

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

## **UNIVERSITÉ IBN-KHALDOUN DE TIARET**

**FACULTÉ DES SCIENCES APPLIQUEES**  
**DÉPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE**



# **MEMOIRE DE FIN D'ETUDES**

**Pour l'obtention du diplôme de MASTER**

**Domaine : Sciences et Technologie**

**Filière : Génie Electrique**

**Spécialité : Informatique Industrielle**

## **THÈME**

**REGULATEUR DE CHARGE SOLAIRE**  
**Sujet de réalisation**

**Préparé par :**

- **M. Ait Abderrahim Mohamed Hocine**
- **M. Dokhessi Mohamed Amine**

**Devant le Jury :**

<b>Nom et prénoms</b>	<b>Grade</b>	<b>Université</b>	<b>Qualité</b>
GHELLAB Abdelkader	MCB	U-Tiaret	Président
BELARBI Mustapha	MCB	U-Tiaret	Encadreur
NASRI DJILALI	MCA	U-Tiaret	Examineur

**PROMOTION 2016 /2017**

# Remerciement

*Avant tous, nous remercions Allah, le tout puissant de nous avoir accordé le savoir, la force et le courage pour réaliser ce modeste travail.*

*Nous tenons à exprimer tous nos vifs remerciements et nos profondes gratitudes à M. Belarbi Mustapha, notre encadreur pour sa disponibilité, aides et bonne humeur durant toutes les étapes de réalisation de ce projet. Ses conseils scientifique et suivis, nous a permis de mener notre travail à terme.*

*Notre sincère remerciement et notre profonde gratitude vont aux membres du Jury pour l'honneur qu'ils nous accordent, en acceptant de juger notre modeste travail.*

*Nous restons redevables envers : M. Djillali Nasri et M. Amine Bouzid qui ont mis à notre disposition leurs expérience pour la réalisation de ce projet. Nous tenons à les remercier pour leurs précieux conseils et orientations et pour l'aide qu'ils nous ont donné.*

*Nous adressons un sincère remerciement aux professeurs et membres d'administration du Département de Génie Electrique qui ont contribué de près ou de loin à notre formation.*

*En fin nous tenons à remercier tous nos familles, nos amis et toutes les personnes qui nous ont soutenus durant notre réalisation de ce mémoire.*

# Dédicace

*Nous dédions ce modeste travail :*

*A nos chers parents, qu'Allah les garde  
ces êtres qui éclairent nos vies, qui ont su  
nous éduquer, qui étaient toujours derrière  
nous et qui nous ont poussé à aller toujours  
vers l'avant.*

*A tous nos frères et sœurs*

*A toutes nos familles*

*A tous nos amis*

*A tous ceux qui nous sont chères*

## Sommaire

Liste des figures .....	7
Introduction générale .....	9
Chapitre I : Généralités sur les systèmes photovoltaïques.....	11
1. Energie solaire.....	12
2. Rayonnement solaire .....	12
3. Effet photovoltaïque .....	13
4. Cellule photovoltaïque.....	13
5. Types de cellules solaires photovoltaïques .....	14
6. Principe de fonctionnement .....	15
7. Constitution d'un générateur photovoltaïque (GPV) .....	16
7.1. Association en série .....	16
7.2. Association parallèle.....	16
7.3. Association série-parallèle .....	17
8. Différents modèles électriques d'une cellule photovoltaïque .....	17
8.1. Modèle deux diodes à sept paramètres (2D7P).....	18
8.2. Modèle deux diodes à six paramètres (2D6P).....	18
8.3. Modèle deux diodes à cinq paramètres (2D5P).....	19
8.4. Modèle une diode à quatre paramètres (1D4P).....	19
8.5. Modèle une diode à trois paramètres (1D3P).....	20
9. Choix du modèle .....	20
10. Les différents paramètres qui influent sur le module solaire .....	21
10.1. Effet de l'éclairement.....	21
10.2. Influence de la température .....	21
10.3. Influence de la résistance série .....	21
11. Stockage de l'énergie avec des batteries .....	21
12. Les types de batteries .....	22
13. Différents modèles de batterie solaire.....	22
13.1. Batteries acide-au-plomb .....	22
13.2. Batteries nickel-cadmium (NiCD).....	22
13.3. Batteries nickel-metal-hydrure (NiMH).....	22
13.4. Caractéristiques principales d'une batterie solaire .....	23
13.4.1. Poids et volume .....	23
13.4.2. Tension.....	23
13.4.3. Capacité.....	23

13.4.4.	Durée de vie.....	23
13.4.5.	Parties de régulation.....	24
14.	Batteries acide-au-plomb .....	24
14.1.	Composition de la batterie acide-au-plomb.....	25
14.2.	Utilisation des batteries acide-au-plomb .....	26
14.3.	Caractéristiques techniques .....	26
14.4.	Fonctionnement d'une batterie acide-au-plomb .....	27
14.4.1.	Pendant la charge .....	28
14.4.2.	Pendant la décharge .....	29
15.	Conclusion.....	29
Chapitre II: Régulateur de charge solaire .....		30
1.	Types des régulateurs de charge .....	31
1.1.	Le régulateur shunt « tout ou rien ».....	31
1.2.	Le régulateur shunt linéaire.....	32
1.3.	Le régulateur série « tout ou rien ».....	32
1.4.	Le régulateur série linéaire.....	32
1.5.	Le régulateur MPPT .....	32
1.6.	Le régulateur MLI .....	32
2.	Algorithme de charge en trois étapes .....	33
2.1.	Charge à tension constante.....	33
2.2.	Charge à courant constant.....	33
2.3.	Algorithme de charge en trois étapes.....	33
3.	Conception du régulateur de charge .....	34
4.	Description générale d'un microcontrôleur PIC16F877A.....	36
5.	Les temporisateurs du PIC16F877A .....	38
6.	Les interruptions.....	38
7.	Le module de conversion analogique/numérique .....	38
8.	Brochage et alimentation du PIC16F877A.....	41
9.	Mesure de tension de la batterie.....	41
10.	Isolation de la partie commande de la partie puissance .....	42
11.	Représentation de l'état de charge sur un afficheur LCD .....	43
12.	Interface de communication série (RS232).....	44
13.	Conclusion.....	46
Chapitre III: Réalisation pratique du régulateur de charge .....		48
1.	Logiciels utilisés.....	49

1.1.	Programmation en C avec le logiciel CCS-PICC.....	49
1.2.	Logiciel de schématisation/routage PROTEUS .....	50
1.3.	Logiciel de programmation graphique LabVIEW .....	51
2.	Réalisation de la première carte de régulation .....	52
3.	Mise à jour de la carte de régulation de charge.....	54
3.1.	Circuit de mesure du courant de charge/décharge.....	54
3.2.	Mesure de la température.....	55
3.3.	Assemblage de la nouvelle carte de régulation de charge.....	55
4.	Essai pratique du cycle de charge .....	59
5.	Essai pratique du cycle de décharge.....	60
6.	Conclusion .....	61
	Conclusion générale .....	62
	Bibliographie.....	64

## Liste des figures

### Chapitre I

Figure I- 1 : Structure basique d'une cellule solaire .....	13
Figure I- 2 : Différents types de cellules solaires .....	14
Figure I- 3 : Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque.....	15
Figure I- 4 : Branchement de cellules identiques en série .....	16
Figure I- 5 : Branchement de cellules identiques en parallèles.....	17
Figure I- 6 : Branchement série/parallèle de cellules identiques : (a) Architecture classique d'un panneau solaire avec diodes de protection ; (b) Contournement du module défectueux par la diode bypass.....	17
Figure I- 7 : Modèle 2 diodes à 7 paramètres .....	18
Figure I- 8 : Modèle 2 diodes à 6 paramètres .....	18
Figure I- 9 : Modèle 2 diodes à 5 paramètres .....	19
Figure I- 10 : Modèle 1 diodes à 4 paramètres .....	19
Figure I- 11 : Modèle 1 diode à 3 paramètres .....	20
Figure I- 12 : Portraits et médaille de Gaston Planté.....	24
Figure I- 13: Première batterie rechargeable conçue par Gaston Planté composé par 9 cellules montées en parallèle .....	25
Figure I- 14 : Constitution d'une batterie acide-au-plomb .....	26
Figure I- 15 : Accumulateur acide-au-plomb chargé .....	27
Figure I- 16 : Principe de fonctionnement de l'accumulateur acide-au-plomb .....	28
Figure I- 17 : Courbe de charge et décharge d'une batterie acide-au-plomb .....	29

### Chapitre II

Figure II- 1 : Principe de fonctionnement du régulateur de charge .....	31
Figure II- 2 : Principes de fonctionnements du régulateur de charge .....	34
Figure II- 3 : Architecture interne du PIC16F877A .....	36
Figure II- 4 : Les PORTS et les différentes broches du PIC16F877A .....	37
Figure II- 5 : Structure du convertisseur analogique-numérique .....	39
Figure II- 6 : Registre ADCON0 de configuration du convertisseur analogique-numérique.....	39
Figure II- 7 : Registre ADCON1 de configuration du convertisseur analogique-numérique.....	40
Figure II- 8 : Minimum de brochage pour faire fonctionner un PIC16F877A .....	41
Figure II- 9 : Circuit d'acquisition de la tension de la batterie .....	42
Figure II- 10 : Brochage du relais .....	42
Figure II- 11 : Schéma de l'isolation optique .....	43
Figure II- 12 : Schéma fonctionnel d'un afficheur LCD .....	43
Figure II- 13 : Brochage d'un afficheur LCD LM016 (2x16) avec un PIC16F877A .....	44
Figure II- 14 : Broches de connexion RS232.....	45
Figure II- 15 : Brochage du MAX232 au port DB9 Femelle.....	45
Figure II- 16 : Schéma interne du MAX232 .....	46

### Chapitre III

Figure III- 1 : Logiciels utilisés pour effectuer les simulations des cartes électroniques	49
Figure III- 2 : Exemple de structure d'un programme en langage CCS-PICC	50
Figure III- 3 : Exemple d'un schéma créé sous le logiciel ISIS	50
Figure III- 4 : Exemple d'une partie d'un circuit imprimé créée sous le logiciel ARES	51
Figure III- 5 : Exemple d'une interface graphique créée sous le logiciel LabVIEW	51
Figure III- 6 : Schéma global de la réalisation du régulateur de charge	52
Figure III- 7 : Première version du régulateur de charge réalisé	52
Figure III- 8 : Vision 3D de la première version du régulateur de charge réalisé	53
Figure III- 9: Première version réalisée du régulateur de charge	53
Figure III- 10 : Premier essai de calibration des mesures de tensions	54
Figure III- 11 : Schéma d'amplification pour mesurer le courant de charge/décharge	55
Figure III- 12 : Schéma de branchement du capteur de température	55
Figure III- 13 : Schéma de la nouvelle carte de régulation de charge	56
Figure III- 14 : Schéma de réalisation de la nouvelle carte de régulation de charge	57
Figure III- 15 : Représentation 3D de la nouvelle carte de régulation de charge	57
Figure III- 16 : Mise en marche du banc d'essai avec la communication PC	58
Figure III- 17 : Calibration de la mesure du courant et de la température	58
Figure III- 18 : Charge de la batterie directement à partir de la source de tension	59
Figure III- 19 : Charge de la batterie directement à partir du panneau solaire photovoltaïque	59
Figure III- 20 : Autodécharge d'une batterie veuille	60
Figure III- 21 : Décharge d'une batterie via une résistance de puissance	61

# ***INTRODUCTION GENERALE***

L'énergie est l'un des moteurs de développement des sociétés. Elle est aussi le pilier de l'économie moderne, l'étincelle qui permet l'accomplissement de toute activité humaine. Ses sources sont diversifiées au cours du temps afin de satisfaire les besoins toujours en augmentation de l'industrie et des consommateurs.

Actuellement, la production de l'énergie est basée en grande partie sur des ressources fossiles limitées, le pétrole, le gaz et le charbon. Ces sources deviennent de plus en plus rares pendant que les demandes énergétiques du monde s'élèvent continuellement.

Étant donné que ces formes d'énergie ont des effets nuisibles sur l'environnement (effet de serre, réchauffement climatique ...), il est nécessaire de trouver une autre solution pour prendre le relais. Pour cela, beaucoup de recherches scientifiques ont été réalisées afin de trouver une source d'énergie illimitée, économique et peu polluante telles que le solaire et l'éolien, car la protection de l'environnement est devenue un point important.

De nos jours, l'homme consomme environ  $336 \times 10^{18} \text{J}$  par an, notamment dans les secteurs de l'industrie, des transports et de l'habitation. Cette énergie est fournie par le pétrole à 41% mais cette source d'énergie est vouée à disparaître en 2060 d'après l'IFPEN (Institut Français du Pétrole et Energies Nouvelles). La terre reçoit chaque année  $383 \times 10^{22} \text{J}$ , soit 10 000 fois plus que la consommation annuelle d'énergie. Ainsi, il devient urgent de développer les technologies capables de capter cette énergie qui est à la fois gratuite et intarissable.

À titre d'exemple pour donner un ordre de grandeur des énergies mises en jeu, notre sud algérien reçoit à une moyenne d'ensoleillement de dix heures par jour une énergie électrique de  $8 \text{ kWh/m}^2$ . Ceci représente approximativement l'équivalent d'une énergie thermique d'un litre d'essence par mètre carré. Ainsi, nous pouvons imaginer que même si nous disposons d'un capteur ayant un rendement de 10%, nous pouvons récupérer une énergie importante en dépit de son coût qui est relativement important.

D'une façon ou une autre, l'énergie solaire, toujours présente dans la vie de la planète, est imprécisable pour le développement de la vie. Cependant, la manière dont la civilisation humaine a inventé des stratégies et tirer profit des nouvelles inventions a subi une longue évolution.

A l'heure actuelle, nous savons comment stocker cette énergie grâce à des accumulateurs ; mais les réactions internes aux batteries peuvent les endommager.

L'objectif de ce travail est une contribution à la réalisation d'un régulateur solaire qui permet le contrôle continu de l'état de charge d'une batterie acide-au-plomb afin de préserver sa vie au maximum, en assurant sa protection contre les surcharges et les décharges profondes. Il s'agit également de faire en sorte que lorsque la batterie se décharge et arrive à un niveau critique le régulateur va stopper la décharge. En outre, si la batterie se charge et arrive à un seuil le régulateur va aussi stopper la charge.

Enfin, nous expliquerons le fonctionnement logique du circuit électronique, son principe d'autorégulation, les étapes de la réalisation, l'interfaçage avec un ordinateur et les résultats obtenus lors des essais.

**CHAPITRE I :**  
**GENERALITES SUR**  
**LES SYSTEMES PHOTOVOLTAÏQUES**

---

## CHAPITRE I : Généralités sur les systèmes photovoltaïques

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 le biais d'une cellule basée sur un phénomène physique appelé effet photovoltaïque (PV) qui consiste à produire une force électromotrice lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière. La tension générée peut varier entre 0.3 V et 0.7 V en fonction du matériau utilisé pour la fabrication de la cellule et de sa disposition ainsi que de la température et de son vieillissement. L'association de plusieurs cellules PV en série/parallèle donnent lieu à un générateur photovoltaïque (GPV) qui a une caractéristique courant-tension non linéaire présentant un point de puissance maximale.

### 1. Energie solaire :

Le soleil est une source quasiment inépuisable d'énergie qui envoie à la surface de la terre un rayonnement qui représente chaque année environ 8 400 fois la consommation énergétique. Cela correspond à une puissance instantanée reçue de 1 kiloWatt crête par mètre carré (kWc/m<sup>2</sup>) répartie sur tout le spectre, de l'ultraviolet à l'infrarouge.

Les déserts de notre planète reçoivent en 6 heures plus d'énergie du soleil que n'en consomme l'humanité en une année. L'énergie solaire est produite et utilisée selon plusieurs procédés :

- L'énergie solaire thermique qui consiste tout simplement à produire de la chaleur grâce à des panneaux sombres. On peut aussi produire avec de la vapeur à partir de la chaleur du soleil puis convertir la vapeur en électricité.
- L'énergie solaire photovoltaïque qui consiste à produire directement de l'électricité à partir de la lumière à l'aide de panneaux solaires photovoltaïques. Cette forme d'énergie est déjà exploitée dans de nombreux pays, surtout dans les pays ou les régions ne disposant pas de ressources énergétiques conventionnelles tels que les hydrocarbures ou le charbon [1].

### 2. Rayonnement solaire :

Le soleil est une étoile parmi tant d'autres. Il a un diamètre de 1 390 000 km, soit environ 50 fois celui de la terre. Il est composé à 80% d'hydrogène, 19% d'hélium et 1% d'un mélange de 100 éléments, soit pratiquement tous les éléments chimiques connus. En s'appuyant sur la théorie de la relativité d'Einstein, Langevin et Perrin ont émis l'idée que c'est l'énergie de fusion nucléaire qui fournit au soleil sa puissance. Il est aujourd'hui admis que le soleil est une bombe thermonucléaire hydrogène/hélium transformant chaque seconde 564 millions de tonnes d'hydrogène en 560 millions de tonnes d'hélium, la réaction se faisant dans son noyau à la température d'environ 25 millions de degrés Celsius. Ainsi, à chaque seconde, le soleil est allégé de 4 millions de tonnes dispersées sous forme de rayonnement.

Sa lumière, à une vitesse de 300 000 km/s et à une distance moyenne entre soleil/terre de 150 million de kilomètre, met environ 8 minutes pour parvenir à la terre. Sa distribution spectrale dans l'atmosphère présente un maximum pour une longueur d'onde d'environ 0.5 µm [2].

### 3. Effet photovoltaïque :

Découvert en 1839 par le physicien français Antoine Becquerel qui se demandait pourquoi certains matériaux faisaient des étincelles lorsqu'ils étaient exposés à la lumière. 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.

L'énergie photovoltaïque eut un regain d'intérêt dans les années 1950 lors des premiers lancements spatiaux de satellites puis lors des missions lunaires. Les crises économiques des années 1970 flambée des prix du pétrole, puis les accidents de centrales nucléaires tels ceux de Three Mile Island (USA, 1979) ou de Tchernobyl (URSS, 1986) renforcèrent l'intérêt du grand public envers les énergies renouvelables, en particulier l'énergie photovoltaïque qui s'impose comme une des sources d'énergies renouvelables les plus prometteuses [3].

### 4. Cellule photovoltaïque :

La cellule photovoltaïque ou encore photopile est le plus petit élément d'une installation photovoltaïque. Elle est composée de matériaux semi-conducteurs et transforme directement l'énergie lumineuse en énergie électrique. Les cellules photovoltaïques sont constituées de :

- Une fine couche semi-conductrice. Un matériau possédant une bande interdite, qui joue le rôle de barrière d'énergie que les électrons ne peuvent franchir sans une excitation extérieure, et dont il est possible de faire varier les propriétés électroniques, tel que le silicium qui présente une conductivité électrique relativement bonne.
- Une couche antireflet permettant une pénétration maximale des rayons solaires.
- Une grille conductrice sur le dessus formant la cathode et d'un métal conducteur sur le dessous formant l'anode.

Les plus récentes possèdent même une nouvelle combinaison de multicouches réfléchissants justes en dessous du semi-conducteur, permettant à la lumière de rebondir plus longtemps dans celui-ci pour améliorer le rendement [2].

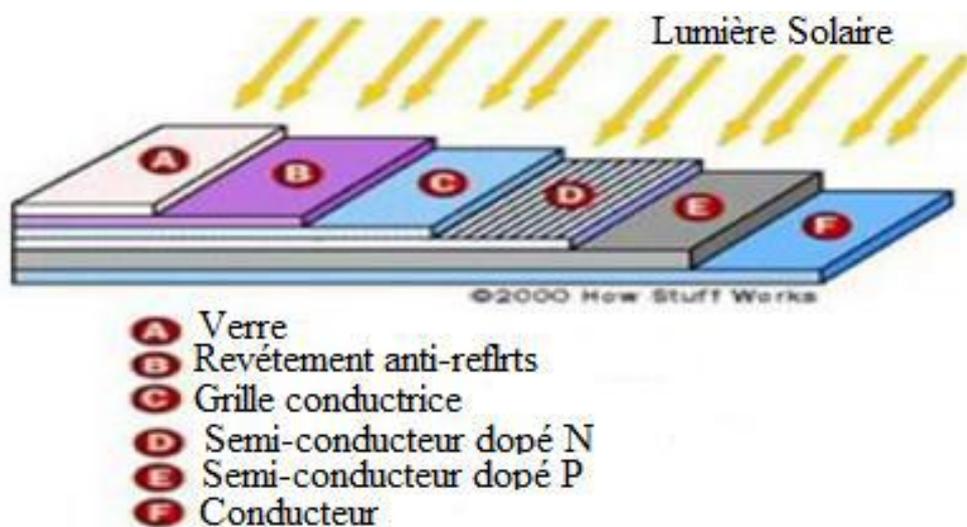


Figure I- 1 : Structure basique d'une cellule solaire

## 5. Types de cellules solaires photovoltaïques :

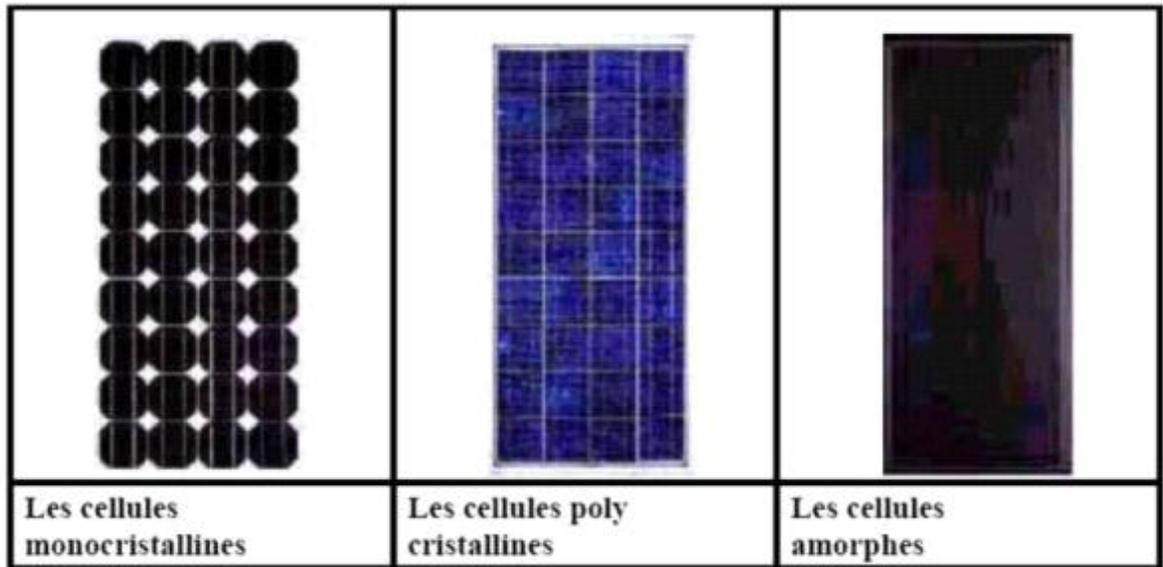


Figure I- 2 : Différents types de cellules solaires

Il existe différents types de cellules solaires photovoltaïques :

- Les cellules monocristallines caractérisées par :
  - Première génération de photopiles.
  - Rendement excellent de 12 à 16% (23% en laboratoire).
  - Méthode de fabrication laborieuse et difficile, donc très chère.
  - Nécessite une grande quantité d'énergie pour obtenir un cristal pur.
- Les cellules polycristallines se caractérisent par :
  - Coût de production moins élevé.
  - Procédé nécessitant moins d'énergie.
  - Rendement moyen de 11 à 13% (18% en laboratoire).
- Les cellules amorphes se caractérisent par :
  - Coût de production bien plus bas.
  - Rendement plus bas de 8 à 10% (13% en laboratoire).
  - Durée de vie plus faible.

C'est le silicium amorphe que l'on trouve le plus souvent dans les produits de consommation comme les calculatrices, les montres ... Toutefois, ils réagissent mieux à des températures élevées ou à une lumière diffuse.

De plus, les cellules monocristallines et polycristallines sont les types de cellules les plus répandues sur le marché du photovoltaïque (environ 60% de la production).

Les cellules nanocristallines présentent les dernières générations de photopiles. Elles fonctionnent selon un principe qui différencie les fonctions d'absorption de la lumière et de séparation des charges électriques. Leur rendement global est d'environ 10.4% en laboratoire. Le procédé et le coût de leur production reste encore le plus bas [4].

## 6. Principe de fonctionnement :

Il existe différentes techniques permettant la conversion directe de la lumière solaire en électricité, la plus connue est la conversion photovoltaïque effectuée à l'aide de matériaux semi-conducteurs tel que le silicium (Si), le germanium (Ge), le sélénium (Se) ou les composés semi-conducteurs tel que l'arséniure de gallium (GaAs), le tellure de cadmium (CdTe). Les cellules solaires de type GaAs sont très coûteuses dans leur fabrication, leur utilisation est aujourd'hui essentiellement limitée aux applications spatiales. La majorité des cellules photovoltaïques sont fabriquées à partir du silicium cristallin, car il possède la caractéristique d'être non toxique contrairement au cadmium ou au sélénium, en plus, il permet d'atteindre des efficacités de conversion remarquables, il constitue environ 28% de l'écorce terrestre sous forme de composés (silicates, silice), ce qui en fait une source quasi inépuisable. La cellule solaire à semi-conducteur est un dispositif permettant de débiter un courant électrique dans une charge externe lorsque celui-ci est exposé à la lumière. Son principe de fonctionnement se résume comme suit :

Lorsque la cellule est exposée au rayonnement solaire, les photons d'énergie ( $E_{ph}=h\nu$ ) pénétrant dans la cellule solaire transmettent leur énergie aux atomes de la jonction. Si cette énergie est suffisamment élevée, elle peut faire passer les électrons de la bande de valence à la bande de conduction du matériau semi-conducteur et créer ainsi des paires « électron-trou ». Les électrons (charges N) et les trous (charges P), sont alors maintenus séparés par un champ électrique qui constitue une barrière de potentiel. 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 [3].

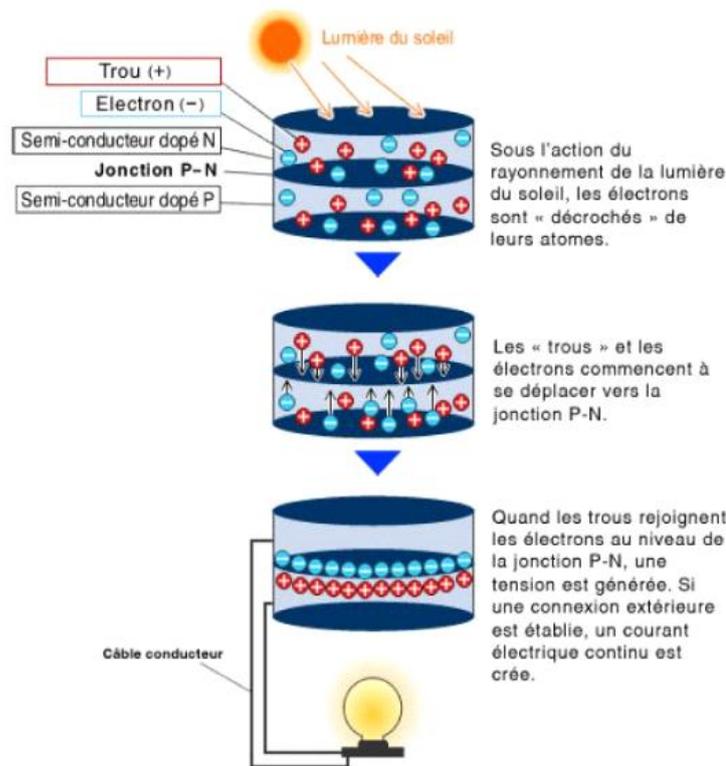


Figure I- 3 : Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

## CHAPITRE I : Généralités sur les systèmes photovoltaïques

La cellule photovoltaïque reste l'élément de base de toute générateur photovoltaïque quelle que soit la puissance considérable demandée. Pour prévoir ses performances, il est très important de connaître son modèle mathématique. Pour but de simulation et de conception, plusieurs chercheurs ont étudié la cellule photovoltaïque en employant différents modèles.

### 7. Constitution d'un générateur photovoltaïque (GPV) [5] :

L'association de plusieurs cellules photovoltaïques en série/parallèle donne lieu à un générateur photovoltaïque. Si les cellules se connectent en série, les tensions de chaque cellule s'additionnent, augmentant la tension totale du générateur. D'une autre part, si les cellules se connectent en parallèle, c'est l'ampérage qui augmentera comme représentés sur les figures qui suivent.

#### 7.1. Association en série :

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

La caractéristique résultante obtenue en associant en série  $N_s$  cellules identiques est représentée par la figure suivante :

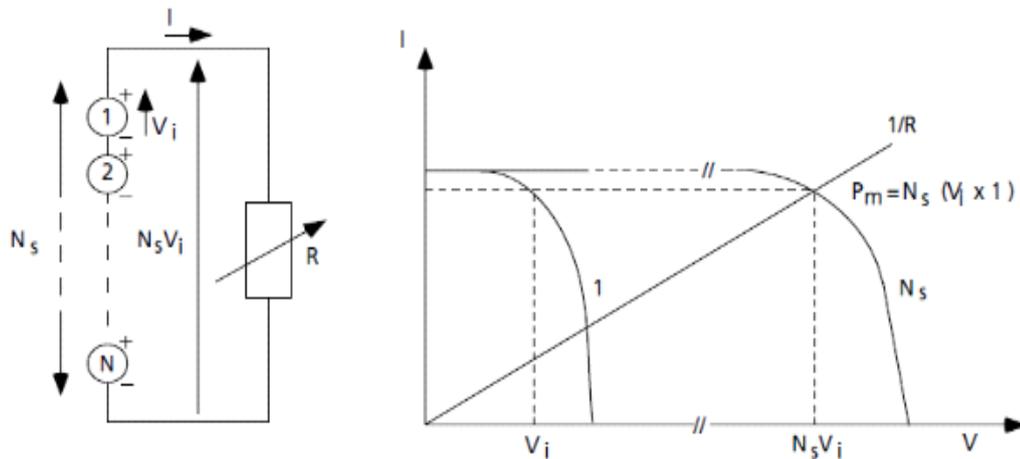


Figure I- 4 : Branchement de cellules identiques en série

#### 7.2. Association parallèle :

En additionnant des modules identiques en parallèle, la tension de la branche est égale à la tension de chaque module ; alors que l'intensité augmente proportionnellement avec le nombre de modules placés en parallèle dans la branche.

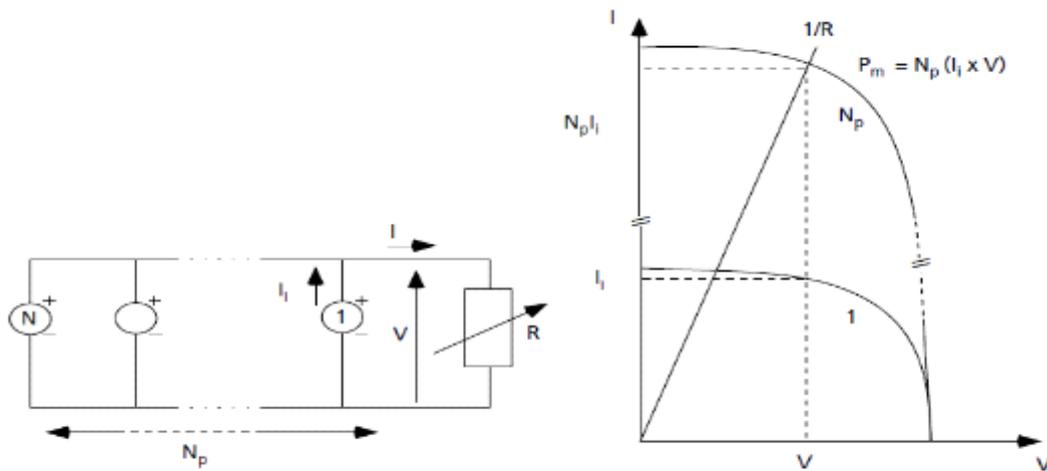


Figure I- 5 : Branchement de cellules identiques en parallèles

### 7.3. Association série-parallèle :

Le générateur photovoltaïque est constitué d'un réseau série-parallèle de nombreux modules photovoltaïques identiques ; uniformément exposés et protégés par des diodes by-pass.

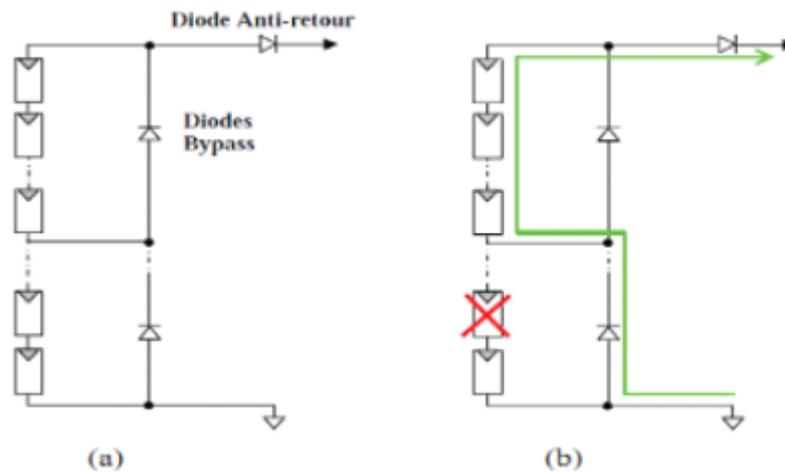


Figure I- 6 : Branchement série/parallèle de cellules identiques : (a) Architecture classique d'un panneau solaire avec diodes de protection ; (b) Contournement du module défectueux par la diode by-pass.

### 8. Différents modèles électriques d'une cellule photovoltaïque [6] [7] :

La modélisation mathématique d'une cellule photovoltaïque est indispensable pour toute opération d'optimisation du rendement ou de diagnostic du générateur photovoltaïque. La cellule photovoltaïque est représentée généralement par un circuit équivalent dont les paramètres sont calculés à partir des caractéristiques courant-tension en fonction de l'ensoleillement et de la température.

Dans ce qui suit, nous allons présenter les différents modèles électriques d'une cellule photovoltaïque.

8.1. Modèle deux diodes à sept paramètres (2D7P) :

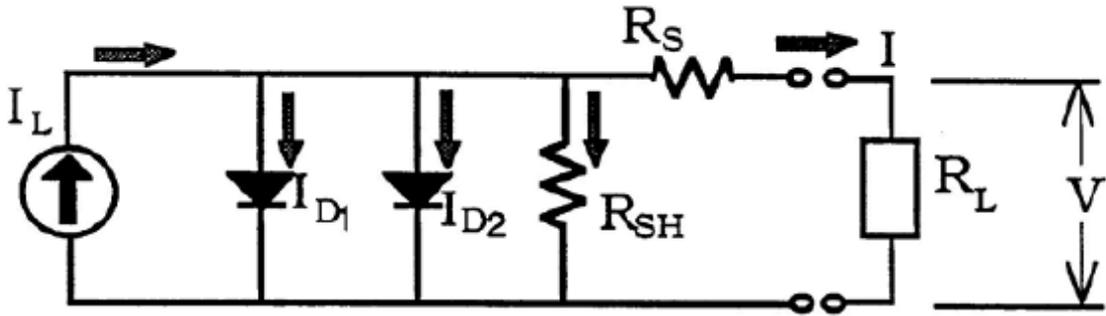


Figure I- 7 : Modèle 2 diodes à 7 paramètres

Les paramètres de ce circuit sont :

- $I_L$  : Courant photonique,
- $I_{D1}$  : Courant inverse de saturation de la diode 1,
- $I_{D2}$  : Courant inverse de saturation de la diode 2,
- $A_1$  et  $A_2$  : sont les facteurs d'accomplissement des diodes 1 et 2,
- $N_{CS}$  : Nombre des cellules en série.
- $\gamma_1 = A_1 \times (N_{CS})$ , le facteur de qualité de la diode 1,
- $\gamma_2 = A_2 \times (N_{CS})$ , le facteur de qualité de la diode 2,
- $R_S$  : Résistance série,
- $R_{SH}$  : Résistance shunt.

L'équation caractéristique  $I(V)$  de ce circuit est :

$$I = I_L - I_{01} \left( \exp \left( \frac{q(V + I \cdot R_S)}{\gamma_1 \cdot k \cdot T_C} \right) - 1 \right) - I_{02} \left( \exp \left( \frac{q(V + I \cdot R_S)}{\gamma_2 \cdot k \cdot T_C} \right) - 1 \right) - \frac{V + I \cdot R_S}{R_{SH}} \quad (I.1)$$

8.2. Modèle deux diodes à six paramètres (2D6P) :

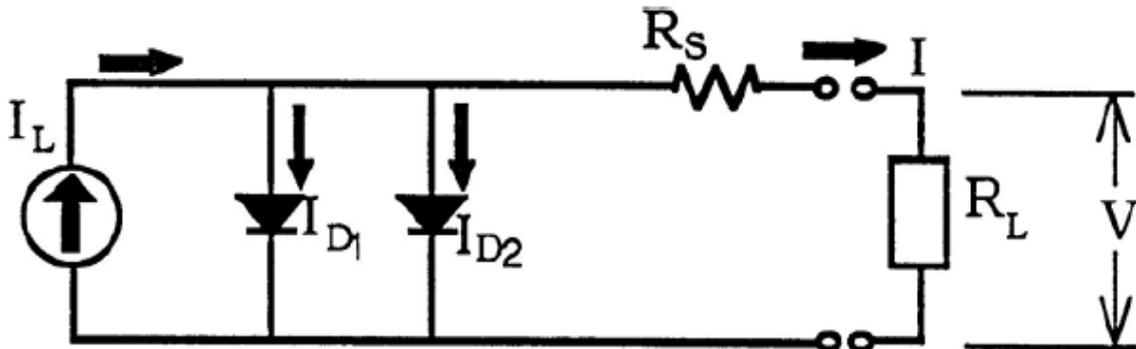


Figure I- 8 : Modèle 2 diodes à 6 paramètres

Ce modèle est une simplification du modèle précédent. L'équation caractéristique  $I(V)$  de ce circuit est :

$$I = I_L - I_{01} \left( \exp \left( \frac{q(V + I \cdot R_s)}{\gamma_1 \cdot k \cdot T_c} \right) - 1 \right) - I_{02} \left( \exp \left( \frac{q(V + I \cdot R_s)}{\gamma_2 \cdot k \cdot T_c} \right) - 1 \right) \quad (I.2)$$

8.3. Modèle deux diodes à cinq paramètres (2D5P) :

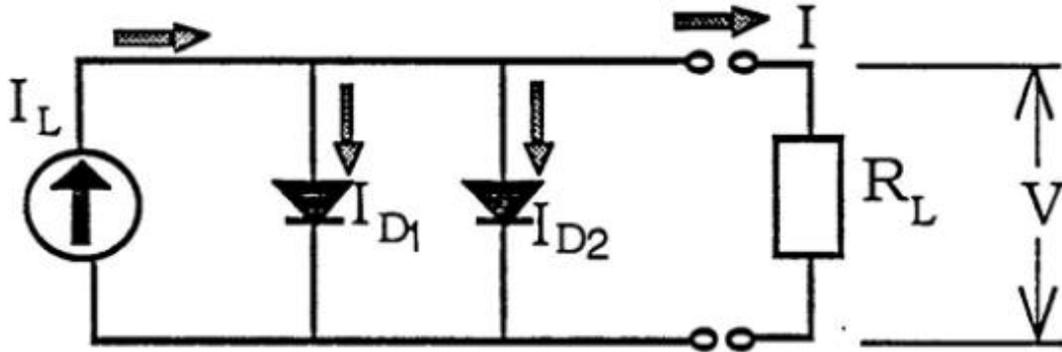


Figure I- 9 : Modèle 2 diodes à 5 paramètres

Le circuit équivalent de ce modèle est obtenu en utilisant une autre simplification. Cette simplification se traduit à supposer que la résistance série est négligeable. Avec une résistance série nulle, l'équation générale de ce circuit équivalent sera représentée comme suit :

$$I = I_L - I_{01} \left( \exp \left( \frac{q \cdot V}{\gamma_1 \cdot k \cdot T_c} \right) - 1 \right) - I_{02} \left( \exp \left( \frac{q \cdot V}{\gamma_2 \cdot k \cdot T_c} \right) - 1 \right) \quad (I.3)$$

8.4. Modèle une diode à quatre paramètres (1D4P) :

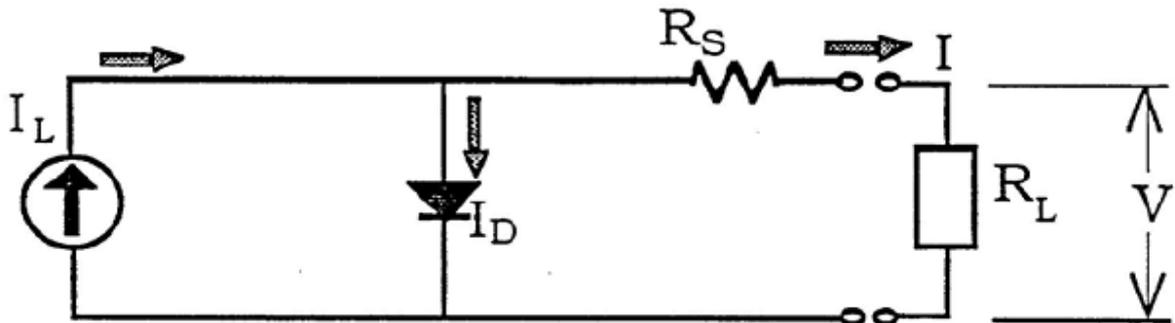


Figure I- 10 : Modèle 1 diodes à 4 paramètres

L'équation générale de ce modèle sera représentée comme suit :

$$I = I_L - I_{01} \left( \exp \left( \frac{q(V + I \cdot R_s)}{\gamma_1 \cdot k \cdot T_c} \right) - 1 \right) \quad (I.4)$$

### 8.5. Modèle une diode à trois paramètres (1D3P) :

Si on suppose que la résistance série est nulle (comme pour le circuit 2diodes à cinq paramètres) le modèle 1 diode à 4 paramètres se réduit à un circuit à trois paramètres représentés par la figure suivante :

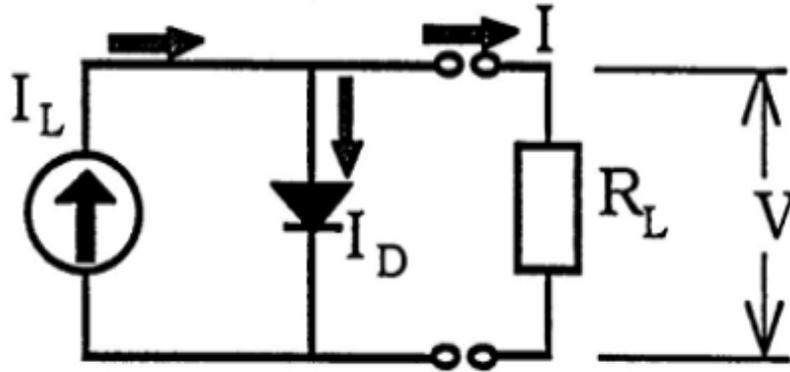


Figure I- 11 : Modèle 1diode à 3 paramètres

Ce circuit équivalent est considéré comme idéal. Son équation générale sera représentée comme suit :

$$I = I_L - I_{01} \left( \exp \left( \frac{q \cdot V}{\gamma_1 \cdot k \cdot T_c} \right) - 1 \right) \quad (I.5)$$

### 9. Choix du modèle :

Après une comparaison entre les résultats de simulation obtenu par ces modèles et les résultats expérimentaux, Townsend a tiré les conclusions suivantes :

- La résistance shunt dans les modèles (2D7P), (2D6P) n'influe sur la caractéristique I(V) uniquement au niveau des éclaircements très bas.
- Les modèles électriques qui incluent le paramètre de la résistance série (1D4P et 2D6P) sont de meilleurs modèles représentant des caractéristiques I(V), pour des niveaux d'éclairement assez loin du niveau de référence, que les modèles qui négligent cette résistance (1D3P et 2D5P).
- Le modèle (2D7P) ne traduit pas les caractéristiques I(V) aussi bien que les autres modèles pour des températures de cellules assez loin de la température de référence.
- Les courbes I(V) globales, obtenues par les modèles 1D4P et 2D6P sont plus précises.

La performance de la cellule solaire est normalement évaluée dans les conditions d'essai standard (STC), où un spectre solaire moyen de AM 1.5 est employé, l'éclairement est normalisé à 1000 W/m<sup>2</sup>, et la température de cellule est définie égale à 25°C [8].

### 10. Les différents paramètres qui influent sur le module solaire [7] :

#### 10.1. Effet de l'éclairement :

L'augmentation de l'éclairement avec une température fixe provoque une augmentation de la puissance du générateur. Le courant et le photo-courant sont directement proportionnel à l'ensoleillement où le courant de court-circuit est très sensible à l'ensoleillement. Par contre, la tension est relativement peu dégradée. On en déduit donc que la cellule peut fournir presque la même tension en circuit ouvert même à faible éclairage.

Enfin, quand l'ensoleillement croît, l'intensité de court-circuit augmente, les courbes caractéristiques se décalent vers des valeurs croissantes, permettant au module de produire une puissance électrique plus importante.

#### 10.2. Influence de la température :

La température est un paramètre important dans le comportement des cellules. L'augmentation de la température avec un éclairement fixe entraîne une diminution nette de la tension en circuit ouvert et une augmentation du courant de court-circuit ; ainsi qu'une diminution de la puissance maximale.

L'influence de la température est plus réduite par rapport à celle de l'ensoleillement, mais elle n'est pas négligeable. Pour une température qui change de 0 à 100°C, on peut voir que la variation de la tension change beaucoup plus que le courant. Ce dernier varie très légèrement.

Contrairement à la tension, le courant de court-circuit, quant à lui, augmente avec une hausse de la température. Ceci s'explique par une meilleure absorption de la lumière, le gap optique baissant avec cette hausse. Toutefois, cet accroissement d'intensité étant très faible, il peut être négligé au point de puissance maximale.

#### 10.3. Influence de la résistance série :

La résistance série agit sur la pente de la caractéristique dans la zone où la photodiode se comporte comme un générateur de tension, et lorsqu'elle est élevée, elle diminue la valeur de courant de court-circuit.

### 11. Stockage de l'énergie avec des batteries [9] :

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.

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

## CHAPITRE I : Généralités sur les systèmes photovoltaïques

- 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.

### 12. 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 [9].

### 13. Différents modèles de batterie solaire :

#### 13.1. Batteries acide-au-plomb :

Facile à trouver, à entretenir et disposant d'un bon circuit de recyclage, la batterie au plomb domine le marché. Le plomb est toxique mais il est stocké de façon totalement étanche.

Ce type de batterie présente le meilleur rapport qualité/prix. Le seul défaut qu'elle présente est le poids et le volume, mais dans la majorité des cas elle reste le meilleur choix.

#### 13.2. 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.

#### 13.3. Batteries nickel-metal-hydrure (NiMH) :

Ces batteries remplacent les batteries NiCD car elles sont moins toxiques. Elles sont cependant assez chères et sont utilisées dans les installations haut de gamme. Leur durée de vie est beaucoup plus grande que celle des batteries au plomb (50% de plus) mais leur capacité est extrêmement faible (quelques Ah au maximum) et leur autodécharge est très forte. Leur utilisation commerciale se fait davantage autour des batteries de téléphones et des ordinateurs portables que dans des installations solaires.

### 13.4. Caractéristiques principales d'une batterie solaire [9] :

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).

#### 13.4.1. 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.

#### 13.4.2. 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.

#### 13.4.3. 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.

#### 13.4.4. 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.

### 13.4.5. Parties de régulation :

Les systèmes de régulation de charge sont des éléments d'un système photovoltaïque qui ont pour but :

- De contrôler l'état de charge et de décharge de la batterie afin d'en maximiser sa durée de vie, et d'améliorer son état de santé,
- Assurer l'optimisation du transfert de l'énergie du champ PV à l'utilisation.

La technologie MPPT (Maximum Power Point Tracking) permet de tirer le maximum de puissance provenant des panneaux solaires photovoltaïques. Elle permet aussi d'augmenter le rendement entre 30% et 35% par rapport aux autres types de régulateurs solaires.

Un régulateur MPPT est un principe permettant de suivre comme son nom l'indique, le point de puissance maximale d'un générateur PV non linéaire. C'est une méthode de contrôle par microprocesseur ou microcontrôleur récupérant le maximum de la puissance des panneaux solaires en sortie pour la diffuser dans les batteries avec le minimum de pertes.

La plupart des régulateurs MPPT ont une efficacité de conversion de 92% à 97%.

### 14. Batteries acide-au-plomb [10] :

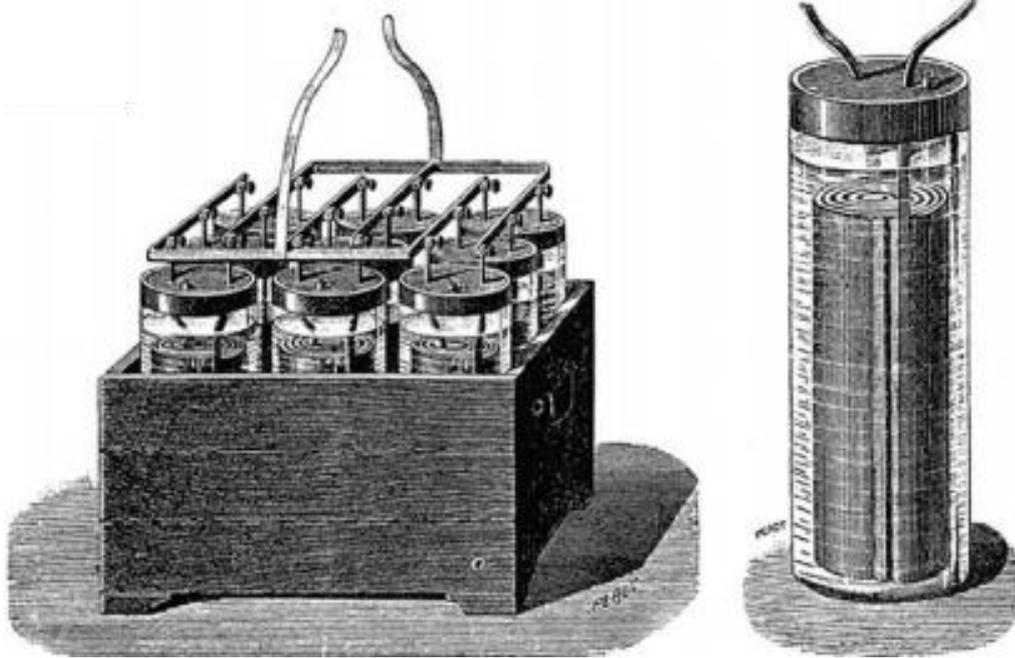
La batterie acide-au-plomb a été inventée en 1859 par le français Gaston Planté. Il a été en effet le premier à avoir mis au point la première batterie rechargeable. À l'origine, les batteries acide-au-plomb étaient situées dans des cuves en verre. Par la suite, on a systématisé l'emploi des cuves en plastique.



Figure I- 12 : Portraits et médaille de Gaston Planté [1]

## CHAPITRE I : Généralités sur les systèmes photovoltaïques

Les batteries constituent aujourd'hui la principale utilisation du plomb. Cette technique simple et robuste est également très compétitive et reste à ce jour la principale technique pour les batteries de démarrage des véhicules. Ainsi, en 2010, les batteries au plomb représentaient plus de 99% en tonnage des batteries utilisées dans l'automobile.

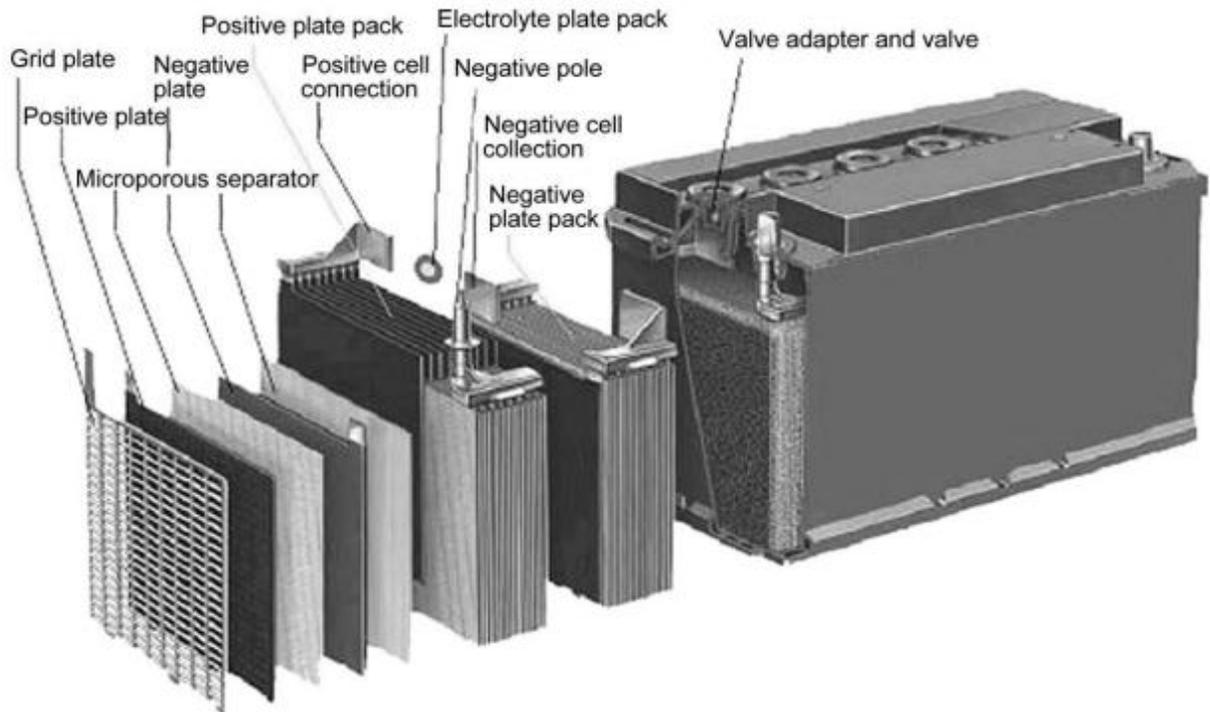


**Figure I- 13:** Première batterie rechargeable conçue par Gaston Planté composé par 9 cellules montées en parallèle [1]

### 14.1. Composition de la batterie acide-au-plomb :

Une batterie acide-au-plomb est une source d'énergie électrique. Cette dernière est obtenue par transformation directe d'une énergie chimique en une énergie électrique.

Rechargeable, il s'agit historiquement du premier dispositif de ce type qui a été développé et commercialisé. Chaque batterie acide-au-plomb est habituellement constituée de plusieurs cellules dont la tension cellulaire qui dépend de l'état de charge est de l'ordre de 2 V. Les cellules sont associées en série et permettent ainsi d'atteindre des tensions nominales de 6, 12, 24 V et au-delà. Chaque cellule est composée d'un couple d'électrodes positive et négative isolées par un séparateur microporeux, destiné à éviter les courts circuits tout en laissant circuler les ions. Les électrodes positives sont à base de peroxyde de plomb ( $\text{PbO}_2$ ), les électrodes négatives sont à base de plomb métal (Pb) et l'électrolyte est une solution aqueuse d'acide sulfurique ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ).



**Figure I- 14** : Constitution d'une batterie acide-au-plomb [1]

### 14.2. Utilisation des batteries acide-au-plomb :

Cette batterie sert à alimenter les composants électriques des véhicules, particulièrement le démarreur électrique. Lorsque le moteur fonctionne, elle est rechargée par un alternateur.

Historiquement, les batteries de voitures ou de motocyclettes faisaient le plus souvent 6 volts (3 éléments). À l'époque moderne, les batteries à 12 volts (6 éléments) sont généralisées sur les voitures et motocyclettes, alors que les véhicules lourds ou militaires utilisent les batteries 24 volts.

Les batteries acide-au-plomb servent aussi à alimenter toutes sortes d'engins électriques. Les voitures électriques ne se sont pas toujours imposées du fait du mauvais rapport masse/énergie des batteries, bien que le rendement d'un moteur électrique soit exceptionnel.

Ces batteries peuvent servir à stocker de l'énergie produite par intermittence, comme l'énergie solaire ou éolienne. Au niveau mondial, la technologie au plomb reste largement prédominante avec près de 75% du marché des accumulateurs en valeur.

### 14.3. Caractéristiques techniques :

Une batterie acide-au-plomb se caractérise essentiellement par :

- Une tension nominale  $U$  qui dépend du nombre d'éléments. Elle est égale au nombre d'éléments multiplié par 2.1 V. Généralement, on considère qu'une batterie acide-au-plomb est chargée lorsqu'elle atteint la tension de 2.3 V à 2.4 V par élément et elle est déchargée lorsqu'elle atteint la tension de 1.8 V. Donc, une batterie de 6 éléments à une tension nominale de 12.6 V, elle est chargée lorsqu'elle atteint la tension de 13.8 V à 14.4 V, et est déchargée lorsqu'elle atteint la tension de 10.8 V. La décharge

## CHAPITRE I : Généralités sur les systèmes photovoltaïques

profonde est considérée pour la tension de 1.6 V par élément, soit la tension de la batterie de 9.6 V.

- La capacité de stockage Q représente la quantité d'énergie disponible. Elle s'exprime en ampère-heure.
- Le courant maximal ou courant de crête que peut fournir la batterie pendant quelques instants, qui s'exprime en ampères CCA (jusqu'à 0°F soit -17.78°C).

Les valeurs maximales sont données par le constructeur pour une batterie neuve et chargée à 100%, elles varient sensiblement en fonction de l'état de charge, mais elles se dégradent en fonction du temps et de l'usage de la batterie.

La batterie acide-au-plomb est celle qui a la plus mauvaise énergie massique 35 Wh/kg, après la batterie Nickel-Fer. Mais comme elle est capable de fournir un courant de grande intensité, utile pour le démarrage électrique des moteurs à combustion interne, elle est encore très utilisée dans l'automobile.

### 14.4. Fonctionnement d'une batterie acide-au-plomb :

Le fonctionnement de la batterie acide-au-plomb réside dans le couplage de deux électrodes : une positive ( $\text{PbO}_2$ ) et une négative (Pb) qui sont immergées dans une solution d'acide sulfurique ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ).

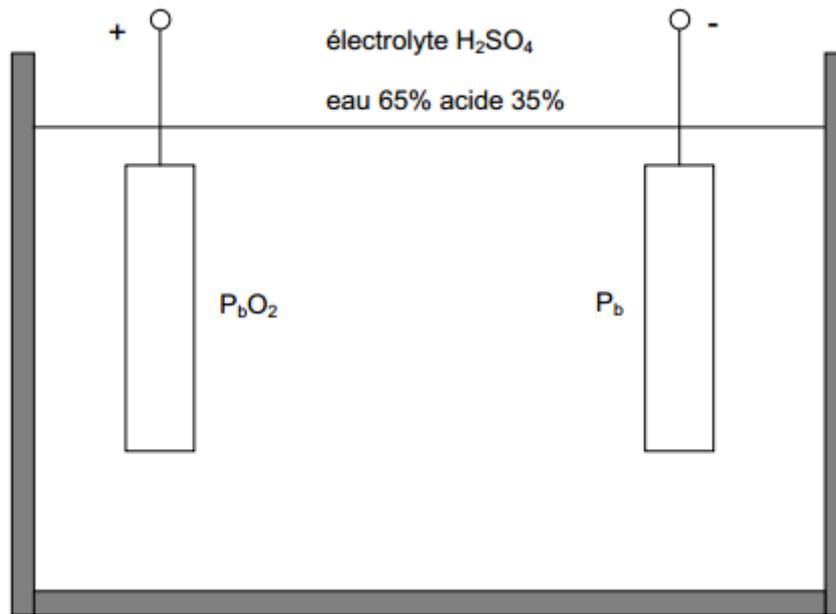


Figure I- 15 : Accumulateur acide-au-plomb chargé

Les réactions chimiques de charge et de décharge sont des réactions d'oxydoréduction entre l'électrode négative, l'électrode positive et l'électrolyte.

La décharge de la batterie acide-au-plomb consomme les solides des électrodes (Pb et  $\text{PbO}_2$ ) et les ions  $\text{H}^+$  de l'électrolyte et conduit à la formation de sulfate de plomb ( $\text{PbSO}_4$ ) sur les électrodes :

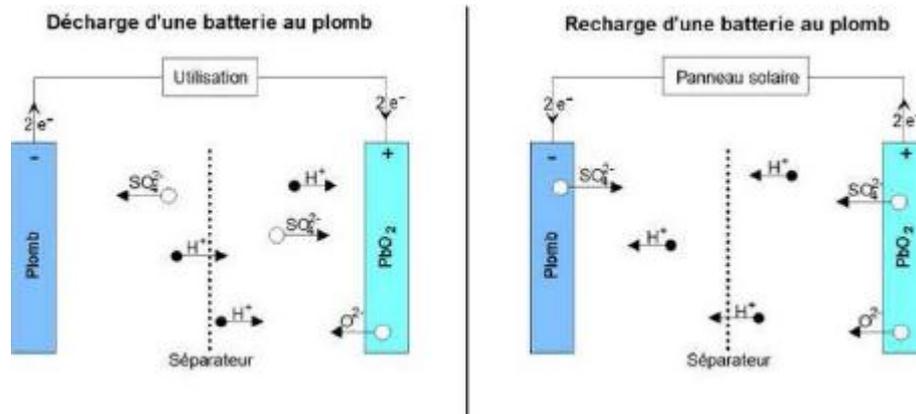
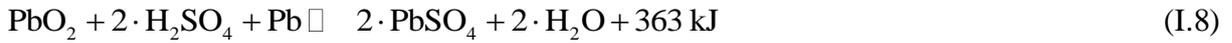


## CHAPITRE I : Généralités sur les systèmes photovoltaïques

A l'inverse, la charge de l'accumulateur au plomb forme les solides des électrodes et les ions  $H^+$  de l'électrolyte (la concentration en acide augmente, le pH diminue), et le sulfate de plomb  $PbSO_4$  disparaît des électrodes :



Les réactions électrochimiques aux électrodes se résument comme suit :



**Figure I- 16** : Principe de fonctionnement de l'accumulateur acide-au-plomb

De plus, à la fin de la charge, le courant de charge déclenche l'électrolyse de l'eau contenue dans l'électrolyte, produisant un dégagement d'hydrogène à l'électrode négative et d'oxygène à l'électrode positive.

Les batteries acide-au-plomb peuvent soit être « ouvertes », les gaz peuvent alors s'échapper par les orifices prévus et il est nécessaire d'ajuster régulièrement le niveau d'eau (excepté pour les batteries dites « sans entretien »), soit « a recombinaison de gaz » (en anglais VRLA pour « Valve-Regulated Lead-Acid battery ») avec un électrolyte sous forme de gel (dit gélifiée) ou absorbe dans une matière fibreuse (dit absorbe) qui ne nécessite ainsi pas d'ajustement du niveau d'eau.

### 14.4.1. Pendant la charge :

Pendant la charge, le sulfate de plomb  $PbSO_4$  formé au niveau des deux électrodes se convertit au  $PbO_2$  au niveau de l'électrode positive et au  $Pb$  au niveau de l'électrode négative, et les ions de sulfate se retournent dans la solution pour former l'acide sulfurique. Pendant cette phase, la concentration de l'acide augmente et la tension de la batterie croît également avec le temps, quand elle atteint une tension suffisamment élevée, « tension de gazéification », l'électrolyse de l'eau contenue dans la batterie devient trop rapide et un dégagement gazeux (oxygène et hydrogène) aura lieu à l'intérieur de la batterie.

En fin de charge, la tension de la batterie augmente rapidement, donc on doit limiter le courant de charge pour maintenir la tension de la batterie à une tension inférieure à la tension de gazéification.

## CHAPITRE I : Généralités sur les systèmes photovoltaïques

Si on trace en fonction du temps la différence de potentiel entre les deux bornes de la batterie, on constate qu'après un court régime transitoire elle s'établit aux environs de 2.2 V. En fin de charge (le point 2.4 V/élément), on remarque un accroissement rapide de la tension.

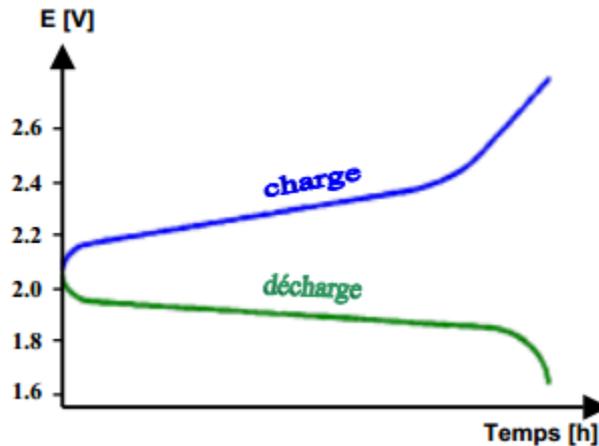


Figure I- 17 : Courbe de charge et décharge d'une batterie acide-au-plomb

### 14.4.2. Pendant la décharge :

Quand la batterie se décharge, les matériaux actifs : le dioxyde de plomb au niveau de l'électrode positive et le plomb spongieux au niveau de l'électrode négative réagit avec l'acide sulfurique pour former le sulfate de plomb  $PbSO_4$  et de l'eau  $H_2O$ .

Pendant cette phase, la concentration de l'acide décroît et la tension de la batterie décroît également avec le temps ; si elle dépasse une certaine limite, ceci peut attaquer les plaques (formation du sulfate de plomb  $PbSO_4$ ), qui ne sont plus détruites par la suite ; ce phénomène aura comme conséquences la sulfatation de l'accumulateur qui entraîne une perte de capacité, et un vieillissement de la batterie.

Pendant la décharge, la tension de la batterie varie en fonction du temps, on remarque que pendant une assez longue période d'utilisation, elle reste constante à une valeur proche de 2 V/élément. À partir du point 1.8 V/élément, elle diminue brusquement ; d'où, il faut interrompre la décharge de la batterie pour éviter la sulfatation.

## 15. Conclusion :

Nous avons présenté dans ce chapitre des généralités concernant notre système solaire photovoltaïque. Nous avons commencé par quelques définitions sur le rayonnement solaire, l'effet photovoltaïque, ... Puis, nous avons présenté une étude grossière sur les cellules photovoltaïques : différents types, principe de fonctionnement, association série/parallèle, différents modèles mathématiques, paramètres influençant le fonctionnement ... Ensuite, nous avons présenté les différents types de batteries utilisées pour le stockage de l'énergie et leurs caractéristiques. Parmi ces différents types, nous nous sommes intéressé à la batterie acide au plomb qui est la plus utilisée. Nous l'avons étudié grossièrement et nous avons présenté les équations chimiques générales. Dans le prochain chapitre, nous allons travailler seulement avec les tension limites de charge/décharge.

**CHAPITRE II:**  
**REGULATEUR DE CHARGE SOLAIRE**

---

## CHAPITRE II : Régulateur de charge solaire

Le régulateur de charge solaire est l'élément central d'une installation solaire. Il contrôle la production des panneaux tout en optimisant la durée de vie des batteries. Un régulateur de charge solaire adapté doit donc être soigneusement sélectionné.

La batterie doit être protégée contre les surcharges et les décharges excessives qui peuvent causer une perte d'électrolyte et endommager ses plaques. Ceci est le rôle du régulateur de charge qui maintient la tension de la batterie entre deux seuils et permet ainsi une plus longue durée de vie du système photovoltaïque.

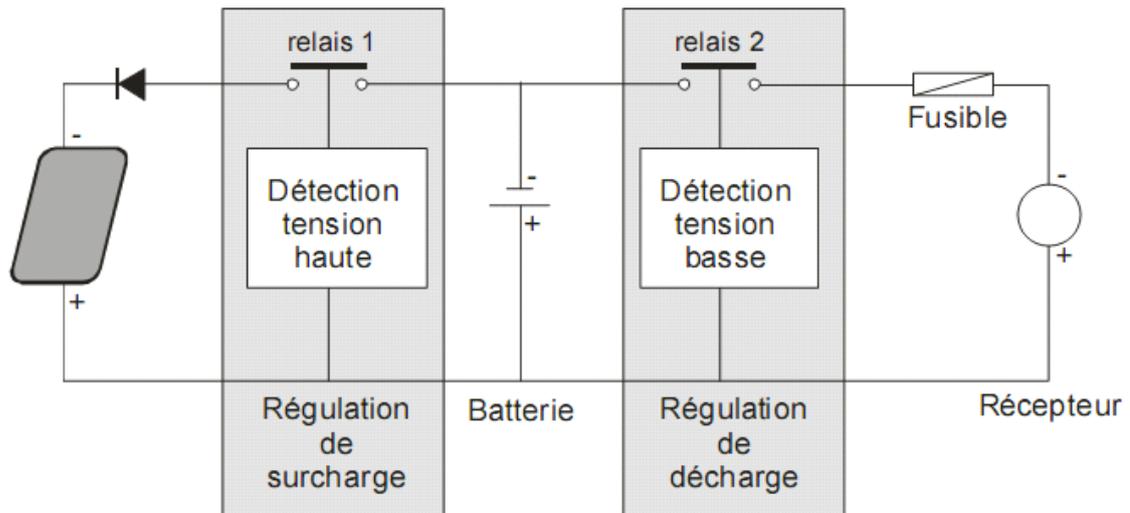


Figure II- 1 : Principe de fonctionnement du régulateur de charge

### 1. Types des régulateurs de charge [11] :

Au début de l'usage du photovoltaïque, deux grandes familles de régulateurs étaient utilisées : les modèles « shunt » et les modèles « série ».

Avec l'utilisation de plus en plus courante de microprocesseurs, de nouvelles techniques apparaissent et les paramètres de contrôle sont très dispersés.

Une chose est sûre, chaque fabricant avance des arguments commerciaux qui sont en général très difficiles à contrôler. Il n'y a pas unanimité d'idée chez les concepteurs.

#### 1.1. Le régulateur shunt « tout ou rien » :

Le courant du panneau solaire est envoyé dans un interrupteur en parallèle avec la batterie lorsque celle-ci atteint sa pleine charge. Le principe de fonctionnement est un simple aiguillage : tout le courant délivré par les panneaux photovoltaïques, passe normalement dans les batteries jusqu'à ce que le seuil de coupure soit atteint.

Alors, le courant est dérivé dans l'interrupteur équipé d'une diode. Cette diode joue également le rôle de blocage du courant nocturne pouvant « s'écouler » des batteries. L'interrupteur le plus souvent utilisé est un MOSFET à faible résistance de passage, plus intéressant qu'un transistor bipolaire qui dissipe trop d'énergie.

**1.2. Le régulateur shunt linéaire :**

Ce type de régulateur maintient une tension constante aux bornes des batteries lorsqu'elles atteignent leur pleine charge. L'avantage est que la charge totale des batteries est garantie. L'inconvénient, c'est que la puissance non utilisée provenant des panneaux photovoltaïques doit être dissipée par un transistor en parallèle, ce qui limite ce type de régulation aux petits courants.

**1.3. Le régulateur série « tout ou rien » :**

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, chauffage en pays froid).

**1.4. Le régulateur série linéaire :**

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.

**1.5. Le régulateur MPPT :**

Dans ce régulateur, un circuit électronique mesure en permanence la tension et le courant des panneaux solaires pour tirer de l'énergie au point de puissance maximale MPPT (Maximum Power Point Tracking).

Ceci permet de garantir que le maximum d'énergie sera récupéré, quels que soient la température et l'ensoleillement. L'avantage de ce genre de régulateur, est qu'il permet de travailler dans une grande plage de température et ainsi récupérer l'excès non négligeable de tension en hiver lorsque le point de puissance maximale peut monter au-dessus de 18 volts dans un système 12 V.

**1.6. Le régulateur 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

## *CHAPITRE II : Régulateur de charge solaire*

tension préréglée, 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.

### **2. Algorithme de charge en trois étapes [11] :**

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

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

- Charge à tension constante.
- Charge à courant constant.
- Phase d'entretien ou de floating.

#### **2.1. Charge à tension constante :**

Par cette méthode, le régulateur contrôle le courant de charge de telle sorte que la tension de la batterie soit maintenue à un niveau de régulation VR (voltage regulation). Au début, la batterie se charge par un courant de valeur acceptable (généralement le maximum de courant) ensuite, il diminue graduellement afin de maintenir la tension constante aux bornes de la batterie. Cette méthode est très efficace surtout dans le cas où le banc batterie est petit.

#### **2.2. Charge à courant constant :**

Cette méthode est très efficace surtout dans le cas où le banc batterie est grand. Dans ce cas, le régulateur fonctionne comme un interrupteur on/off, il contrôle la tension de la batterie, jusqu'à ce qu'elle atteigne une valeur prédéterminée VR où il interrompt le courant de charge. Le module PV demeure déconnecté de la batterie jusqu'à la diminution de la tension à une valeur ARV (Array Reconnect Voltage) et le courant de charge se rétablit. Ainsi la tension de la batterie bascule entre ces deux seuils.

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

#### **2.3. Algorithme de charge en trois étapes :**

Les utilisateurs des batteries ont remarqué qu'il existe une grande différence entre les deux méthodes de charges citées précédemment, où chacune a ses avantages et ses inconvénients. Pour aboutir aux meilleures performances, ils ont distingué qu'ils peuvent combiner ces deux méthodes en un seul algorithme dit : « Algorithme de charge en trois étapes » (Three state charge algorithm), où une phase de charge à courant constant est suivie par deux phases de charge à tension constante :

- Bulk ou charge normale,
- Absorption charge ou égalisation,
- Floating ou fin de charge.

## CHAPITRE II : Régulateur de charge solaire

Cet algorithme intègre les avantages de la charge à courant constant ; d'égaliser et de charger rapidement la batterie, et les avantages de charge à tension constante ; d'un contrôle performe de la surcharge. Pour faciliter la compréhension de cet algorithme, on doit d'abord définir les paramètres de la batterie au plomb acide disponible.

### 3. Conception du régulateur de charge :

Le régulateur de charge assure deux fonctions principales :

- La protection des batteries contre les surcharges et les décharges profondes,
- L'optimisation du transfert d'énergie du champ photovoltaïque à l'utilisation.

La tension aux bornes de la batterie est l'indication sur laquelle s'appuiera le régulateur pour assurer sa fonction. Cette dernière mesure en permanence cette tension et la compare à deux seuils de tension préréglés : seuil haut et seuil bas.

Si la batterie est chargée au maximum 13.8 V pour une tension nominale de 12 V par exemple, le régulateur met les modules hors circuit afin de ne pas détériorer la batterie en la surchargeant. Lorsque la tension retombe en dessous du seuil 12.8 V, le régulateur reconnecte automatiquement les panneaux solaires pour recharger la batterie.

Pour ne pas décharger la batterie très profondément, le régulateur interrompt la consommation à 10.5 V pour éviter la sulfatation des plaques. La consommation sera réenclenchée lorsque la recharge de la batterie atteint 11.5 V, pour ne pas démarrer avec une batterie trop peu chargée.

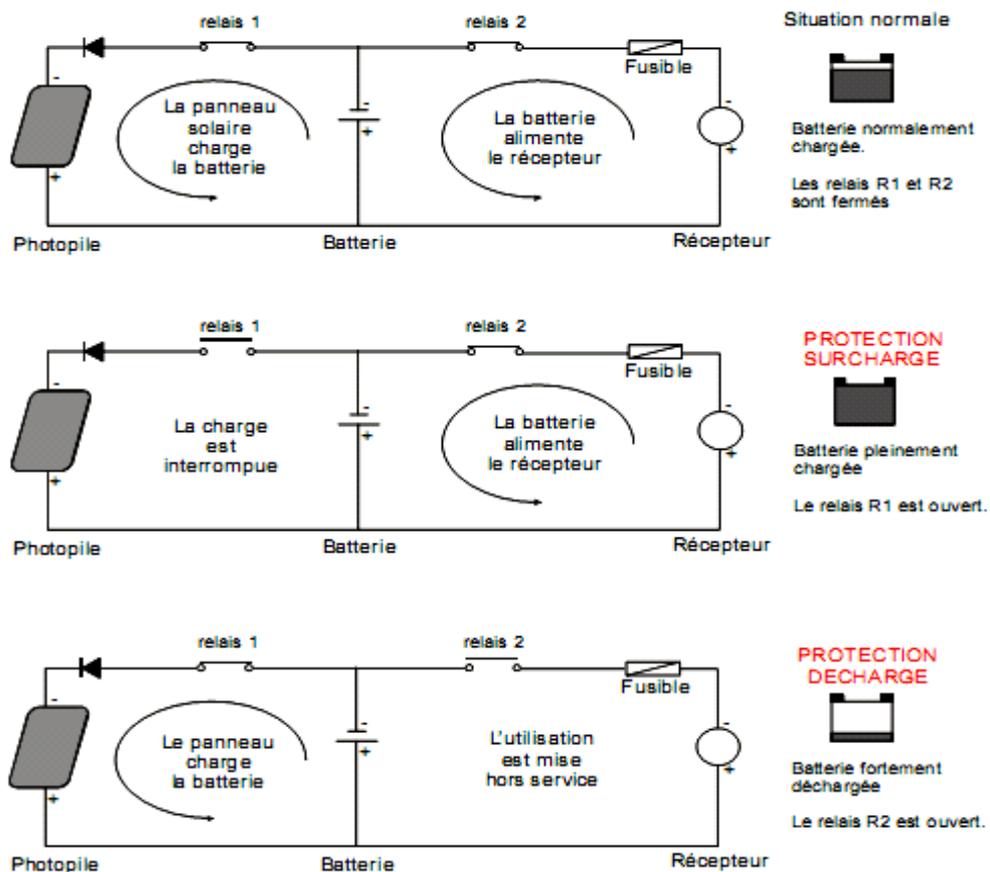


Figure II- 2 : Principes de fonctionnements du régulateur de charge

## CHAPITRE II : Régulateur de charge solaire

Pour assurer ce fonctionnement avec notre régulateur, on a utilisé un microcontrôleur pour faire le contrôle de la charge/décharge automatiquement.

Un microcontrôleur PIC est une unité de traitement et d'exécution de l'information à laquelle a été ajouté des périphériques internes permettant de réaliser des montages sans nécessiter l'ajout de composants annexes.

Le microcontrôleur est composé de quatre parties :

- Un microprocesseur qui va prendre en charge la partie traitement des informations et envoyer des ordres. Il est lui-même composé d'une unité arithmétique et logique et d'un bus de données. C'est donc lui qui va exécuter le programme embarqué dans le microcontrôleur.
- Une mémoire de données (RAM ou EEPROM) dans laquelle seront entreposées les données temporaires nécessaires aux calculs. C'est en fait la mémoire de travail qui est donc volatile.
- Une mémoire programmable (ROM), qui va contenir les instructions du programme pilotant l'application à laquelle le microcontrôleur est dédié. Il s'agit ici d'une mémoire non volatile puisque le programme à exécuter est à priori toujours le même. Il existe différents types de mémoires programmables que l'on utilisera selon l'application :
  - o OTPROM : programmable une seule fois mais ne coûte pas très cher.
  - o UVPRM : on peut la refaire plusieurs fois grâce aux ultraviolets.
  - o EEPROM : on peut la refaire plusieurs fois de façon électrique « mémoire flash ».
- La dernière partie correspond aux ressources auxiliaires. Celles-ci sont généralement :
  - o Ports d'entrées/sorties parallèle et série.
  - o Des timers pour générer ou mesurer des signaux avec une grande précision temporelle.
  - o Des convertisseurs A/N pour traiter les signaux analogiques.

Le microcontrôleur est généralement moins puissant qu'un microprocesseur en termes de rapidité ou de taille mémoire, il se contente le plus souvent d'un bus de huit ou seize bits. On le programme afin qu'il effectue une ou plusieurs tâches au sein d'un appareil électronique. Les microcontrôleurs sont bien adaptés pour piloter plusieurs applications dans de nombreux domaines :

- Informatique (souris, modem ...),
- Vidéo (Appareil photos numérique, caméra numérique ...),
- Contrôle des processus industriels (régulation, pilotage),
- Appareil de mesure (affichage, calcul statistique, mémorisation),
- Automobile (ABS, injection, GPS, airbag),
- Multimédia (téléviseur, carte audio, carte vidéo, MP3, magnétoscope),
- Téléphones (fax, portable, modem),
- Electroménager (lave-vaisselle, lave-linge, four micro-onde).

#### 4. Description générale d'un microcontrôleur PIC16F877A :

On va utiliser dans la suite de notre travail un microcontrôleur de la société américaine MICROCHIP ; le PIC16f877A sous sa forme de boîtier DIL40.

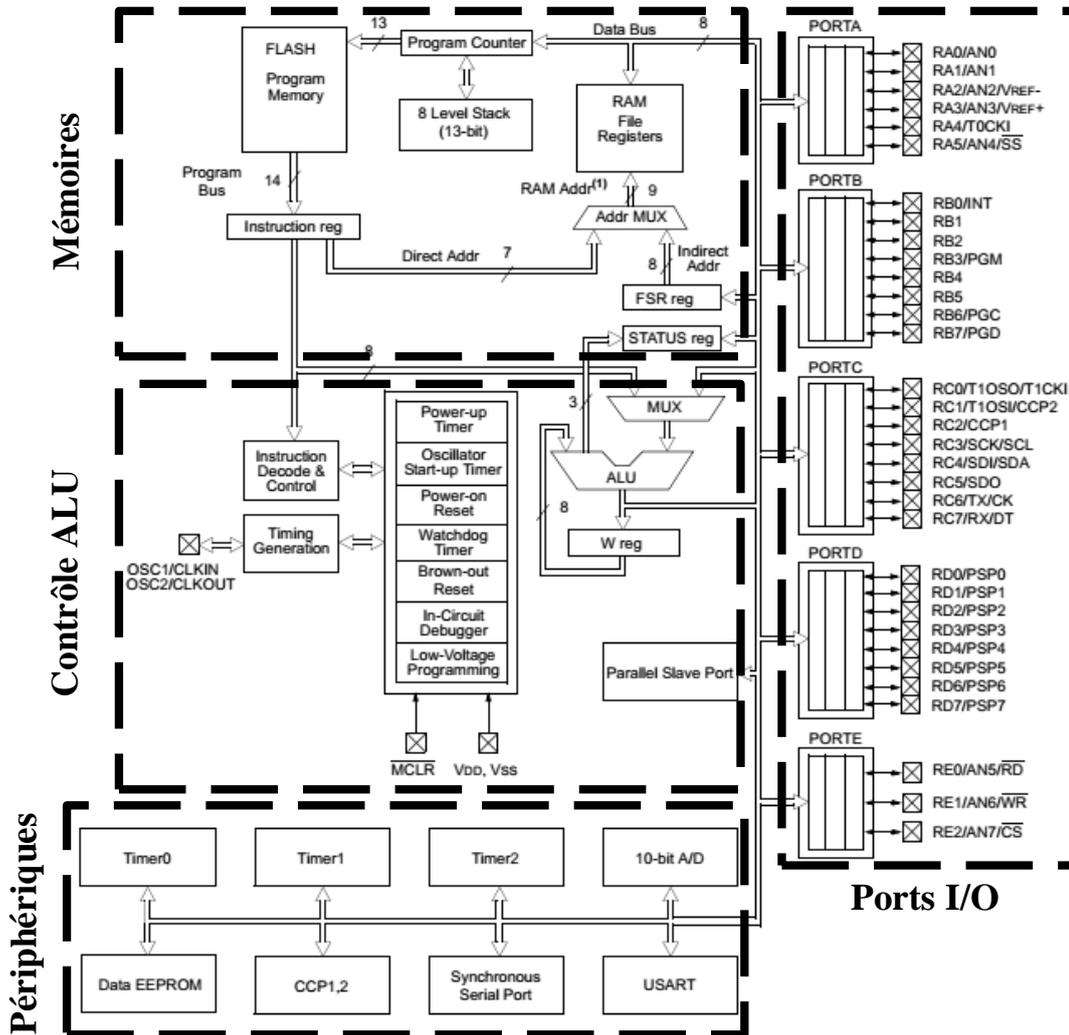


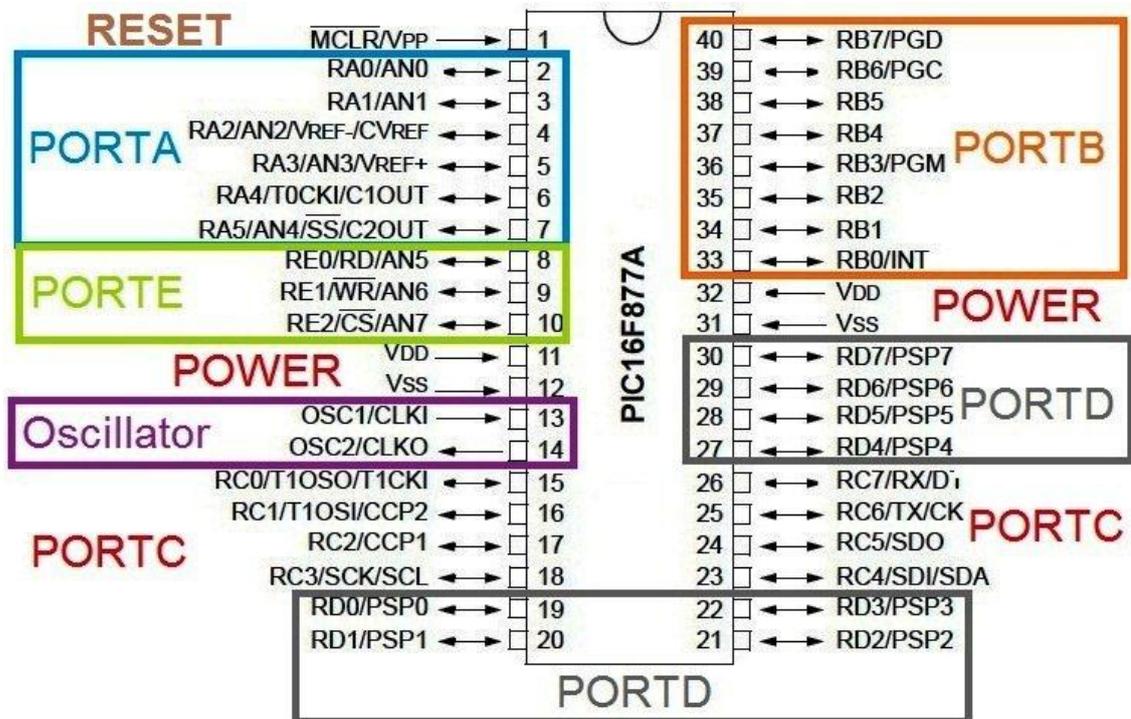
Figure II- 3 : Architecture interne du PIC16F877A

Ce microcontrôleur est caractérisé par :

- Une fréquence de fonctionnement élevée, jusqu'à 20 MHz,
- Une mémoire vive de 368 octets,
- Une mémoire morte EEPROM de 256 octets pour la sauvegarde des données,
- Une mémoire de type FLASH de 8 Kmots (1mot = 14 bits),
- Chien de garde WDT,
- 33 lignes d'entrées/sorties,
- Courant maximum de sortie par broche peut atteindre 25 mA,
- 3 Temporisateurs :
  - o TIMER0 : compteur 8 bits avec prédiviseur,
  - o TIMER1 : compteur 16 bits avec prédiviseur et possibilité d'utiliser une horloge externe réseau RC ou QUARTZ,
  - o TIMER2 : compteur 8 bits avec prédiviseur et postdiviseur.

## CHAPITRE II : Régulateur de charge solaire

- 2 entrées de captures et de comparaison avec PWM (Modulation de largeur d'impulsions).
- Un convertisseur analogique numérique 10 bits avec 8 entrées multiplexées,
- Une interface de communication série asynchrone et synchrone (USART/SCI),
- Une interface de communication série synchrone (SSP/SPI et I2C),
- Une tension d'alimentation entre 2 et 5.5 V.



**Figure II- 4 :** Les PORTS et les différentes broches du PIC16F877A

Tous les ports sont pilotés par deux registres. Ces 5 ports sont des ports bidirectionnels (entrées/sorties) :

- Le port A (6 bits) : peut fonctionner en I/O pure ou comme convertisseur analogique numérique ; la broche RA4 de type « drain ouvert » sera utilisée comme entrée du TIMER0.
- Le port B (8 bits) : peut fonctionner en I/O pure ou programmation sur circuit ICSP/ICD, ou comme entrées d'interruptions externes.
- Le port C (8 bits) : peut fonctionner en I/O pure ou SPI/I2C ou USART.
- Le port D (8 bits) : peut fonctionner en I/O pure ou port parallèle 8 bits associé au Port E.
- Le port E (3 bits) : peut fonctionner en I/O pure ou pilotage du port D (RE0/RD, RE1/WR et RE2/CS).

Le registre TRIS<sub>x</sub> est le registre de direction. Il détermine si le PORT<sub>x</sub> ou certaines lignes du port sont des entrées ou des sorties. L'écriture d'un « 1 » logique (1 comme Input) correspond à une entrée et l'écriture d'un « 0 » logique (0 comme Output) correspond à une sortie.

Au RESET toutes les lignes des ports sont configurées en entrées.

## **5. Les temporisateurs du PIC16F877A :**

Le PIC16F877 possède 3 temporisateurs qui sont :

- Le Timer0 (8bits) : il peut être incrémenté par des impulsions extérieures à travers la broche RA4 ou par l'horloge interne ( $F_{OSC}/4$ ),
- Le Timer1 (16 bits) : il peut être incrémenté soit par l'horloge interne par des impulsions sur la broche RC0 ou par un oscillateur (RC ou quartz) connecté sur les broches RC0 et RC1.
- Le Timer2 (8bits) : il est incrémenté par l'horloge interne, elle peut être prédivisée.

Tous ces temporisateurs peuvent déclencher une interruption interne, si cette dernière a été autorisée.

## **6. Les interruptions :**

Le programme principal se déroule normalement, mais dès qu'un événement spécifique survient, il s'interrompt. Quand il traite cet événement d'interruption, il reprend le fonctionnement à l'endroit où il a été interrompu.

Le microcontrôleur dispose de plusieurs sources d'interruptions ; parmi lesquelles peut-on citer :

- Une interruption externe sur la broche RB0,
- Débordement du TIMER0, TIMER1, TIMER2,
- Fin de conversion analogique-numérique,
- Réception d'une information sur la liaison série,
- Fin d'émission d'une information sur la liaison série,
- Interruption du registre de capture ou de comparaison (CCPI1E, CCPI2E).

## **7. Le module de conversion analogique/numérique :**

Pour son fonctionnement, le convertisseur analogique/numérique n'a besoin que de la tension d'entrée analogique et des deux tensions de référence. Les PICs considèrent par défaut que les valeurs minimale et maximale correspondent respectivement aux tensions d'alimentation  $V_{DD}$  et  $V_{SS}$ . Le nombre numérique résultant sera de huit ou dix bits.

Le PIC16f877A dispose de 8 canaux d'entrée analogique/numérique. Les canaux AN0 à AN4 sont les dénominations analogiques des broches RA0 à RA3 et RA5, tandis que les canaux AN5 à AN7 sont les dénominations analogiques des broches RE0 à RE2.

Les entrées analogiques doivent être configurées en entrée à l'aide des registres TRISA et/ou TRISE. L'échantillonneur bloqueur intégré est constitué d'un interrupteur d'échantillonnage et d'une capacité de blocage de 120 pF.

Les tensions de références permettant de fixer la dynamique du convertisseur. Elles peuvent être choisies parmi  $V_{DD}$ ,  $V_{SS}$ ,  $V_{REF+}$  ou  $V_{REF-}$ .

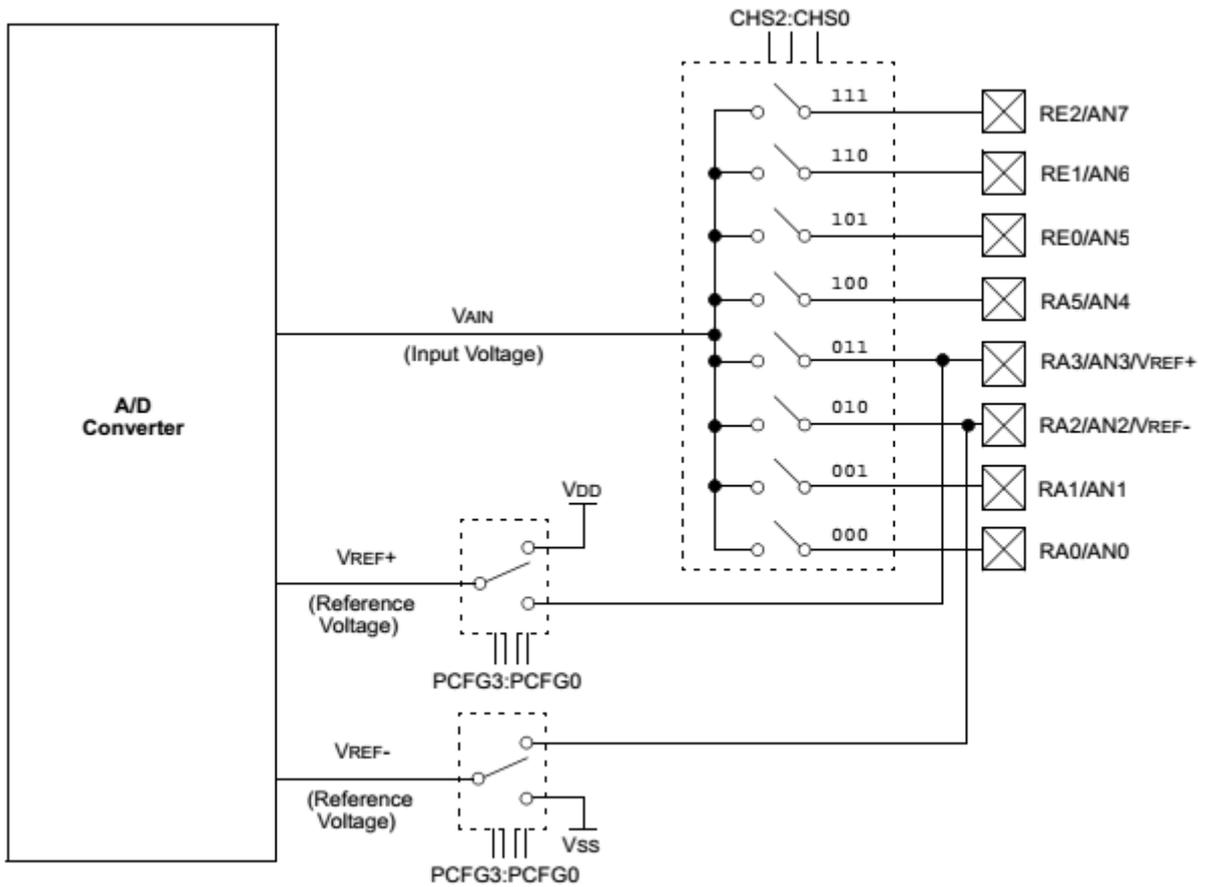


Figure II- 5 : Structure du convertisseur analogique-numérique

Le control du module se fait par les deux registres ADCON0 et ADCON1. Le registre ADCON0 est représenté comme suit :

ADCS1	ADCS0	CHS2	CHS1	CHS0	Go/Done	—	ADON
-------	-------	------	------	------	---------	---	------

Figure II- 6 : Registre ADCON0 de configuration du convertisseur analogique-numérique

Les bits composants ce registre de configuration sont les suivants :

- ADCS1-ADCS0 : Choix de l'horloge (ou le temps) de conversion,

ADCON1 <ADCS2>	ADCON0 <ADCS1:ADCS0>	Clock Conversion
0	00	Fosc/2
0	01	Fosc/8
0	10	Fosc/32
0	11	Frc (clock derived from the internal A/D RC oscillator)
1	00	Fosc/4
1	01	Fosc/16
1	10	Fosc/64
1	11	Frc (clock derived from the internal A/D RC oscillator)

- CHS2:CHS0 : choix de l'entre analogique
  - o 000 : canal 0 (RA0),
  - o 001 : canal 1 (RA1),
  - o 010 : canal 2 (RA2),
  - o 011 : canal 3 (RA3),

## CHAPITRE II : Régulateur de charge solaire

- 100 : canal 4 (RA5),
  - 101 : canal 5 (RE0),
  - 110 : canal 6 (RE1),
  - 111 : canal 7 (RE2).
- GO/DONE : Une conversion démarre quand on place ce bit à 1. A la fin de la conversion, il est remis automatiquement à zéro. Ce bit peut aussi être positionné automatiquement par le module CCP2.
  - ADON : Ce bit permet de mettre le module de conversion analogique numérique en service.

Le control du module se fait par les deux registres ADCON0 et ADCON1. Le registre ADCON0 est représenté comme suit :

ADFM	ADCS2	—	—	PCFG3	PCFG2	PCFG1	PCFG0
------	-------	---	---	-------	-------	-------	-------

**Figure II- 7 :** Registre ADCON1 de configuration du convertisseur analogique-numérique

Les bits composants le registre de configuration ADCON1 sont les suivants :

- ADFM : justification à droite ou à gauche du résultat dans les registre ADRESH et ADRESL,
  - 1 : justifié à droite 0 0 0 0 0 XX XXXXXXXX
  - 0 : justifié à gauche XXXXXXXX XX 0 0 0 0 0
- ADCS2 : Choix de l'horloge de conversion avec les bits ADCS1-ADCS0 du registre ADCON0,
- PCFG3 : PCFG0 : configuration le mode de fonctionnement des entrées/sorties associées aux convertisseur et les tensions de références. Les 5 broches de PORTA et les 3 de PORTE peuvent être configurées soit en entrée/sortie digitale, soit en entrées analogiques. RA2 et RA3 peuvent aussi être configurées en entrée de référence.

PCFG <3:0>	AN7	AN6	AN5	AN4	AN3	AN2	AN1	AN0	VREF+	VREF-	C/R
0000	A	A	A	A	A	A	A	A	VDD	Vss	8/0
0001	A	A	A	A	VREF+	A	A	A	AN3	Vss	7/1
0010	D	D	D	A	A	A	A	A	VDD	Vss	5/0
0011	D	D	D	A	VREF+	A	A	A	AN3	Vss	4/1
0100	D	D	D	D	A	D	A	A	VDD	Vss	3/0
0101	D	D	D	D	VREF+	D	A	A	AN3	Vss	2/1
011x	D	D	D	D	D	D	D	D	—	—	0/0
1000	A	A	A	A	VREF+	VREF-	A	A	AN3	AN2	6/2
1001	D	D	A	A	A	A	A	A	VDD	Vss	6/0
1010	D	D	A	A	VREF+	A	A	A	AN3	Vss	5/1
1011	D	D	A	A	VREF+	VREF-	A	A	AN3	AN2	4/2
1100	D	D	D	A	VREF+	VREF-	A	A	AN3	AN2	3/2
1101	D	D	D	D	VREF+	VREF-	A	A	AN3	AN2	2/2
1110	D	D	D	D	D	D	D	A	VDD	Vss	1/0
1111	D	D	D	D	VREF+	VREF-	D	A	AN3	AN2	1/2

A = Analog input    D = Digital I/O  
 C/R = # of analog input channels/# of A/D voltage references

**Tableau II-1 :** Sélection des tensions de référence du convertisseur analogique-numérique

## 8. Brochage et alimentation du PIC16F877A :

Comme notre microcontrôleur PIC16F877A ne peut pas supporter une tension supérieure à 5.5 V, le régulateur de tension LM7805 avec ses capacités de découplage a été utilisé pour régler la tension d'alimentation du microcontrôleur sur 5 V. L'alimentation du microcontrôleur se fait par le biais des broches 11, 32 sur la tension  $V_{DD}$ , et les broches 12, 31 sur la tension  $V_{SS}$ .

Pour passer directement en mode RUN, la broche MCLR a été relié directement à la tension d'alimentation à travers une résistance 10 k $\Omega$ . Afin d'autoriser la remise à zéro manuel, un bouton Reset a été inséré entre la broche MCLR et la  $V_{SS}$ .

Pour cadencer le fonctionnement de notre microcontrôleur, une horloge (par exemple un quartz et ses deux capacités) doit être branchée sur les broches 13, 14(OSC1 et OSC2).

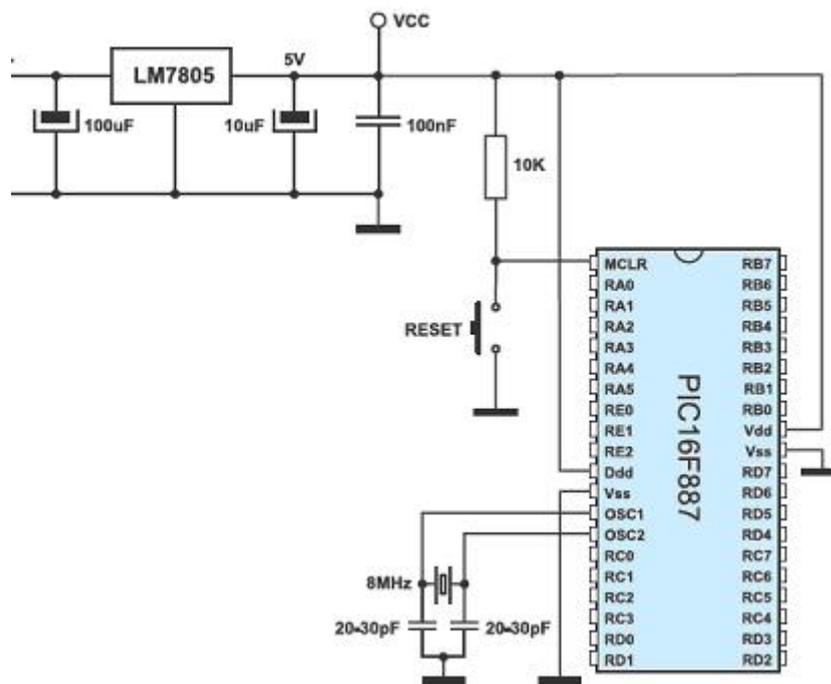


Figure II- 8 : Minimum de brochage pour faire fonctionner un PIC16F877A

## 9. Mesure de tension de la batterie :

Nous allons utiliser la broche RA0 configurée comme entrée A/N pour acquérir la tension de la batterie. Mais comme la tension de la batterie (presque 15 V) dépasse largement la tension limite de la broche d'acquisition (5 V), on a utilisé un diviseur de tension 1/3 constituée de deux résistances pour ramener la tension maximale que peut atteindre à la batterie (15 V) à la tension maximale admissible sur la broche d'acquisition (5 V). Pour cela, nous avons utilisé la formule suivante :

$$V_{\text{max-analogique}} = \frac{R_b}{R_a + R_b} V_{\text{batterie-max}} \quad (\text{II.1})$$

La valeur mesurée sur la broche sera multipliée par 3 pour retrouver la valeur réelle de la tension de la batterie.

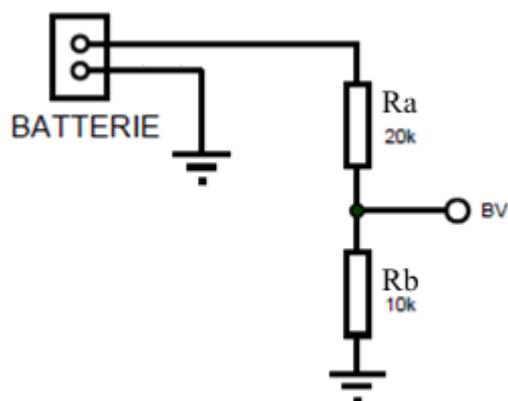


Figure II- 9 : Circuit d'acquisition de la tension de la batterie

### 10. Isolation de la partie commande de la partie puissance :

La partie commande sert à donner les ordres qui pilote le schéma global ; elle permet d'activer ou d'éteindre la partie puissance. On peut l'assimiler à une sorte de « télécommande ».

La partie puissance sur une carte électronique sert, comme son nom l'indique, à acheminer la puissance vers le récepteur électrique. Elle est généralement composée du disjoncteur divisionnaire de protection du circuit électrique ; un relais 10 A, par exemple, dans notre cas.

L'isolation entre ces deux parties peut se faire avec des relais de 5 V (commutation de 10 A/30VDC), ou par des opto-coupleurs 4N25 associés à des MOSFETs ou transistors de puissance.

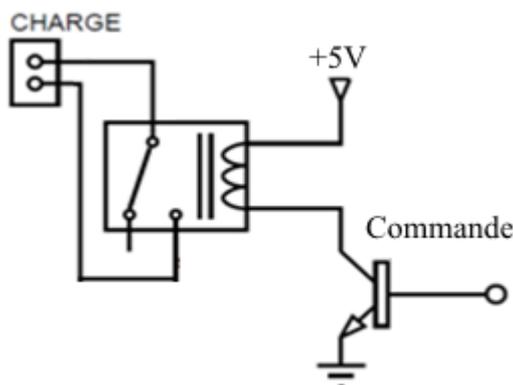


Figure II- 10 : Brochage du relais

Comme l'excitation de la bobine de commande de notre relais nécessite un courant qui dépasse le courant maximale de sortie de la broche du microcontrôleur, nous avons ajouté un transistor de commande de type NPN (le BD911 ou le BDX53 dans nos montages). Ce transistor a la capacité de véhiculer le courant de la bobine du relais. Comme il a rapport d'amplification fort, le courant consommé à partir de la broche de commande du microcontrôleur va être très petit ; chose qui aide à la protection de notre circuit de commande.

La partie puissance a été branchée sur la position normalement ouvert NO, afin de permettre une ouverture naturelle du circuit quand il n'est pas alimenté.

## CHAPITRE II : Régulateur de charge solaire

L'optocoupleur repose sur une LED et un phototransistor ou une photodiode. Lorsqu'on fait passer un courant dans la LED, elle émet de la lumière dans un boîtier bien hermétique à la lumière. La lumière émise par cette LED sera captée par le phototransistor qui devient alors passant. On peut donc transmettre un courant électrique sur le phototransistor tout en isolant électriquement sa partie de commande. Dans son principe, l'optocoupleur fait les conversions successives : courant électrique / lumière / courant électrique.

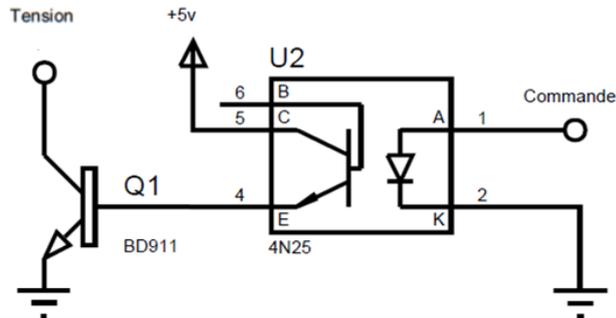


Figure II- 11 : Schéma de l'isolation optique

### 11. 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 3 témoins LED : Rouge pour batterie déchargée, Jaune pour batterie moyennement chargée et Vert pour batterie totalement chargée.
- Affichage sur un écran LCD.

Les afficheurs LCD ont devenu indispensables dans les systèmes embarqués qui nécessitent l'affichage de paramètres de fonctionnement. Ils disposent d'un circuit intégré spécialisé chargé de la gestion du module. Il remplit une double fonction d'une part il commande l'afficheur et d'autre part, il se charge de la communication avec l'extérieur.

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

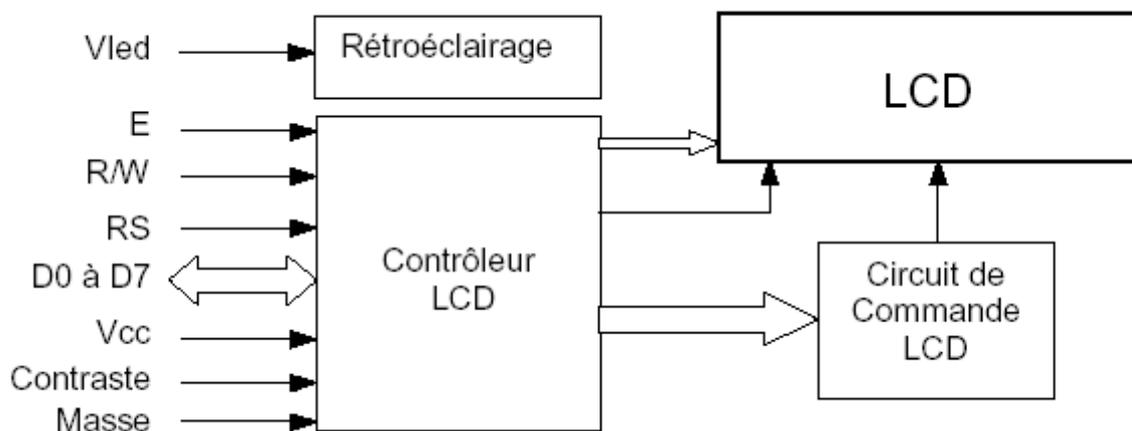
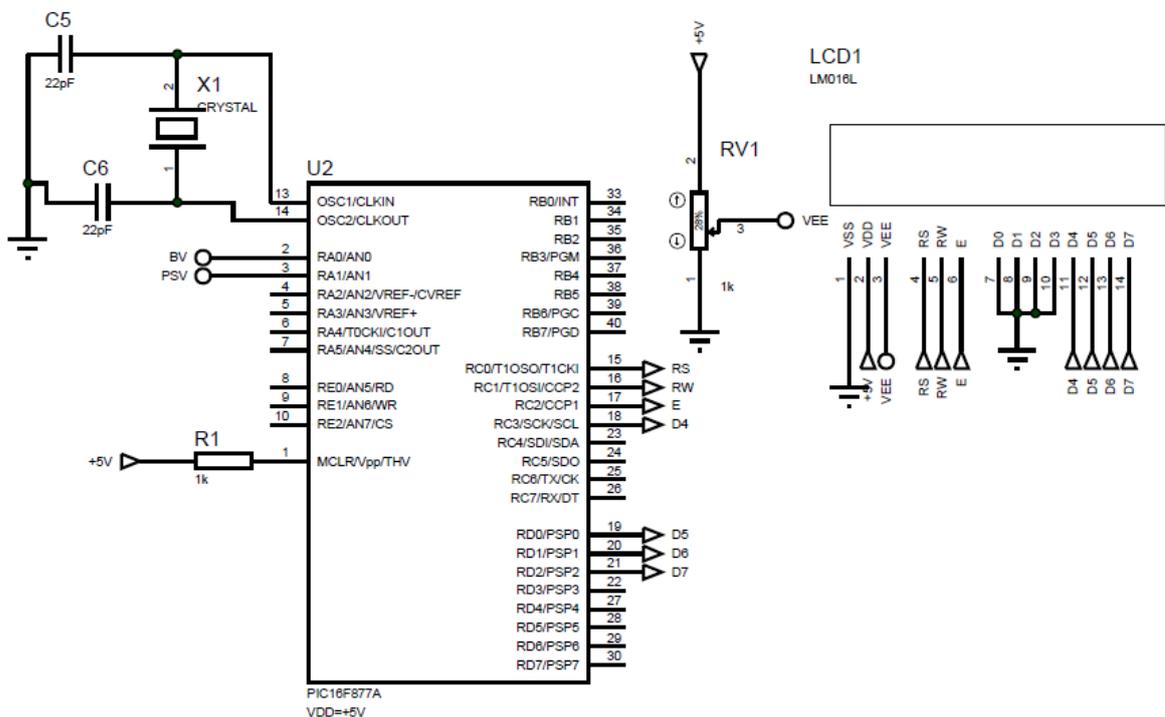


Figure II- 12 : Schéma fonctionnel d'un afficheur LCD

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

## CHAPITRE II : Régulateur de charge solaire

- $V_{CC}$ , 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,
- $V_{LED}$  : 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.



**Figure II- 13 :** Brochage d'un afficheur LCD LM016 (2x16) avec un PIC16F877A

En fonction du mode de commande choisie de l'afficheur LCD la mise en œuvre matérielle sera différente. Il existe deux modes de commande d'un afficheur LCD :

- En mode de commande 4 bits l'intérêt est de limiter le nombre de broches du microcontrôleur. Il faut utiliser 7 broches des ports d'entrées/sorties du microcontrôleur (configurées en sorties) de manière à commander l'afficheur.
- En mode de commande 8 bits on utilise plus de broches du microcontrôleur. Il faut utiliser 11 broches des ports d'entrées/sorties de microcontrôleur (configurées en sorties) de manière à commander l'afficheur.

### 12. Interface de communication série (RS232) :

L'interfaçage permet l'échange d'informations entre deux ou plusieurs périphériques.

## CHAPITRE II : Régulateur de charge solaire

Pour notre cas, on s'intéresse à l'interfaçage entre le PC et la carte électronique du régulateur de charge. Pour cela, on a réalisé une interface série (RS232) avec le PIC16F877.

Les liaisons séries permettent la communication entre deux systèmes numériques en limitant le nombre de fils de transmission. La liaison série aux normes de RS232 est utilisée dans tous les domaines de l'informatique. Elle est de type asynchrone, c'est-à-dire qu'elle ne transmet pas le signal de l'horloge.

La transmission série nécessite au moins 2 fils de communication, l'un pour la transmission (Tx) et l'autre pour la réception (Rx) et un fil de masse.

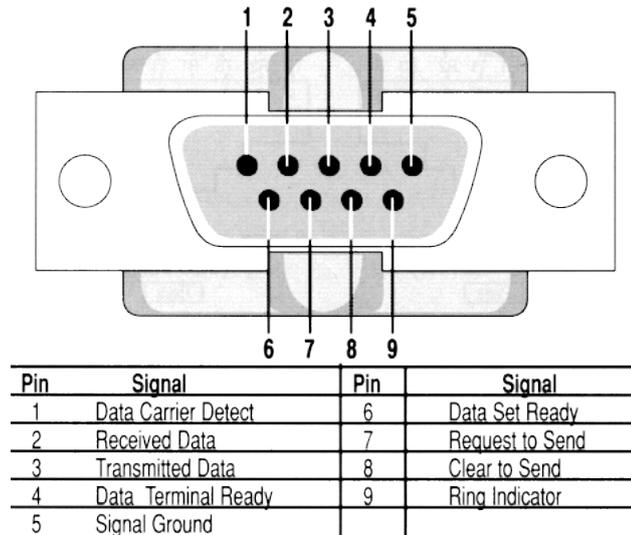


Figure II- 14 : Broches de connexion RS232

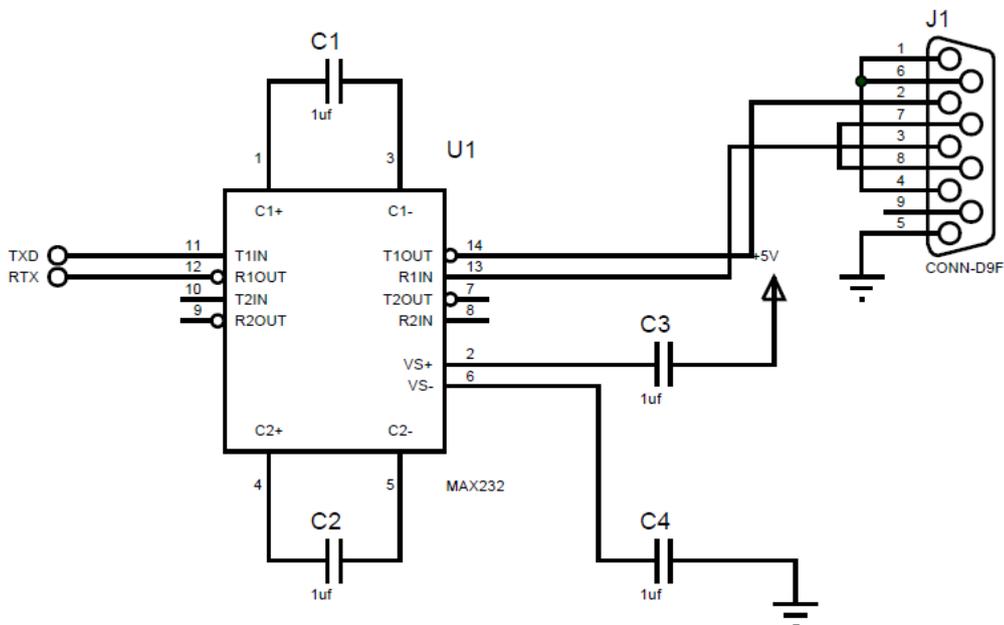


Figure II- 15 : Brochage du MAX232 au port DB9 Femelle

## CHAPITRE II : Régulateur de charge solaire

Le microcontrôleur PIC16F877A utilise les niveaux de tension 0 V et 5 V pour définir respectivement des signaux « 0 » et « 1 ». La norme de communication série RS232 définit des niveaux +12 V et -12 V pour établir ces mêmes niveaux.

Pour établir cette communication, nous avons besoin d'un circuit permettant d'adapter les niveaux de tensions entre le PIC16F877 et le port série du PC.

La broche TX du PIC16F877 émettra en 0/5 V ; cette tension sera convertie en  $\pm 12$  V quand elle arrive au port série du PC. La broche RX du PIC16F877A recevra les signaux en provenance du PC, signaux qui seront convertis de  $\pm 12$  V en 0/5 V par le biais de notre circuit de pilotage du bus ; le célèbre circuit MAX232.

Le circuit MAX232 inclut deux récepteurs et deux émetteurs transformant les signaux RS232 en signaux TTL et inversement. Pour fournir les niveaux de +12 V et -12 V à partir du +5 V, ce circuit est doté d'un convertisseur de tension. Il est bien sûr évident que ce circuit intégré est muni de tout un système électronique. A travers les capacités C1 et C3, il génère une tension de +10 V à partir de 5 V (doubleur de tension), et au moyen des capacités C2 et C4, il génère une tension de -10 V à partir de la tension de 10 V (inverseur de tension).

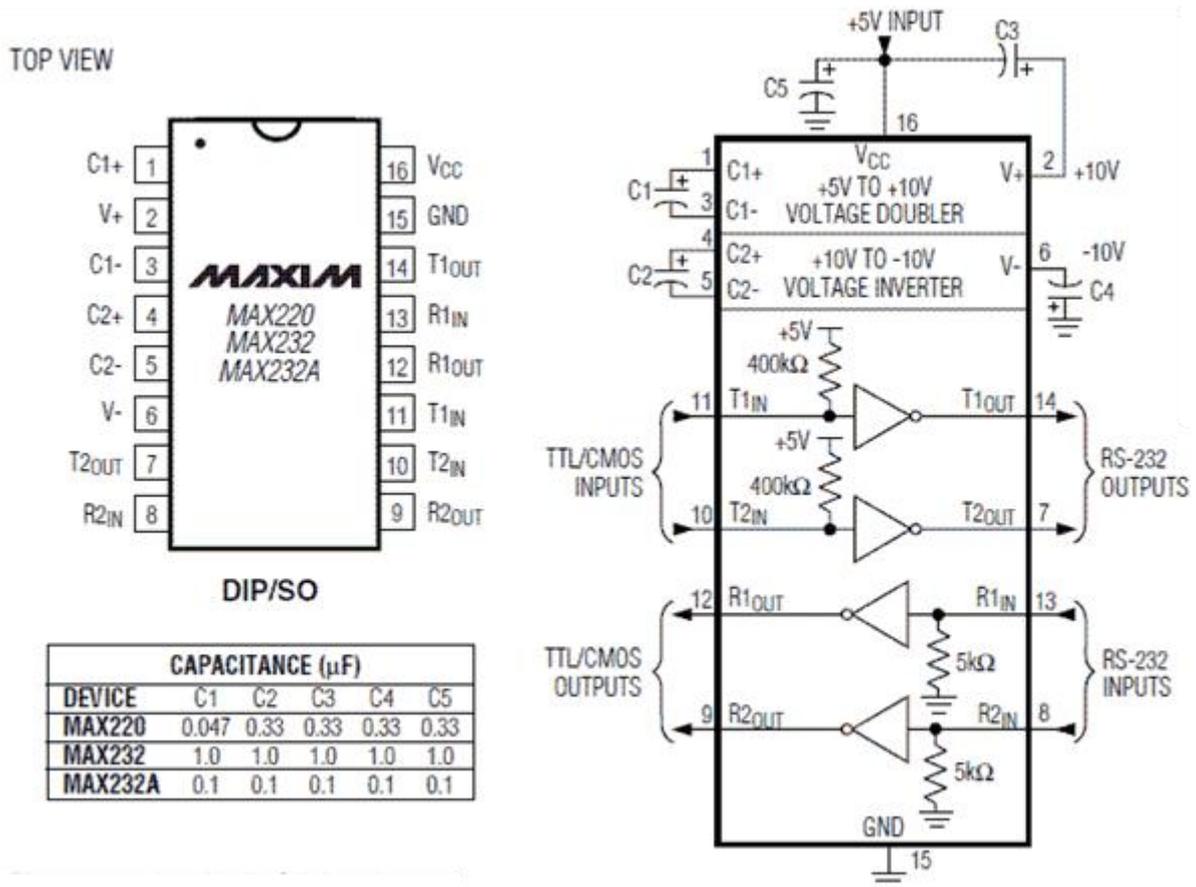


Figure II- 16 : Schéma interne du MAX232

### 13. Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons présenté les différents types de régulateurs ainsi que le principe de fonctionnement du régulateur qu'on a choisi.

## ***CHAPITRE II : Régulateur de charge solaire***

Pour réguler la tension de la batterie, notre régulateur de charge/décharge de la batterie acide-au-plomb se base sur le microcontrôleur PIC16F877A. Il dispose d'une unité d'acquisition et de contrôle, ainsi qu'un afficheur LCD qui nous indique la tension présente. L'interfaçage avec le PC se fait à l'aide du port de communication série RS232 pour une éventuelle visualisation sur une interface graphique.

**CHAPITRE III:**  
**REALISATION PRATIQUE**  
**DU REGULATEUR DE CHARGE**

---

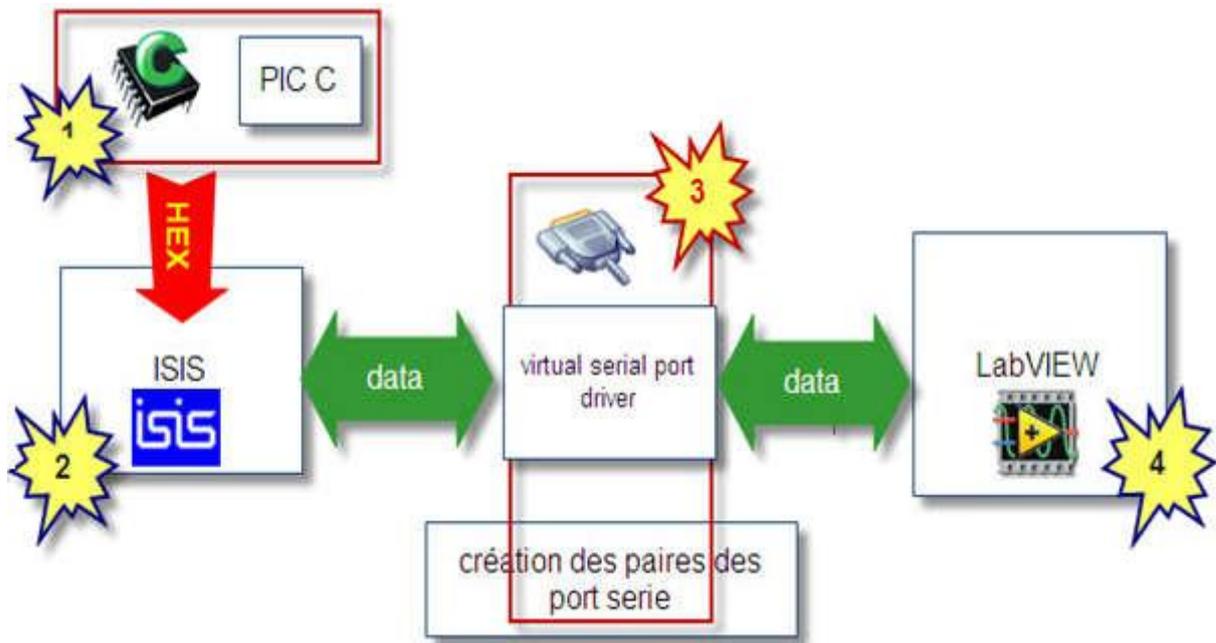
## CHAPITRE III : Réalisation pratique du régulateur de charge

Pour réaliser une carte électronique, il faut suivre toujours des étapes pour assurer le bon fonctionnement et avoir de bon résultat.

Au début, il faut comprendre le cahier de charge pour définir les différents composants et les blocs de la carte. Puis, il faut tester les schémas électroniques et la partie programmation en simulations. On peut faire la visualisation du comportement du schéma électronique grâce à des logiciels spécifiques qui indiquent les données qui entre et qui sort depuis le microcontrôleur. En fin, l'impression du schéma électronique final obtenu après les essais en circuit imprimé. En ce moment, le placement des composants, la soudure et la mise en pratique réellement deviendra une tâche simple.

Dans ce travail, nous avons réalisé deux cartes électroniques. Nous allons expliquer au fur et à mesure les étapes de la réalisation de chaque carte et la différence entre les deux.

### 1. Logiciels utilisés :



**Figure III- 1 :** Logiciels utilisés pour effectuer les simulations des cartes électroniques

#### 1.1. Programmation en C avec le logiciel CCS-PICC :

Pour la simplicité et la facilité de la programmation, plusieurs langages ont été évolués dans le temps. La programmation des microcontrôleurs PIC est supportée par plusieurs compilateurs comme : CCS-PICC, MPLAB, MikroC, HI-TECH C, FlowCODE ...

Dans notre projet nous avons opté pour le compilateur CCS-PICC qui est un compilateur en langage évolué (langage C). Ce choix est à la fois un choix personnel et technologique.

## CHAPITRE III : Réalisation pratique du régulateur de charge

```

/* EXEMPLE DE PROGRAMME */
#include <p16f876A.h>
#define duree 10000

char c;
float pht;

void tempo(unsigned int compte);

void main(void)
{
    PORTB = 0x00;
    TRISB = 0x00;
    while(1)
    {
        PORTB++;
        tempo(duree);
    }
}

void tempo(unsigned int compte)
{
    while(compte--);
}

```

**Commentaires entre /\* et \*/ ou apres //**  
**Bibliothèque du composant utilisé, contient la définition des variables internes PORT A, PORT B ... Indispensable !**  
**Equivalence : remplacées par leur valeur a la compilation**  
**Variables globales (non utilisées ici) : Char : Octet / Float : Réel.**  
**Prototype de la fonction « tempo », indispensable car le cors de cette fonction est à la fin du programme.**  
**Programme principal (main), Void indique qu'il n'y a pas de paramètre d'entrée.**  
**Représentation des nombres : « 12 » codé en décimal représente 12 « 0xC » codé en hexadécimal représente 12 « 0b00001100 » codé en binaire représente 12**  
**Boucle infinie**  
**Fonction (sous programme), en C il n'y a que des fonctions Un paramètre entier en entrée, pas de résultat retourné, du type y=sin(x) compte est une variable locale car déclarée dans la fonction, elle n'existe que lors de l'exécution de la fonction.**

Figure III- 2 : Exemple de structure d'un programme en langage CCS-PICC

### 1.2. Logiciel de schématisation/routage PROTEUS :

Proteus est une suite de logiciels permettant la CAO électronique éditée par la Société LabCenter Electronics. Il est composé de deux logiciels principaux :

- ISIS : permettant entre autres la création de schémas et la simulation électrique,
- ARES : dédié à la création de circuits imprimés.

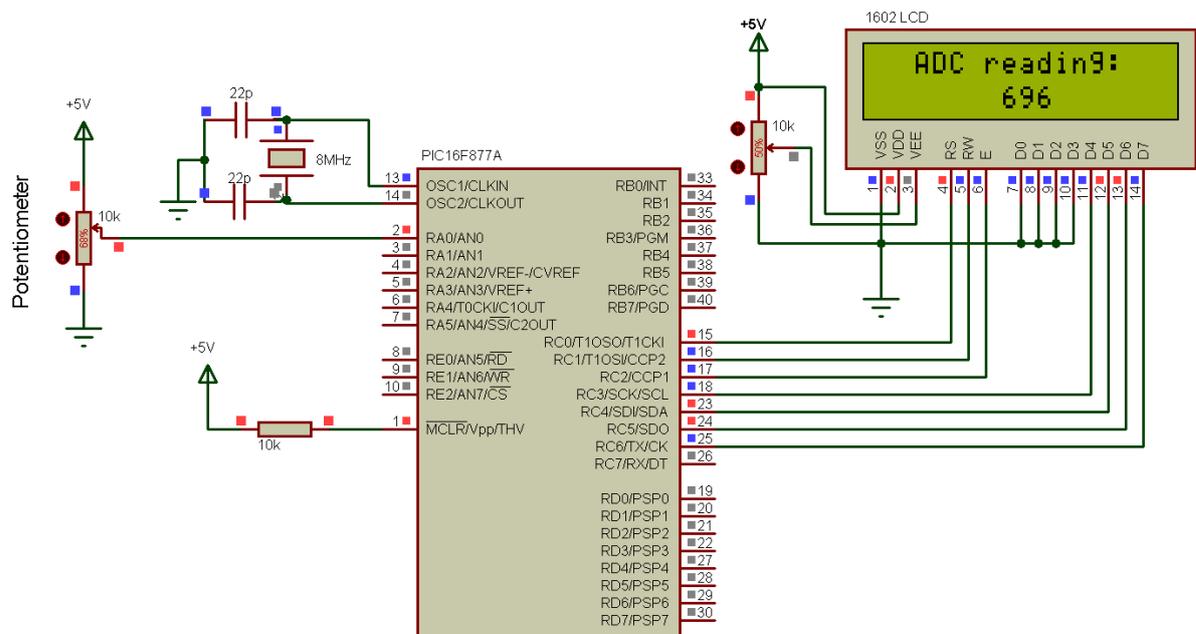
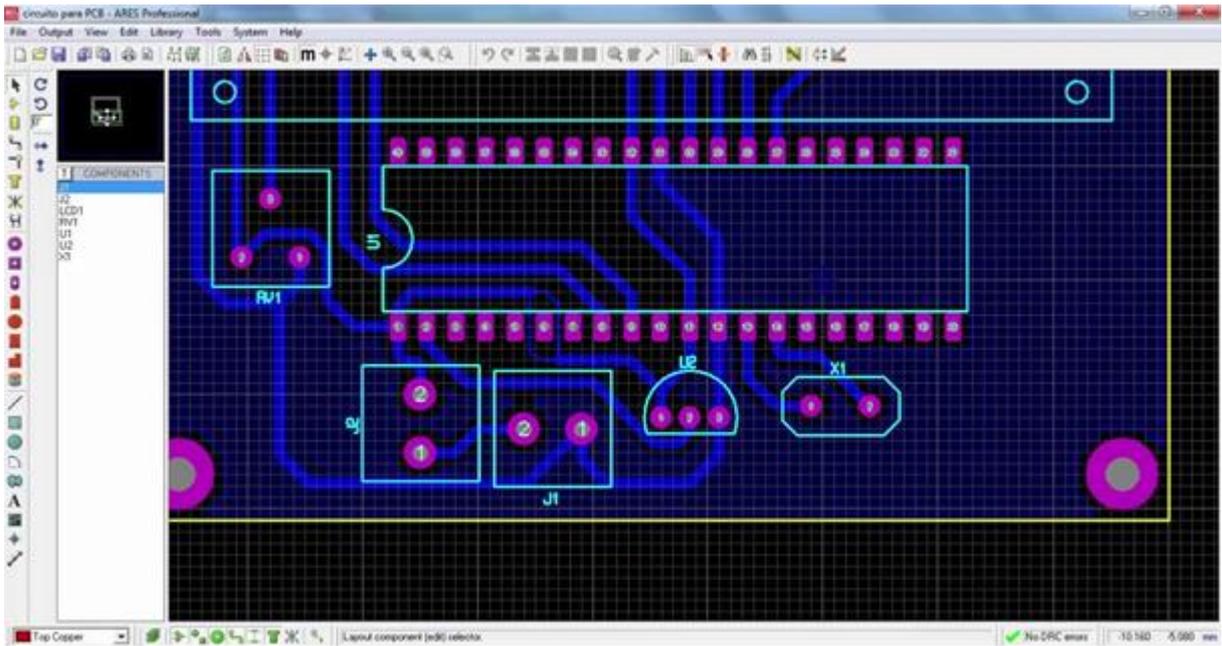


Figure III- 3 : Exemple d'un schéma créé sous le logiciel ISIS

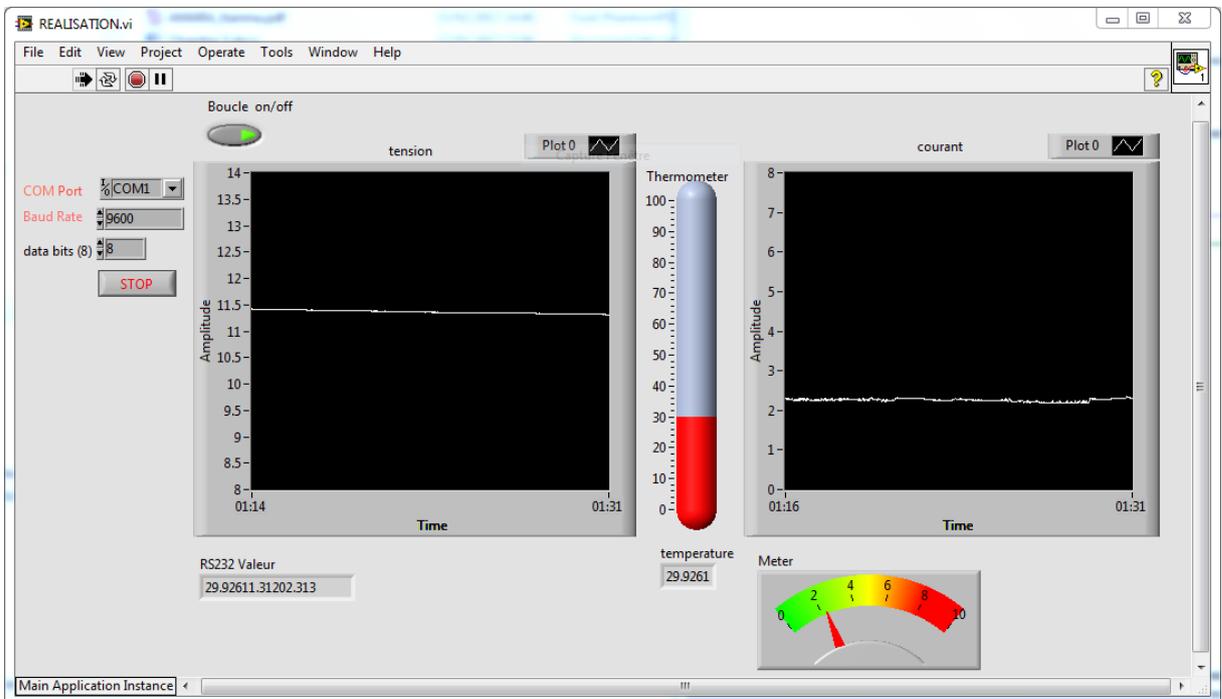


**Figure III- 4 :** Exemple d'une partie d'un circuit imprimé créée sous le logiciel ARES

### 1.3. Logiciel de programmation graphique LabVIEW :

LabVIEW (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench) est un logiciel de programmation développé par la Société National Instrument.

Ce qui différencie LabVIEW des méthodes classiques de programmation est son environnement de développement graphique. On programme en ajoutant des objets, en les reliant, en créant des structures ; on obtient ainsi un programme sous forme de diagramme.



**Figure III- 5 :** Exemple d'une interface graphique créée sous le logiciel LabVIEW

2. Réalisation de la première carte de régulation :

Après qu'on s'est assuré du bon fonctionnement de la simulation et la programmation, nous allons passer à la réalisation pratique du régulateur de charge. Le schéma de notre régulateur de charge est représenté par la figure qui suit.

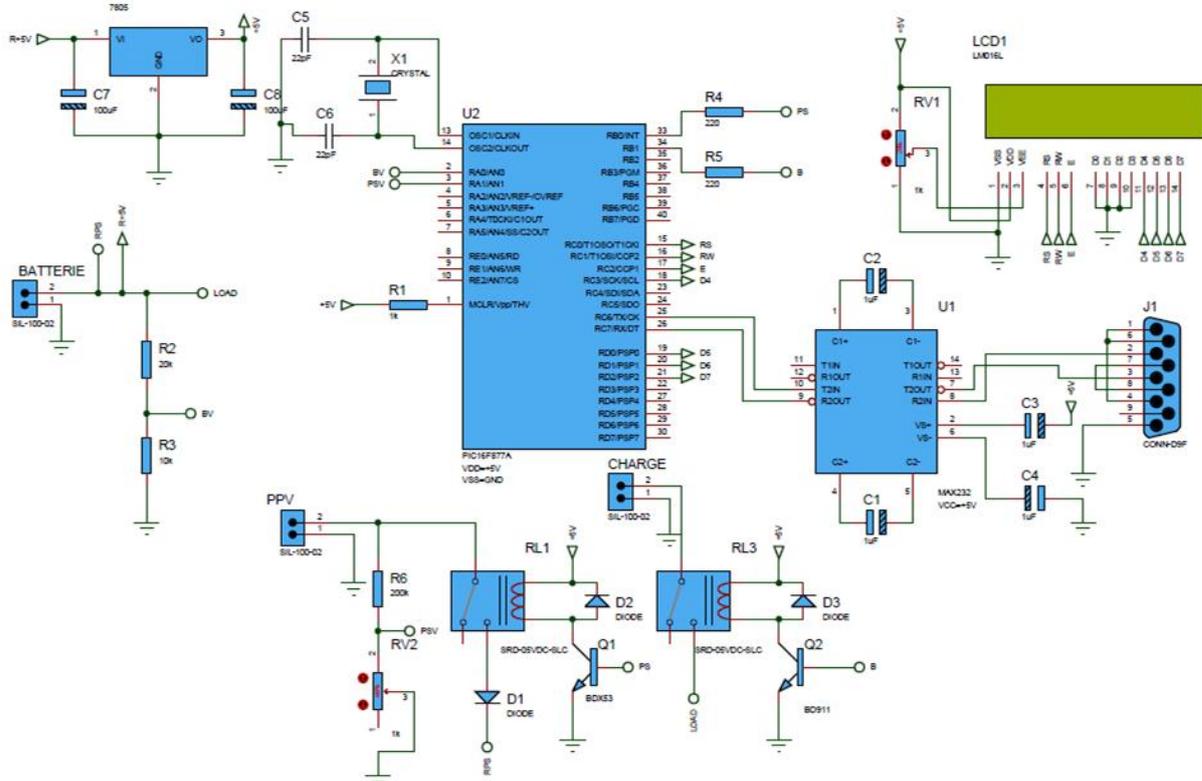


Figure III- 6 : Schéma global de la réalisation du régulateur de charge

Le schéma de la figure qui suit représente l'emplacement réel des composants sur le circuit imprimé, ainsi que les connexions entre ses composants.

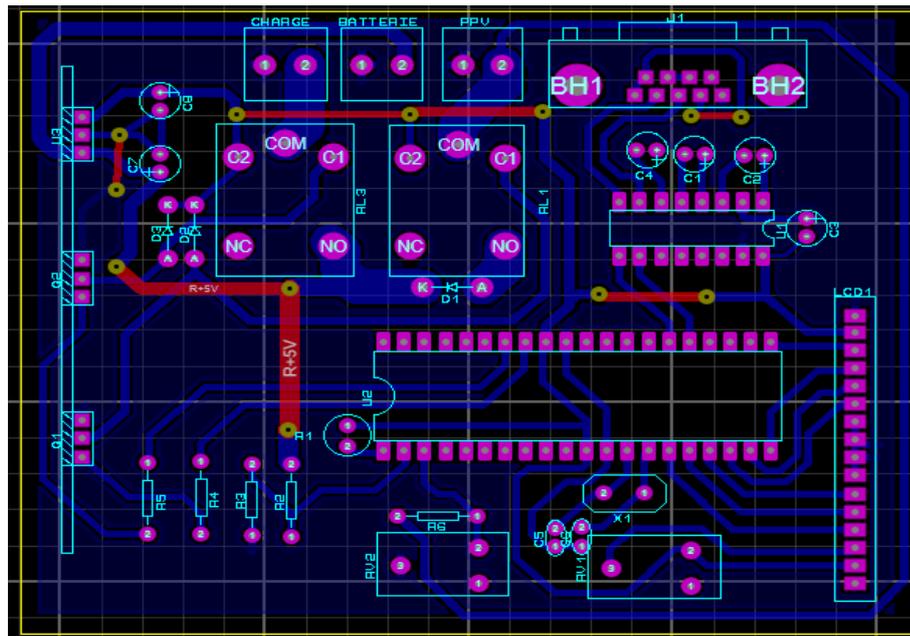
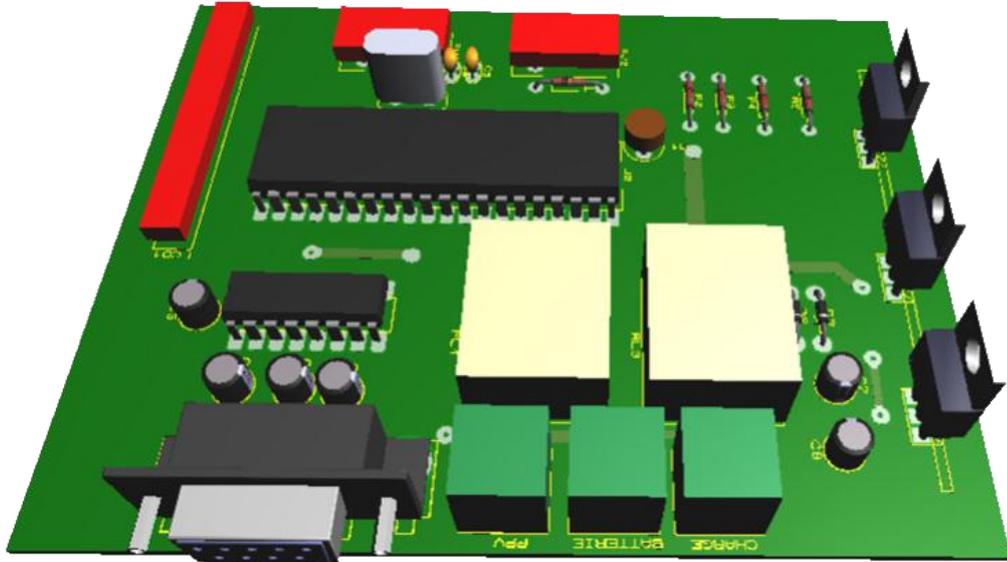


Figure III- 7 : Première version du régulateur de charge réalisé

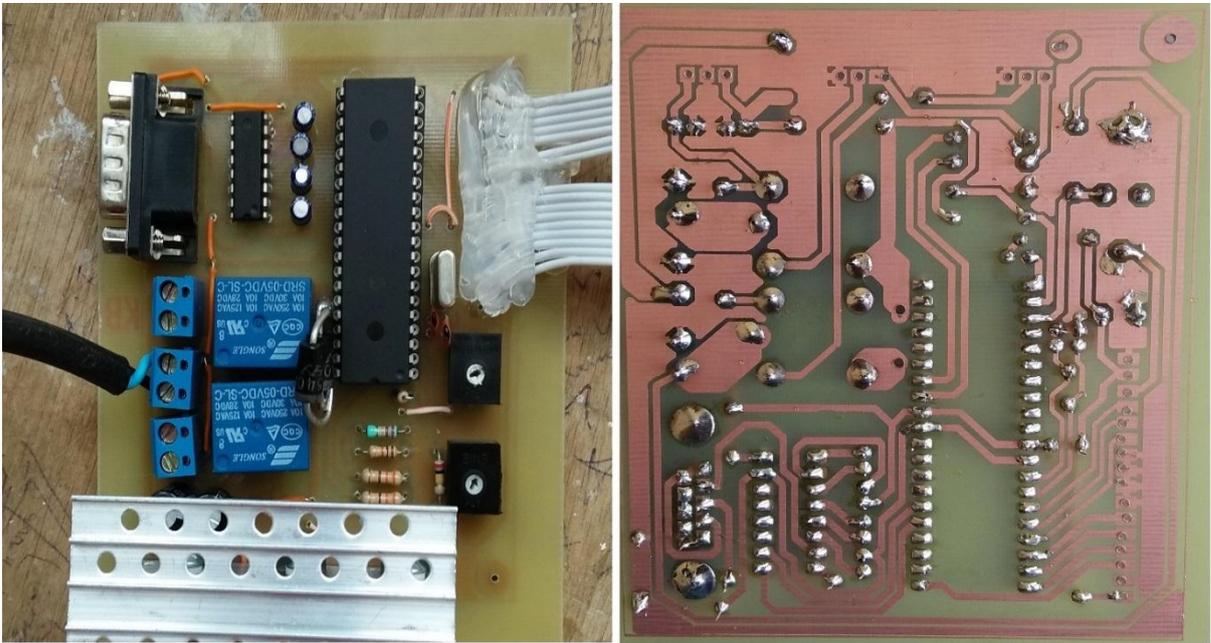
### CHAPITRE III : Réalisation pratique du régulateur de charge

Grace au logiciel Proteus, on peut aussi visualiser notre carte en 3D. Ceci donne une image plus claire de ce qu'on cherche à réaliser réellement. La figure qui suit montre de quoi aura l'air notre carte de régulation.



**Figure III- 8 :** Vision 3D de la première version du régulateur de charge réalisé

Finalement, et après toutes les procédures de réalisation, on a réalisé notre première carte de régulation de charge. Les figures suivantes montrent les vues de faces et soudure de cette carte.



**Figure III- 9:** Première version réalisée du régulateur de charge

Ce régulateur fait l'affichage des tensions mesurées du panneau solaire et de la batterie. Selon l'état de charge, il lance soit la charge ou bien la décharge de la batterie. La figure suivante présente un essai réel de la carte.



**Figure III- 10 :** Premier essai de calibration des mesures de tensions

### 3. Mise à jour de la carte de régulation de charge :

Après les essais pratiques de la première version du régulateur de charge et les difficultés rencontrés, nous avons essayé d'améliorer cette carte de régulation de charge. Nous avons ajouté la mesure du courant de charge/décharge et la mesure de la température de fonctionnement. Avoir plus de détails, ceci nous permet d'analyser correctement les régimes de charges et de décharges de la batterie.

#### 3.1. Circuit de mesure du courant de charge/décharge :

On peut mesurer le courant à l'aide d'un shunt de mesure de courant. Le shunt utilisé à une valeur de 0.01 Ohm et support un courant maximum de 10 A. Donc, pour chaque ampère on mesure une tension de 10 mA ; jusqu'à un maximum de 100 mA lorsqu'on a 10 A.

Notre microcontrôleur fait l'échantillonnage de la tension de 0-5 V sur un maximum de 10 bits (1024 points) ; ceci nous donne une résolution de 4.88 mV. Si on utilise les tensions de référence pour améliorer la résolution, on peut convertir la plage 0.5-2.5 V en 0-1023 bits, ce qui donne une résolution de 2 mV.

Ces deux résolutions ne sont pas suffisantes dans notre cas. Comme la tension du shunt est très faible et on cherche à avoir une bonne résolution, l'amplification de cette tension est nécessaire.

Parmi les amplificateurs opérationnels qui existe, nous avons choisi le circuit LM358N parce qu'il a l'avantage d'intégrer 2 amplificateurs opérationnels sur le même boîtier, et parce qu'il s'alimente avec la tension 0-5 V. Nous pouvons même utiliser le circuit LM324 qui contient 4 amplificateurs opérationnel sur le même boîtier.

## CHAPITRE III : Réalisation pratique du régulateur de charge

Pour amplifier la tension shunte, nous pouvons utiliser le montage suivant :

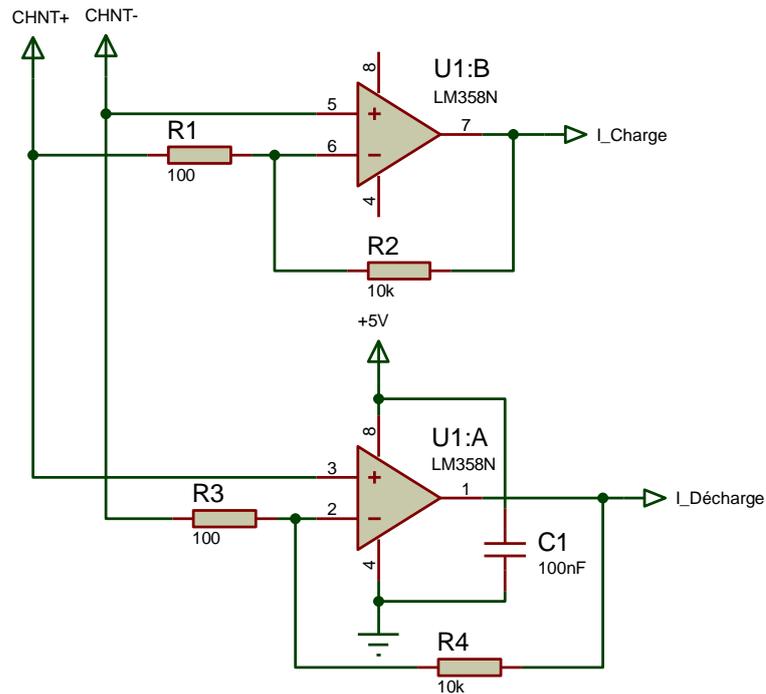


Figure III- 11 : Schéma d'amplification pour mesurer le courant de charge/décharge

### 3.2. Mesure de la température :

Le capteur de température LM35 est un capteur analogique de température fabriqué par la société Texas Instruments. Il est extrêmement populaire en électronique, car précis, peu coûteux, très simple d'utilisation et d'une fiabilité à toute épreuve.

Ce capteur est capable de mesurer des températures allant de  $-55^{\circ}\text{C}$  à  $+150^{\circ}\text{C}$  dans sa version la plus précise et avec le montage adéquat.

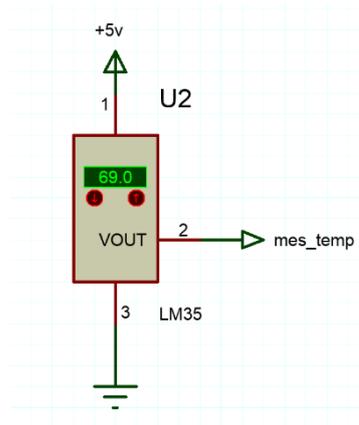


Figure III- 12 : Schéma de branchement du capteur de température

### 3.3. Assemblage de la nouvelle carte de régulation de charge :

L'ajout du capteur de courant et celui de la température nous permet d'obtenir le schéma suivant :

### CHAPITRE III : Réalisation pratique du régulateur de charge

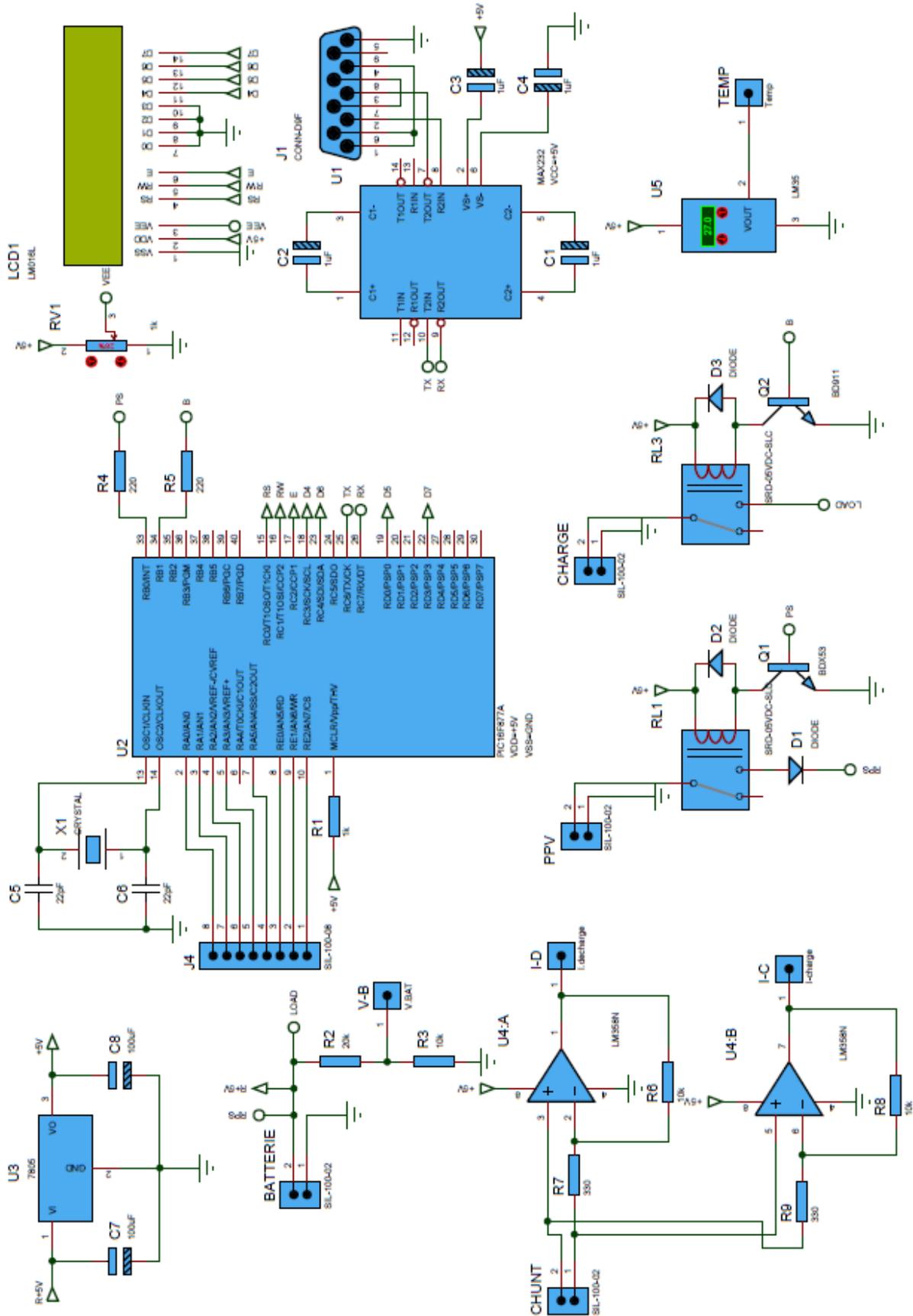


Figure III- 13 : Schéma de la nouvelle carte de régulation de charge

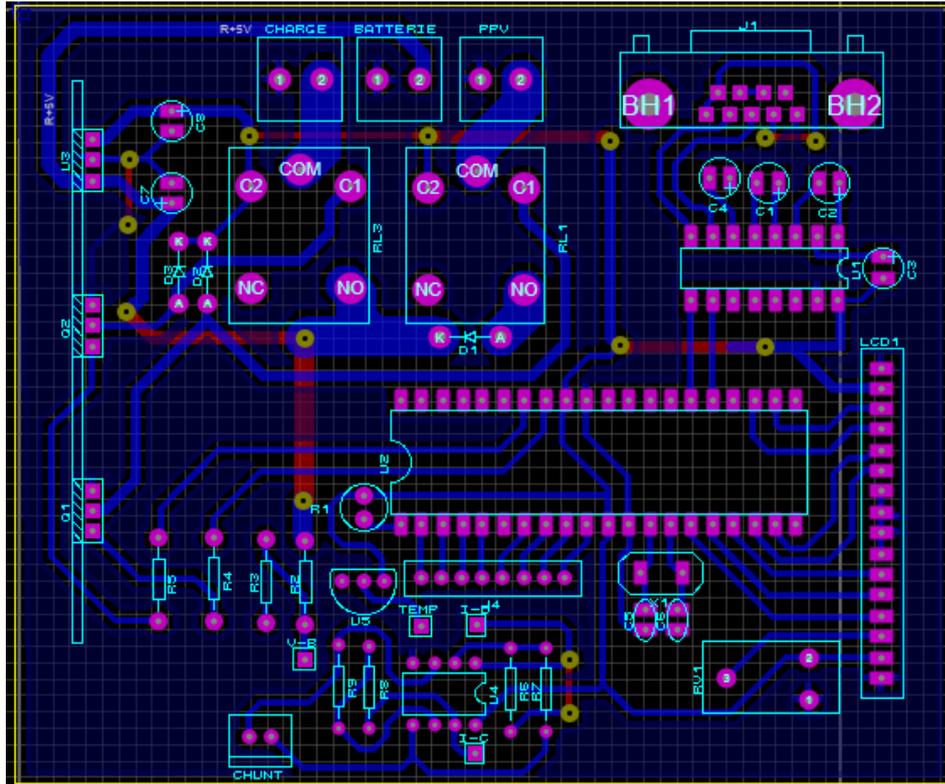


Figure III- 14 : Schéma de réalisation de la nouvelle carte de régulation de charge

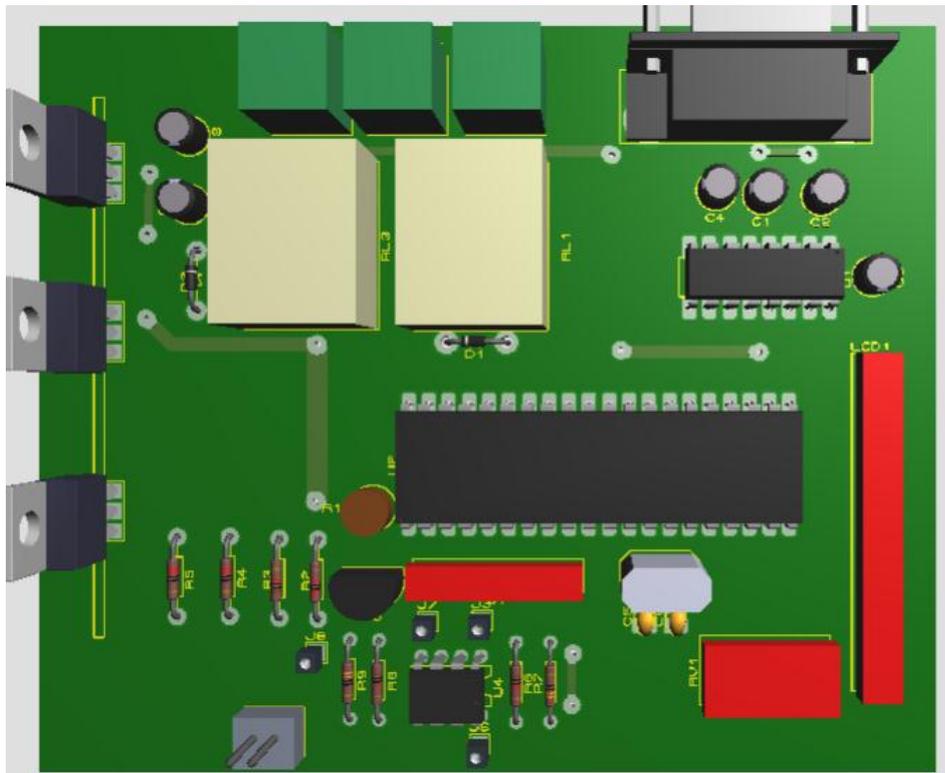
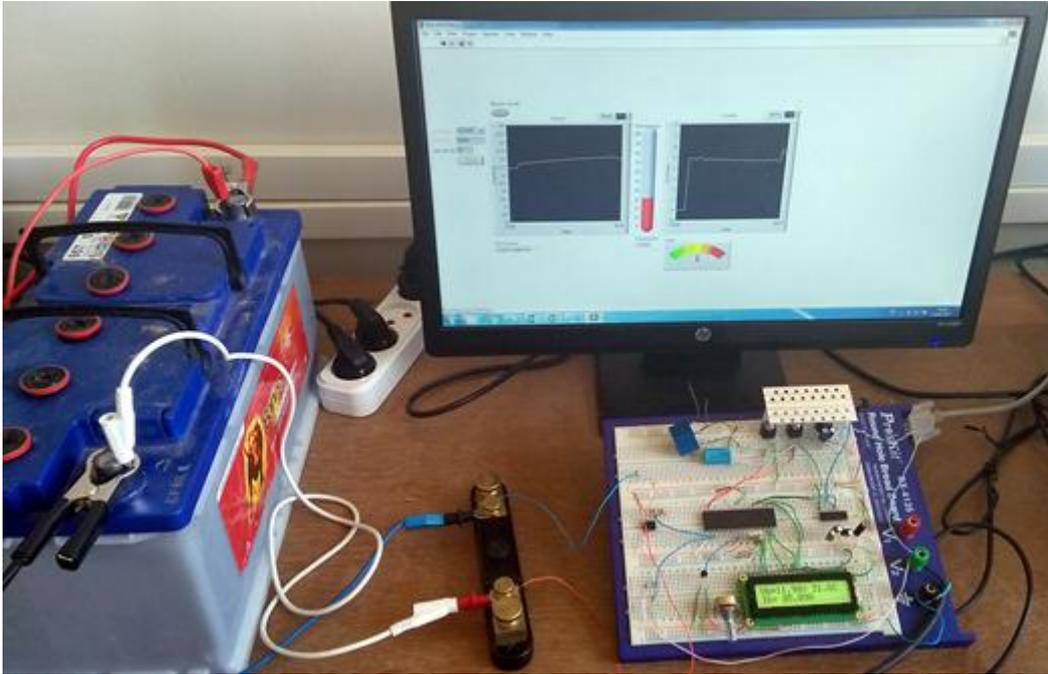


Figure III- 15 : Représentation 3D de la nouvelle carte de régulation de charge

Avant de réaliser la carte, nous avons fait des essais sur un banc d'essais connecter directement à un PC à travers la liaison RS232.

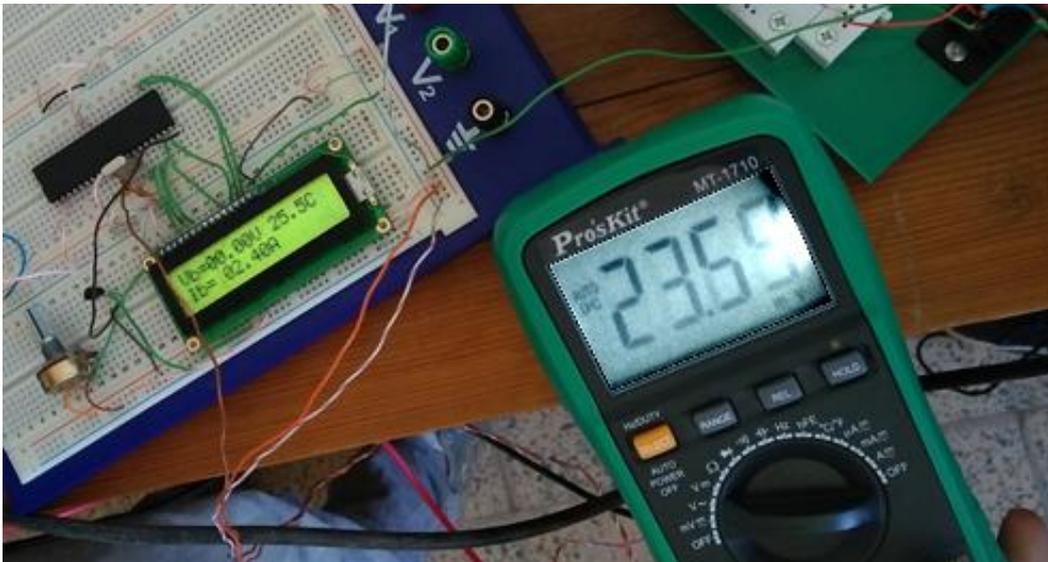
### CHAPITRE III : Réalisation pratique du régulateur de charge

En premier, on a remplacé le panneau solaire photovoltaïque avec une source de tension pour éviter les changements météorologiques, en plus d'avoir la possibilité de régler la tension de la source pour avoir le courant de charge désiré.



**Figure III- 16 :** Mise en marche du banc d'essai avec la communication PC

Pour avoir une bonne précision lors de la mesure du courant, on a fait plusieurs essais tout en jouant sur les résistances choisies pour l'étage d'amplificateur et la programmation du filtrage numérique dans le microcontrôleur.

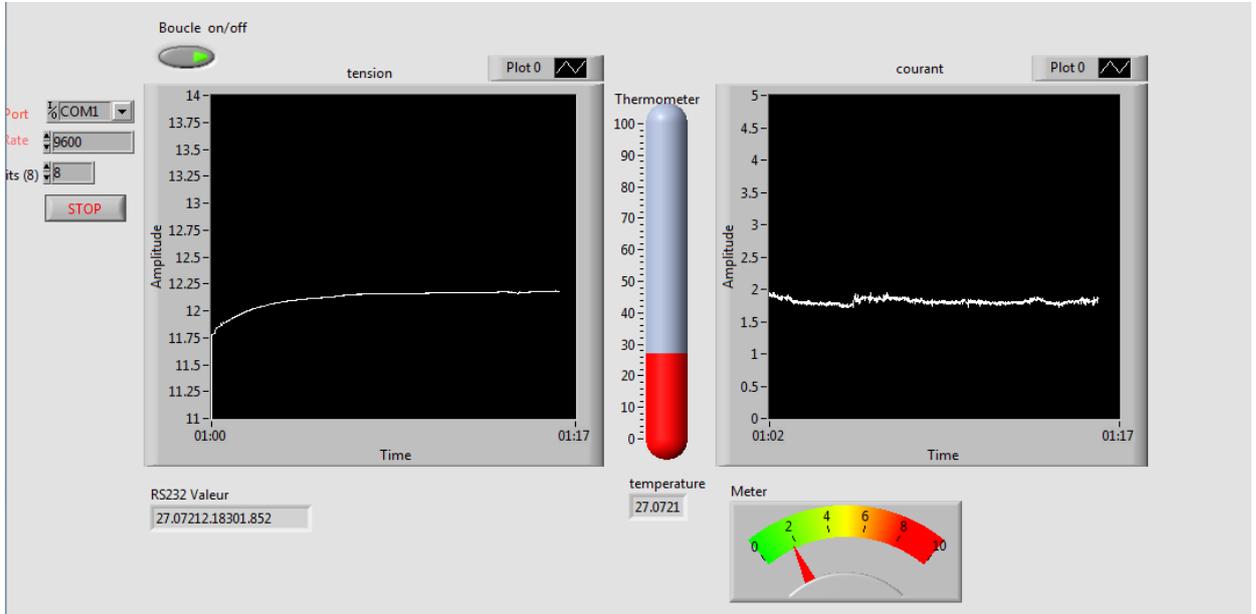


**Figure III- 17 :** Calibration de la mesure du courant et de la température

Dans la figure précédente, on remarque une légère différence lors de la mesure du courant (microcontrôleur : 02.40A, Shunt :  $23.59\text{mV}/10\text{mV}=02.359\text{A}$ ). Ceci est dû à l'ajustement avec finesse de la valeur des résistances.

**4. Essai pratique du cycle de charge :**

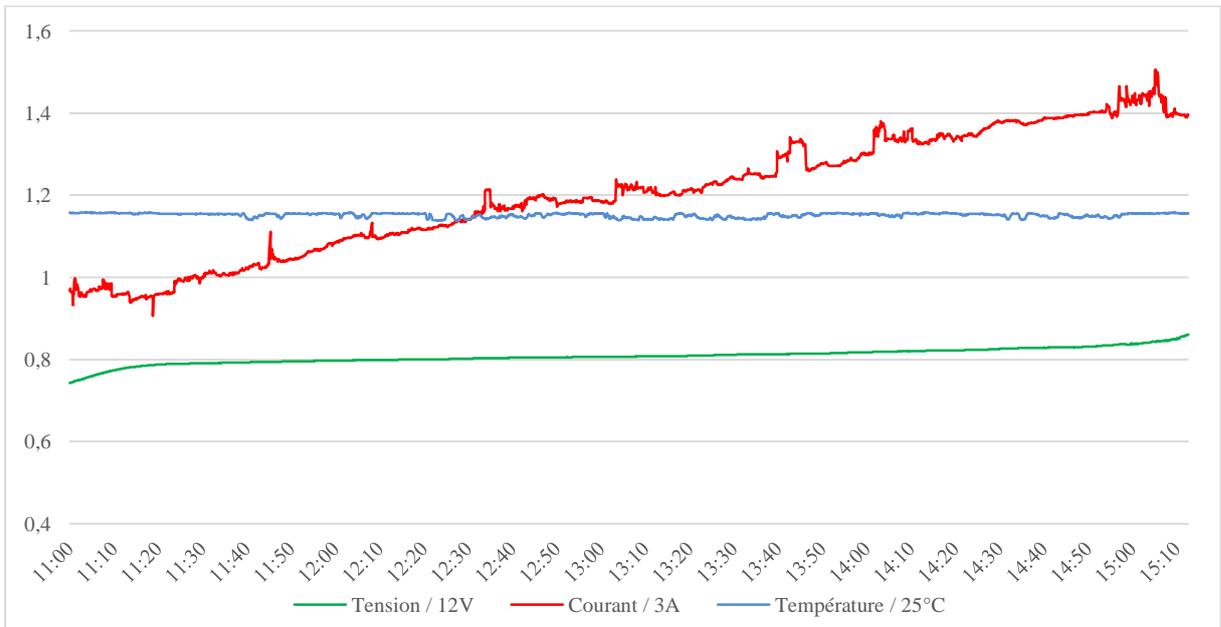
Au début, on fait des tests de charge avec la source de tension. On a réglé le courant de charge à 2 ampères initialement et on a lancé la mesure. Ce cycle de charge est représenté avec la figure suivante :



**Figure III- 18 :** Charge de la batterie directement à partir de la source de tension

Les différents tests nous ont permis de valider le bon fonctionnement de notre système, quand la tension de la batterie atteint la valeur 13.8 V, le système arrête la charge de la batterie.

En ce moment, on a préféré de tester notre système quand il est branché directement sur un panneau solaire photovoltaïque. Ce cycle de charge est représenté par la figure suivante :



**Figure III- 19 :** Charge de la batterie directement à partir du panneau solaire photovoltaïque

### CHAPITRE III : Réalisation pratique du régulateur de charge

Dans la figure précédente, nous avons normalisé les mesures par rapport à des valeurs de référence (PU : Per Unit) pour qu'on puisse les voir ensemble et les bien analyser ; la tension a été divisée sur 12 V, le courant sur 3 A et la température sur 25°C.

Sur cette figure, la température était presque stable comme on l'a mesuré directement au niveau de la carte électronique et à l'ombre (température à l'intérieur du laboratoire presque  $1.16 \text{ PU} \times 25^\circ\text{C} \approx 29^\circ\text{C}$ ). L'augmentation du courant de charge (de 3 A vers 4.5 A) est relative à l'augmentation de l'ensoleillement de la journée. Tandis que l'augmentation de la tension (de 9 V à 10.5 V) est relative à la charge de batterie ; dès que la batterie se charge, sa tension augmente.

Nous avons constaté que le courant de charge est fonction de l'ensoleillement, l'angle d'inclinaison du panneau et la température.

#### 5. Essai pratique du cycle de décharge :

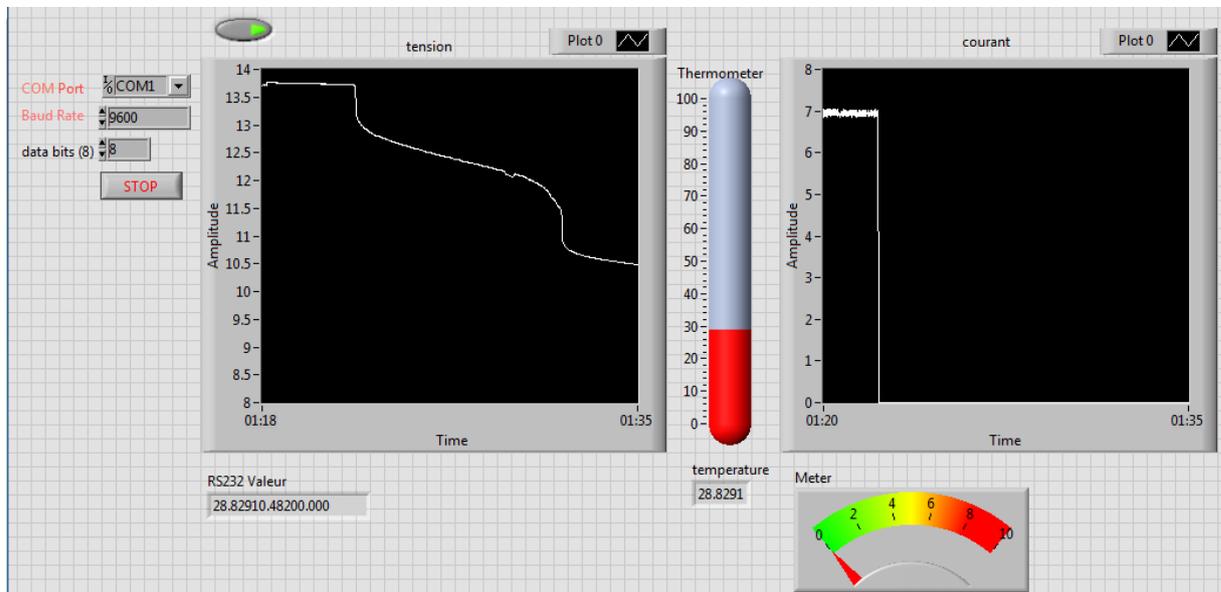


Figure III- 20 : Autodécharge d'une batterie veuille

De la même manière, après un cycle de charge complet (tension de la batterie environ 13.8 V), nous avons fait le test de l'autodécharge d'une batterie vieille. Nous voyons bien sur la figure précédente que cette batterie de 110 Ah a perdu pratiquement toute sa capacité comme elle s'est déchargé naturellement au bout de 10 minutes ; or que le phénomène d'autodécharge normalement il dure sur de très grandes périodes : des semaines voir des mois.

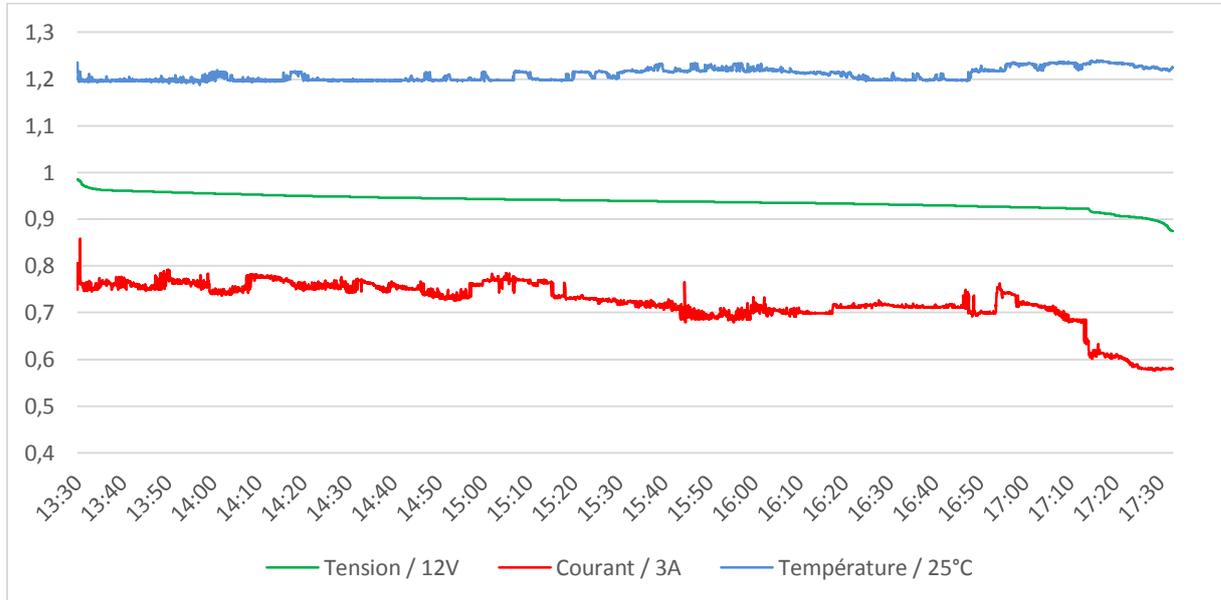
Le courant de charge était très important en fin de charge (presque 7 A sous une tension de 13.8 V). Comme la batterie s'est déchargé rapidement, on peut dire qu'il existe des courts-circuits à l'intérieur de la batterie. Ces courts-circuits augmentent de courant lors de la charge même en fin de cycle, et en même temps, ils déchargent la batterie rapidement.

Ceci indique la défaillance de cette batterie, c'est-à-dire qu'il y a une ou plusieurs chambres dans cette batterie qui ont perdu leurs performances et ne peuvent pas produire la tension nominale de 2.2 V. Parmi les différentes causes de dégradation des batteries, on pense

### CHAPITRE III : Réalisation pratique du régulateur de charge

que cette batterie a été perdue à cause du séchage ; les niveaux du liquide ont resté bas très longtemps.

On a remplacé la batterie avec une autre qui garde plus au moins ces performances. Avec cette batterie, on a testé un autre cycle de décharge sur une résistance de puissance. On a fixé initialement le courant de décharge à 2 A. Il nous a fallu attendre plusieurs heures pour décharger la batterie partiellement et avoir le résultat de la figure suivante :



**Figure III- 21** : Décharge d'une batterie via une résistance de puissance

D'après la figure précédente, la décharge s'est arrêté à 10.5 V selon le fonctionnement de notre régulateur. Comme cette décharge à prit du temps, on peut dire que cette batterie garde plus au moins ses performances.

## 6. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons cité les différentes étapes qui nous ont conduit à la réalisation d'un régulateur de charge des batteries acide-au-plomb. Ce régulateur assure le contrôle de l'état de charge et de décharge de la batterie à tout moment.

Ensuite nous avons pu établir une communication série RS232 entre notre carte de régulation et une interface LabVIEW sur l'ordinateur, afin de visualiser le fonctionnement du régulateur pour pouvoir comprendre ce qui se passe en permanence, et en même pour enregistrer les différents graphes des cycles charge/décharge.

D'autre modification et plus d'amélioration peuvent être apporté à notre carte de régulation. Tenant compte du temps et des moyens disponibles, on peut conclure que les résultats obtenus sont satisfaisants. De plus, une grande expérience acquise durant ce travail dans le côté pratique était totalement différente à ce que nous avons attendue. Cette expérience reste personnelle et n'est pas visible dans ce manuscrit qu'en prenant des photos de montages ou les résultats expérimentaux.

## ***CONCLUSION GENERALE***

Le travail présenté dans ce mémoire concerne la réalisation d'un régulateur de charge pour batterie acide-au-plomb connectée à un panneau solaire photovoltaïque.

Tout au long de ce projet, nous avons pour but de contrôler la charge d'une batterie connecter à un panneau solaire. Au fur et à mesure du projet, nous nous sommes rendu compte que la partie principale était le circuit électronique et sa mise en application. Ceci ne pouvait avoir lieu sans la connaissance du comportement de la batterie et du panneau solaire.

Ce projet nous a apporté de nombreuses connaissances personnelles, des compétences techniques et générales dans le domaine de l'énergie et de l'électronique, et ce fut un moyen de mieux appréhender l'importance de l'expérimentation.

De plus, travailler sur ce prototype unique nous a permis d'acquérir une première approche du travail de mise en conception d'un produit.

Finalement, nous avons pu faire l'association du panneau solaire, la batterie et le régulateur de charge. Il serait intéressant de comparer ce produit avec les produits existant sur le marché.

L'architecture électronique proposée dans ce régulateur reste ouverte est nous permis de l'exploiter dans pas mal de projets. Non seulement nous pouvons faire la régulation de charge, on peut ajouter sur la partie software l'option d'estimation de l'état de charge, l'option d'estimation de l'état de santé, l'option de régénération de la batterie, ...

## Bibliographie

- [1]. M.N. Mchaliq CH. Hmada'', M.N.M.e., *Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque en fonctionnement autonome et connecté au réseau*. 2013, Mémoire de Master Université Kasdi Merbah–Ouargla.
- [2]. BELHADJ, M. (Juin 2008). *Modélisation d'un système de captage photovoltaïque Autonome*. (Mémoire de Magister), Centre Universitaire de Bechar.
- [3]. Pascal. Pernet « Développement de cellules solaires en Silicium amorphie de type 'n.i.p' sur substrats souples » Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), Thèse n° :2303, 2000.
- [4]. *ETUDE DU DEVELOPPEMENT DE L'ENERGIE SOLAIRE EN RHONE-ALPES, Présentation de la filière photovoltaïque, Présentation de la filière solaire thermique, Cartographie de l'ensoleillement, Bilan des installations à fin 2009*.
- [5]. Vighetti, Stéphane. *Systèmes photovoltaïques raccordés au réseau : Choix et dimensionnement des étages de conversion*. Diss. Institut National Polytechnique de Grenoble-INPG, 2010.
- [6]. KAMELIA, H. (2012). *Modélisation d'une cellule photovoltaïque : étude comparative*. Université Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou.
- [7]. Nouar, A. O. U. N. *Etude et modélisation des différents modèles de la cellule photovoltaïque établis sur base de valeurs nominales*. Diss. Thèse de Magister, Université de Constantine. Algérie, 2010.
- [8]. Townsend, Timothy U. *A method for estimating the long-term performance of direct-coupled photovoltaic systems*. Diss. University of Wisconsin-Madison, 1989.
- [9]. BELARBI, MUSTAPHA. *Contribution à l'étude d'un générateur solaire pour site autonome*. Diss. University of sciences and technology in Oran, 2015.
- [10]. ADEME, *ÉTAT DE L'ART DES TECHNOLOGIES DE DESULFATATION DES ACCUMULATEURS AU PLOMB*. Août 2011.
- [11]. Zaamta, S., and A. Dib. "Réalisation d'un régulateur solaire à base de microcontrôleur pour le contrôle de l'état de charge et la protection des accumulateurs." *Revue des Energies Renouvelables* 12.1 (2009).
- [12]. Balogh, Laszlo. "Implementing multi-state charge algorithm with the UC3909 switchmode lead-acid battery charger controller." *Unitrode Application note, Literature number U-155* (1999).



## ملخص:

في عملنا هذا، نحن مهتمون في إجراء البحوث التكنولوجية على استخدام الطاقة الشمسية. في الواقع، حققنا نوع من نظام الطاقة الشمسية مستقل يتكون من وحدة الضوئية، وحدة تحكم، وبطارية تخزين وحمولة.

الدور الرئيسي لوحدة التحكم هو الرصد المستمر لحالة البطارية من أجل ضمان الحماية ضد التفريغ والشحن المفرطين. ويستند مبدأ عملها بناء على أمر من وحدة المتحكم الدقيق PIC16F877A. بالإضافة إلى ذلك، عرض حالة شحن البطارية وسلوكها باستخدام الاتصال التسلسلي RS232، بين وحدة التحكم وجهاز الكمبيوتر في واجهة البرنامج LabVIEW.

**الكلمات المفتاحية:** النظام الكهروضوئي، وحدة تحكم، المتحكمات الدقيقة PIC16F877A، RS232، LabView.

## Résumé :

Dans notre travail, nous nous sommes intéressés à mener une recherche technologique sur l'utilisation de l'énergie photovoltaïque. En effet, nous avons réalisé un système photovoltaïque de type autonome constitué d'un panneau photovoltaïque, d'un régulateur solaire, d'une batterie acide-au-plomb et une charge.

Le rôle principal du régulateur solaire est le contrôle continu de l'état de charge de la batterie afin d'assurer sa protection contre les surcharges et les décharges excessives. Son principe de fonctionnement est basé sur des commandes générés à partir d'un microcontrôleur PIC16F877A. De plus, faire une visualisation de l'état de charge de la batterie et son comportement à l'aide d'une communication série RS232 entre le régulateur de charge et une interface LabVIEW sur un ordinateur.

**Mot clés :** système photovoltaïque, régulateur, microcontrôleur PIC16F877A, RS232, LabView.