une liaison optique qui isole électriquement l'entrée de la sortie.

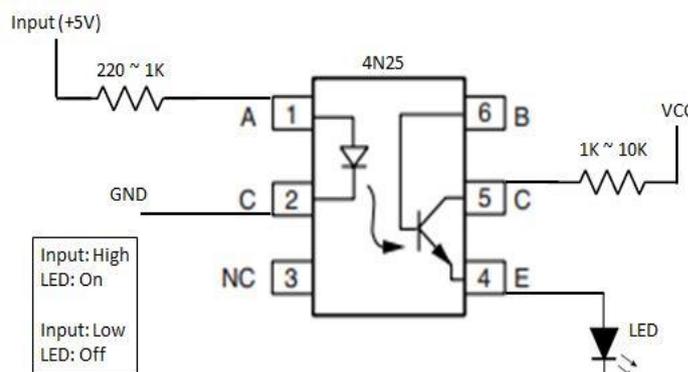


Figure III- 32: Broches du 4N25

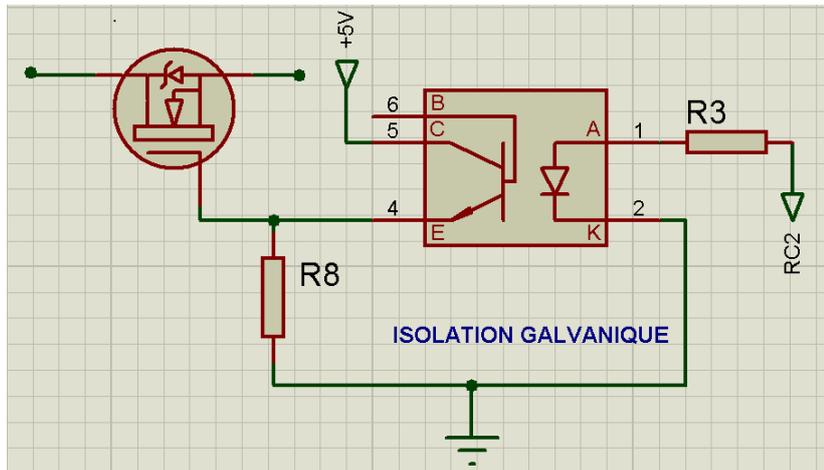


Figure III- 33: Circuit d’isolation partie commande et puissance

7. Le schéma complet de régulateur de charge solaire :

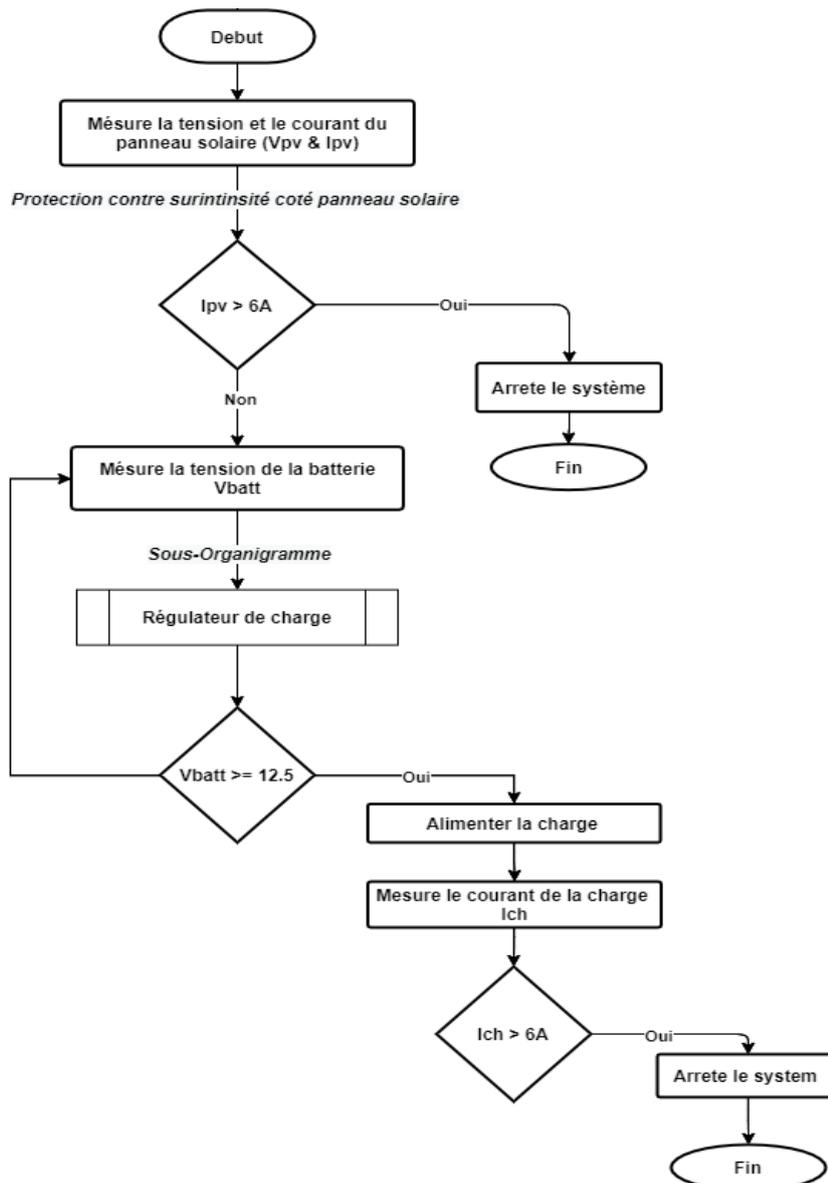


Figure III- 34 : Organigramme de la carte de régulateur de charge solaire

Les circuits traités dans cette partie sont assemblés dans un même circuit (voir schéma du circuit de la figure III.35) pour obtenir un régulateur de charge qui à notre avis satisfait les fonctionnalités (caractéristiques) qui se trouve au niveau des régulateurs industriels tels que solarix1515 et solarix 2020

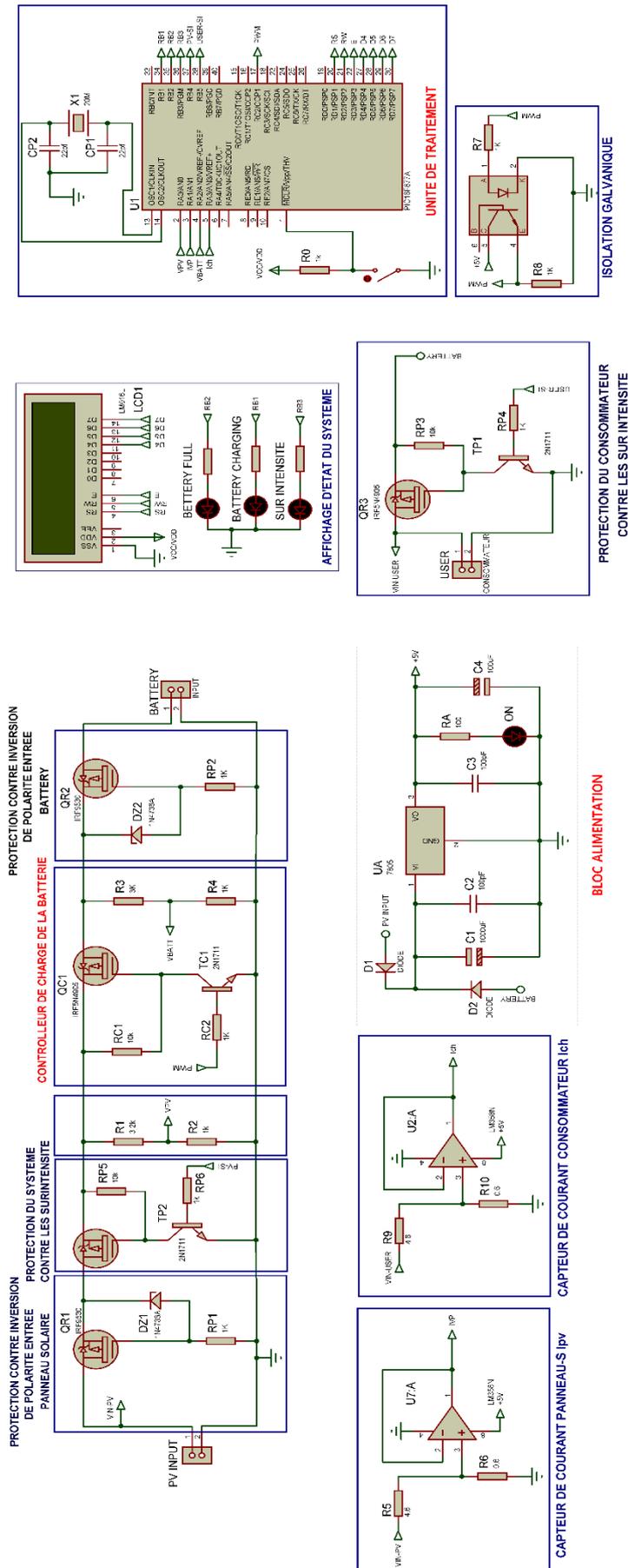


Figure III- 35 : Le schéma complet de la carte de régulateur de charge solaire

Concernant la réalisation de la carte électronique et les résultats de l'essai pratique on n'a pas pu arriver à cette partie à cause de la pandémie (Covid-19) et l'insuffisance des moyens d'équipements.

8. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons utilisé la technique du reverse engineering afin d'obtenir le schéma électronique du régulateur de charge solaire industriel pour une éventuelle optimisation, Nous n'avons pas arriver à ce but. Cependant nous avons utilisé les caractéristiques et les différentes fonctionnalités de cet appareil pour développer notre propre régulateur de charge qui doté de certaines fonctionnalités et caractéristiques similaires à celle du régulateur industriel.

Conclusion Générale

L'objectif principale de ce mémoire est de faire le reverse engineering pour une carte électronique d'un régulateur de charge solaire SOLARIX qui optimise en permanence les paramètres électriques de fonctionnement entre les panneaux solaires le dispositif batterie et les appareils qui les alimente (moteur, pompe, éclairage, réfrigérateur, etc.). L'analyse de la carte électronique et ces fonctionnalités était prévu pour optimiser le circuit électronique du côté cout et performance mais malheureusement cet étape n'est pas faite correctement vus les difficultés rencontrées. En se basant sur l'analyse des différents blocs du schéma électronique obtenu, nous avons réorienté notre objectif vers la conception de notre propre carte avec quelques fonctionnalités que Solarix dispose.

Effectivement, nous avons développé notre régulateur ou chaque bloc est développé et simulé sous proteus, l'ensemble de ces blocs sont assemblés dans le même circuit pour obtenir finalement notre régulateur. La partie réalisation de la carte électronique n'est pas accomplie à cause de la pandémie (Covid-19) et l'insuffisance de moyens d'équipements on a pas pu atteindre la phase de la réalisation.

Ce projet nous a apporté de nombreuses connaissances personnelles, des compétences techniques et générales dans le domaine de l'énergie et de l'électronique.

Le schéma proposé de la carte électronique du régulateur de charge solaire reste ouvert aux différentes suggestions telles que la simulation des modèles du panneau solaire ainsi que celui de la batterie sous proteus pour mener à bien le test des différents algorithmes MPPT. D'autre part l'analyse correcte et l'optimisation du circuit obtenu de solarix 2020 et solarix 1515 peut ouvrir des sujets de recherches dans ce sens.

Annexe

Steca Solarix PRS

PRS 1010, PRS 1515, PRS 2020, PRS 3030

Le régulateur de charge solaire Steca Solarix PRS séduit non seulement par sa simplicité et ses performances mais également par son design moderne et son affichage très pratique, le tout à un prix extrêmement intéressant.

Plusieurs DEL de différentes couleurs donnent un aperçu rapide de l'état de charge de la batterie. Cet appareil fait appel aux algorithmes Steca modernes qui assurent un entretien optimal de la batterie. Les régulateurs de charge Steca Solarix PRS sont équipés d'un fusible électronique, ce qui leur permet de garantir une protection optimale. Ils fonctionnent selon le principe du montage en série et séparent le panneau photovoltaïque de la batterie afin d'empêcher toute surcharge.

Dans le cadre de projets de plus grande envergure, ces régulateurs de charge peuvent également être dotés de fonctions spéciales telles que la fonction éclairage nocturne et la possibilité de choisir entre diverses tensions finales de charge et tensions de protection contre les décharges profondes.

BASIC



Caractéristiques du produit

- Topologie de série avec MOSFETs
- Sélection automatique de tension
- Régulation de tension
- Régulation MLI
- Technologie de charge à plusieurs niveaux
- Déconnexion de consommateurs en fonction du courant
- Reconnexion automatique du consommateur
- Compensation de température
- Possibilité de mise à la terre négative d'une borne ou de mise à la terre positive de plusieurs bornes
- Charge d'égalisation mensuelle

Fonctions de protection électroniques

- Protection contre les surcharges
- Protection contre les décharges profondes
- Protection contre une polarité inversée des panneaux solaires (≤ 36 V), des consommateurs et de la batterie
- Fusible électronique automatique
- Protection contre les courts-circuits des consommateurs et des panneaux solaires
- Protection contre les surtensions sur l'entrée du panneau solaire
- Protection contre circuit ouvert sans batterie
- Protection contre courant inverse pendant la nuit
- Protection contre surtempérature et surcharge
- Déconnexion de consommateurs en cas de surtension de la batterie

Affichages

- Afficheur à DEL multifonction
- DEL multicolore
- 5 DEL indiquent les états de service
- pour le service, l'état de charge, les messages de dysfonctionnement

Options

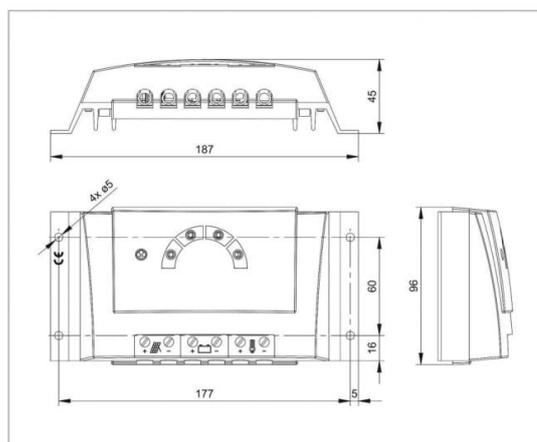
- Fonction crépuscule et éclairage nocturne d'origine ou Steca PA RC 100 réglable
- Paramétrage des valeurs de fonction via le Steca PA RC 100

Certificats

- Conforme aux normes européennes (CE)
- Conforme à la directive RoHS
- Fabriqué en EU
- Fabriqué selon les normes ISO 9001 et ISO 14001

Accessoires

- Steca PA RC100



	PRS 1010	PRS 1515	PRS 2020	PRS 3030
Caractérisation des performances de fonctionnement				
Tension de système	12 V (24 V)			
Consommation propre	< 4 mA			
Côté entrée DC				
Tension à vide du panneau photovoltaïque (à la température de service minimale)	< 47 V			
Courant du panneau	10 A	15 A	20 A	30 A
Côté sortie DC				
Courant du consommateur	10 A	15 A	20 A	30 A
Point de référence de réenclenchement (LVR)	12,4 V ... 12,7 V (24,8 V ... 25,4 V)			
Protection contre la décharge profonde (LVD)	11,2 V ... 11,6 V (22,4 V ... 23,2 V)			
Côté batterie				
Tension de l‘accumulateur	9 V ... 17 V (17,1 V ... 34 V)			
Tension finale de charge	13,9 V (27,8 V)			
Tension de charge rapide	14,4 V (28,8 V)			
Charge d’égalisation	14,7 V (29,4 V)			
Réglage du type d'accumulateur	liquide			
Conditions de fonctionnement				
Température ambiante	-25 °C ... +50 °C			
Installation et construction				
Borne de raccordement (à fils fins / à un fil)	16 mm ² / 25 mm ² - AWG 6 / 4			
Degré de protection	IP 31			
Dimensions (X x Y x Z)	187 x 96 x 45 mm			
Poids	345 g			

- Données techniques à 25 °C / 77 °F
- réglable via Steca PA RC 100: point de référence de réenclenchement, protection contre la décharge profonde, tension finale de charge, tension de charge rapide, charge d'égalisation, type d'accumulateur
- Ne pas raccorder les onduleurs à la sortie de charge.

Bibliographie

Bibliographie

- [1] Manuel des professionnels en finance et développement, «"Chapitre I-Introduction aux technologies d'Energie Durables", E&Co, UNEP, AREED 200 I, pp 83-95.».
- [2] Alain Bilbao Ibarreta, «" Réalisation de commandes MPPT Numériques « Rapport de stage Projet Fin d'Etudes Universtat Rovira Virgili 2006.».
- [3] S. photovoltaïques, «Polytech' Savoie 5eme année Alain Ricaud, Oct 2011».
- [4] L. Balogh, «Implementing Multi-State Charge Algorithm with the UC3909 Switchmode LeadAcid Battery Charger Controller', U-155 Application Note, Unitrode Applications Handbook, pp. 3-488 – 3-516, 1997.».
- [5] «Hegedus, Antonio Luque and Steven Handbook of Photovoltaic Science and Engineering", JohnWiley & Sons Ltd, 2003».
- [6] «photovoltaïque, Informations générales sur le "Informations Techniques", pp 73- 107 Décembre 2000.».
- [7] B. Lindgren, «"A 110 W Inverter for Photovoltaic Applications", submitted to IEEE transactions on Energy Conversion, Energy Development and Power Generation Committee, pp 31-35, 2001.».
- [8] H. Solaire, «"La fabrication des cellules photovoltaïques", fiche technique 13] Florent Monestier, "Amélioration de l'absorption photonique dans les cellules photovoltaïques organiques", thèse de Doctorat, Université de Marseille, 10/04/2008».
- [9] A.BORNI, «Etude et régulation d'un circuit d'extraction de la puissance maximale d'un panneau solaire », Mémoire ingénieurs. université de Constantine, 2009.».
- [10] M. BELARBI, «Contribution à l'étude d'un générateur solaire pour site autonome. Diss. University of sciences and technology in Oran, 2015.».
- [11] S.Abouda, «« contribution à la commande des systèmes photovoltaïques: applications aux systèmes de pompage », Docteur en co-tutelle de l'Université de Reims Champagne-Ardenne et de l'Université de Sfax, L'Ecole Nationale d'Ingénieurs de Sfax, avril 2015.».
- [12] R. Mayfield, «Photovoltaic design & installation for dummies. 2019 : For Dummies.».
- [13] B. Ibrahim, «Modélisation et commande d'un système , Thèse de Magistère , UNIVERSITE ABOU-BAKR BELKAID –TLEMCEM-, 2012».
- [14] C.A. Osaretin and F.O. Edeko, «Design and implementation of a solar charge controller with variable output output,," Journal of Electrical and Electronic Engineering, vol.12, no 2, pp. 41-43, January 2016.».
- [15] S. Issaadi, «Commande d'une poursuite du point de puissance maximum (MPPT) par les Réseaux de Neurones », Mémoire de magister, Ecole Nationale Polytechnique, Alger , Algérie, 2006.».
- [16] M. C. Pastor, «"Conception et Réalisation de Modules Photovoltaïques Electroniques",Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse, 2006».

- [17] e. a. V. Salas, « New algorithm using only one variable measurement applied to a maximum power point tracker ». Solar Energy Materials & Solar Cells 87, p. 675–684, 2005. ».
- [18] H. Abbes, « H. Abid, K. Loukil, A. Toumi, M. Abid « Etude comparative de cinq algorithmes de commande MPPT pour un système photovoltaïque », université de Sfax, Tunisie, 2013. ».
- [19] Jean-Matthieu, «Détrompeur contre les inversions de polarités Edition du 18 mars 2017».
- [20] Mr.Messaoud.MOHAMMEDI, «Support de cours Schémas et Automates Programmables Université Mohamed Khider - Biskra 2011/2012».
- [21] Wikipédia, «Rétro-ingénierie,» [En ligne].
- [22] Fiche technique SOLARIX PRS 1515-2020.
- [23] F. J.P.Ferrieux, «(alimentations à découpage, convertisseurs à résonance).».
- [24] A. Aziz., « Propriétés électriques des composants électroniques minéraux et organiques, Conception et modélisation d'une chaîne photovoltaïque pour une meilleure exploitation de l'énergie solaire ». Thèse de Doctorat, Université Toulouse, 2006. ».
- [25] A. L. a. S. Hegedus, «Handbook of Photovoltaic Science and Engineering", JohnWiley & Sons Ltd, 2003».
- [26] V. P.Maussion, «C. CABAL «Recherche du maximum de puissance sur les générateurs photovoltaïques», université de Toulouse, revue 3E.I, N°54, pp 90-96, septembre 2008. ».
- [27] Mr. TOURQUI Djamel Eddine, «Amélioration de la stabilité d'un réseau électrique par l'intégration des sources d'énergies renouvelables Université Ibn Khaldoun de Tiaret».
- [28] A. H. Steven Luque, «Handbook of Photovoltaic Science and Engineering", John Wiley & Sons Ltd, 2003. ».
- [29] Boukli.hacen.omar, «"Conception et réalisation d'un Générateur photovoltaïque muni d'un convertisseur MPPT pour une meilleur gestion énergétique", Thèse de magister, Université Abou Bakr Belkaid-Telmcen.2011. ».
- [30] Adedamola.Omole, «"Analysis, Modeling and Simulation of Optimal Power Tracking of Multiple Modules of Paralleled Solar Systems", Master of Science Thesis, The Florida State University College of Engineering, 2006. ».
- [31] M.Girard.H.Angelis.M.Girard, «"Alimentations à Découpage (2eme édition)", DUNOD, 2003. ».
- [32] Group.01gr509, «"Power Supply for the AAU Cubesat ", Report, AALBORG University, 2001. ».
- [33] Robert.W.Erickson, «"Fundamentals of Power Electronics ", Chapman & Hall, 115 Fifth Avenue, New York, NY 10003, 1997. ».

ملخص:

إن إنتاج الطاقة الفوتوضوئية مهم جدا وهو مرتبط أساسا بواسطة ظروف مناخية و هذا ما يجعلنا نفكر في تخزين هذه الطاقة لاستعمالها أثناء الليل أو الأيام التي لا تكون مشمسة ومن اجل التحكم في كيفية تخزين هذه الطاقة و الحفاظ على جودة و صلاحية وحدة التخزين نحتاج لربط نظام الطاقة الشمسية بالجهاز المنظم و الذي يعمل كذلك على تنظيم عملية توزيع الطاقة الفوتوضوئية ما بين وحدة التخزين و المستهلك لهذه الطاقة .

في عملنا هذا اهتمنا بعمل هندسة عكسية لدارة كهربائية لمنظم الطاقة الشمسية الذي دوره يتمثل في الرصد المستمر لحالة البطارية من أجل ضمان الحماية ضد التفريغ والشحن المفرطين بالإضافة إلى التأكد من شحنها واستخدامها بصورة أمثل كما قمنا باقتراح دارة كهربائية لها نفس خصائص الدارة المستخرجة عن طريق الهندسة العكسية.

Résume :

La production d'énergie photovoltaïque est très importante et elle est principalement liée aux conditions climatiques et c'est ça exactement qui nous a poussé à penser à stocker cette énergie pour qu'elle soit utile pendant la nuit et les jours non ensoleillés et afin de contrôler comment cette énergie est stockée et maintenir la qualité et la viabilité de l'unité de stockage , nous avons besoin de faire connecter le système solaire avec un système de régulation , qui agit en régulant la distribution de l'énergie photovoltaïque entre l'unité de stockage et le consommateur de cette énergie.

Dans notre travail, nous nous sommes intéressés à la rétro-ingénierie d'un circuit électrique pour le régulateur de charge solaire, dont le rôle est de surveiller en permanence l'état de la batterie afin d'assurer une protection contre les décharges et les surcharges, en plus de s'assurer qu'elle est chargée et utilisée d'une manière optimale . Nous avons également proposé un circuit électrique qui présente les mêmes caractéristiques que le circuit extrait par le reverse engineering.

Mots-clés : Régulateur, Reverse engineering, rétro-ingénierie, batterie acide-au-plomb, system PV.