

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

UNIVERSITE MOULOUD MAMMARI DE TIZI-OUZOU



FACULTE DU GENIE ELECTRIQUE ET D' INFORMATIQUE
DEPARTEMENT D'ELECTROTECHNIQUE

Mémoire de Fin d'Etudes de MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Génie Electrique

Spécialité : **Machines électriques**

Présenté par

HEDJEM AHMED

ALLEK DJAMAL

Thème

réalisation d'un régulateur de charge solaire

Mémoire soutenu publiquement le 22 /09/ 2015 devant le jury composé de :

Mr Nacer Eddine BENAMROUCHE

Professeur, UMMTO, Président

Mr N. BENYAHYA

Maitre de conférence Classe B, UMMTO, Encadreur

Mr Hakim DENOUN

Maitre de conférence Classe A, UMMTO, Examineur

Mr Mustapha ZAOUIA

Maitre de conférence Classe A, UMMTO, Examineur

Mr Hakim DJOUDI

Maitre Assistant Classe A, UMMTO, Examineur

Remerciement

Ce travail a été réalisé au sein du laboratoire de recherche LATAGE de la faculté de Génie Électrique et d'Informatique de l'Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou.

Louange à Allah le tout puissant de nous avoir donné le courage, la force et la volonté pour réaliser ce travail.

Nos chaleureux remerciement à notre promoteur Mr N.BENYAHYA pour sa confiance, sa disponibilité, sa patience et son aide tout le long de notre travail.

Nos Vifs remerciement à notre Co-promoteur Mr H.DENOUN qui nous à corrigé le mémoire, pour son aide et ses conseils.

Nos remerciements également à Mr N.BENAMROUCHE pour avoir accepter d'être président de jury de notre soutenance.

Nos vives remerciement vont également à tous les membres de jury acceptés d'examiner notre travail, Mr M.ZAOUIA et Mr H.DJOUADI.

A l'ensemble des enseignants du département d'électrotechnique.

Sans oublier ceux qui ont contribuer de prés ou de loin à la réalisation de ce travail.

Ahmed et Djamel

Dédicaces

*Pour que ma réussite soit complète, je la partage avec
toutes les personnes que j'aime.*

Je dédie ce modeste travail à :

*Mes très chers parents pour leurs amour et pour le
courage et la volonté qu'ils m'ont inculqué.*

A mes très chers sœurs et frères.

A tous mes amis et collègues.

D.ALLEK

Dédicaces

*Pour que ma réussite soit complète, je la partage avec
toutes les personnes que j'aime.*

Je dédie ce modeste travail à :

*Mes très chers parents pour leurs amour et pour le
courage et la volonté qu'ils m'ont inculqué.*

A mes très chers sœurs et frères.

A tous mes amis et collègues.

A.HEDJEM

LISTE DES FIGURES

| N° | Nom de la figure | Page |
|--|--|-----------|
| Chapitre I :Généralités sur les systèmes photovoltaïques | | |
| Fig. (I-1) | Système photovoltaïque autonome | 4 |
| Fig. (I-2) | Spectre du rayonnement solaire | 5 |
| Fig. (I-3) | Composants du rayonnement solaire : extraterrestre globale | 6 |
| Fig. (I-4) | Exemple de la structure d'un système PV autonome | 7 |
| Fig. (I-5) | Exemple de la structure d'un système PV connecté au réseau | 7 |
| Fig. (I-6) | Dopage de type N et de type P d'un semi-conducteur (Si) | 9 |
| Fig. (I-7) | d'une cellule photovoltaïque utilisant le silicium comme matériau PV (présence d'une jonction PN) | 11 |
| Fig. (I-8) | Cellule en silicium monocristallin | 11 |
| Fig. (I-9) | Cellule en silicium polycristallin | 12 |
| Fig. (I-10) | silicium amorphe | 12 |
| Fig. (I-11) | Schéma équivalent d'une cellule PV Modèle à une diode | 13 |
| Fig. (I-12) | Schéma équivalent d'une cellule PV Modèle à deux diodes | 15 |
| Fig. (I-13) | Puissance maximale idéale et pratique | 16 |
| Fig. (I-14) | Caractéristique résultante d'un groupement en série de n_s cellules identiques | 18 |
| Fig. (I-15) | Caractéristique résultante d'un groupement en parallèle de n_p cellules identiques | 18 |
| Fig. (I-16) | Caractéristique résultante d'un groupement hybride de $(n_p + n_s)$ cellules identiques | 19 |
| Fig. (I-17) | Caractéristique courant-tension (I-V) d'une cellule solaire | 20 |
| Fig. (I-18) | caractéristique P(V) d'une cellule solaire $T=25^\circ\text{C}$ et $G=1000\text{W/m}^2$ | 20 |
| Fig. (I-19) | Effet de l'ensoleillement sur la caractéristique du module I-V à $T=25^\circ\text{C}$ | 21 |
| Fig. (I-20) | Effet de la température sur la caractéristique du module I-V à un ensoleillement constant (1000W/m^2) | 21 |
| Fig. (I-22) | Composants d'un champ de modules PV | 22 |
| Chapitre II :Les dispositifs de stockage de l'énergie électrique | | |
| Fig. (II-1) | Durée de vie et rendement des différentes technologies de batteries | 28 |
| Fig. (II-2) | Construction d'une batterie monobloc | 29 |
| Fig. (II-3) | Allure de la décharge d'un élément d'une batterie au plomb | 31 |
| Fig. (II-4) | Allure de la charge d'un élément de batterie au plomb | 32 |
| Fig. (II-5) | Accumulateur lithium | 33 |
| Fig. (II-6) | Connections des batteries | 34 |
| Chapitre II : Conception et réalisation d'un régulateur de charge | | |
| Fig. (III-1) | Conception d'un régulateur shunt | 37 |
| Fig. (III-2) | Schéma fonctionnel du régulateur shunt | 38 |
| Fig. (III-3) | Conception d'un régulateur série | 38 |
| Fig. (III-4) | Les seuils de la charge et de la décharge de la batterie | 39 |
| Fig. (III-5) | Schéma synoptique de la maquette réalisé | 40 |
| Fig. (III-6) | Schéma du régulateur de charge à base de pic 16F877A sous Proteus | 40 |
| Fig. (III-7) | Brochage du PIC 16F877A | 42 |
| Fig. (III-8) | Architecture interne du PIC 16f877A | 43 |
| Fig. (III-9) | Schéma synoptique du convertisseur Analogique numérique. | 45 |
| Fig. (III-10) | Relais électromécanique | 46 |

| | | |
|----------------------|----------------------------------|-----------|
| Fig. (III-11) | Afficheur LCD | 46 |
| Fig. (III-12) | Caractéristiques d'une Led | 47 |
| Fig. (III-13) | Organigramme du fonctionnement | 48 |
| Fig. (III-14) | Implantation des composants | 49 |
| Fig. (III-15) | Cas ou la batterie est chargée | 51 |
| Fig. (III-16) | Cas ou la batterie est déchargée | 51 |
| Fig. (III-17) | Banc d'essai | 52 |

Nomenclature

AM0 : Air Masse 0

AM1: Air Masse 1

C : vitesse de la lumière [ms^{-1}]

Ds : diamètre du soleil [m]

Dt : diamètre de la terre [m]

E : énergie [Joule]

Eg : énergie du Gap

FF : facteur de forme

H : constante de Planck [JS^{-1}]

I : Intensité débitée par la cellule PV [A]

Icc : courant de court circuit [A]

Iph : le photon courant [A]

Is : courant de saturation [A]

K : constante de Boltzmann ($1.381 \times 10^{-23} \text{J/k}$)

Lts : distance moyenne terre-soleil [m]

MPPT : maximum power point tracking

MPP : maximum power point

N: facteur de non idéalité de la jonction PN

Nja : nombre de jours de fonctionnement

Ns : nombre de cellules en série

Np : nombre de cellule en parallèle

P : puissance fournie par une cellule photovoltaïque [W]

PIC : programmable interface controller

Pmax : puissance maximale fournie par un module PV [W]

PWM : modulation par largeur d'impulsion

Q : charge de l'électron ($1.602 \times 10^{-19} \text{C}$)

RISC : reduced instruction set computer

Rs : résistance en série [Ω]

Rp : résistance en parallèle [Ω]

Si : silicium

STC : condition de fonctionnement standard

V: tension de la cellule [V]

Vco : tension a circuit ouvert [V]

Vary : tension d'un module [V]

Vbat : tension de la batterie [V]

Vt : tension de régulation [V]

Table des matières

| | |
|--|----|
| Introduction générale | 1 |
| Chapitre I : généralités sur les systèmes photovoltaïques | |
| Introduction | 4 |
| I Généralité sur le soleil..... | 4 |
| I.1 Rayonnement solaire | 4 |
| I.1.1 Spectre du rayonnement:..... | 5 |
| I.1.2 Différents types de rayonnement | 6 |
| I.2 Les systèmes photovoltaïques | 6 |
| I.2.1 L'isolé..... | 7 |
| I.2.2 Le connecté au réseau | 7 |
| I.3 Le générateur photovoltaïque (PV) | 8 |
| I.3.1 Les semi-conducteurs | 8 |
| I.3.2 La jonction P-N | 8 |
| I.4 Les cellules photovoltaïques: | 9 |
| I.4.1 Historique..... | 9 |
| I.4.2 Principe de fonctionnement..... | 10 |
| I.4.3 Les différents types des cellules photovoltaïques..... | 11 |
| I.5 Modèle électrique d'un générateur photovoltaïque | 13 |
| I.5.1 Modèle à une diode :..... | 13 |
| I.5.2 Modèle à deux diodes | 15 |
| I.5.3 Puissance d'une cellule photovoltaïque :..... | 16 |
| I.5.4 Puissance maximale d'une cellule PV | 16 |
| I.5.5 Rendement d'une cellule | 17 |
| Le facteur de remplissage | 17 |
| I.6 Association des cellules photovoltaïques..... | 17 |
| I.6.1 Association en série | 17 |
| I.6.2 Association en parallèle | 18 |
| I.6.3 Association hybride (en série et en parallèle)..... | 18 |
| I.7 Caractéristiques Courant-Tension | 19 |
| I.7.1 Effet de l'ensoleillement sur la caractéristiques I-V..... | 21 |
| I.7.2 Effet de température Sur la Caractéristique I-V | 21 |
| I.8 Le panneau solaire..... | 22 |
| I.9 Avantages et inconvénients d'une installation photovoltaïque | 22 |
| I.9.1 Avantages..... | 22 |
| I.9.2 Inconvénients | 23 |

| | |
|---|----|
| Conclusion..... | 24 |
| Chapitre II : Les systèmes de stockage de l'énergie électrique | |
| Introduction..... | 24 |
| II. Stockage de l'énergie | 24 |
| II.1 Autonomie (sans apport solaire)..... | 25 |
| II.2 Principe du couplage photo-générateur batterie | 25 |
| II.2.1 Montage de plusieurs accumulateurs sur le même système | 26 |
| II.2.2 Les différentes Caractéristiques principales d'une batterie :..... | 26 |
| II.3 Technologies et Types d'accumulateurs | 27 |
| II.3.1 Les Accumulateurs au plomb acide | 28 |
| II.3.2 Les Accumulateurs au Nickel- cadmium [15] | 32 |
| II.3.3 Les batteries au lithium | 33 |
| II.4 Connexion d'une batterie | 33 |
| II.5 Sécurité et bon fonctionnement des batteries | 34 |
| Conclusion..... | 34 |
| Chapitre III : Conception et réalisation d'un régulateur de charge solaire | |
| Introduction..... | 36 |
| III. Définition d'un régulateur | 36 |
| III.1 Différents types de régulateurs..... | 37 |
| III.1.1 Régulateur shunt | 37 |
| III.1.2 Régulateur type série..... | 38 |
| III.2 Régulateurs de charge à base d'un micro contrôleur (Pic 16F877A) | 39 |
| III.2.1 Les seuils de charge et de décharge de la batterie..... | 39 |
| III.2.2 Description générale de la maquette realisee..... | 40 |
| III.2.3 Présentation du microcontrôleur (Pic 16f877A)..... | 41 |
| III.2.4 Définition d'un pic..... | 41 |
| III.2.5 Brochage du Pic 16f877A sous forme de boitier PDIP | 42 |
| III.2.6 Les principales caractéristiques du PIC 16F877A | 42 |
| III.2.7 Architecture interne du PIC 16F877A | 43 |
| III.2.8 Les éléments de base du PIC 16F877A..... | 43 |
| III.2.9 L'organigramme de programme | 48 |
| III.2.10 Principe de fonctionnement : | 48 |
| III.2.11 Réalisation de la carte | 48 |
| III.3 Programmation de pic 16F877A : | 50 |
| III.4 Présentation de compilateur Micro c pro : | 50 |
| Conclusion..... | 53 |
| Conclusion générale | 54 |

Introduction Générale

Introduction générale

L'énergie électrique est un facteur essentiel de l'évolution et de développement des sociétés sur le plan de l'amélioration des conditions de vie, et sur le plan de développement des secteurs industriels. Elle est devenue indispensable par la multiplicité des domaines d'activité où elle est demandée. Donc, elle doit être produite, transportée, et distribuée d'une façon permanente.

Selon « *The Office of Technology Assessment* » du Congrès Américain, les réserves mondiales connues de pétrole seront épuisées en 2037 (même si d'autres prétendent que le pétrole durera 60 ans, le gaz 1 20 ans, le problème reste inchangé), et parallèlement, la forte croissance de la population prévue dans les années à venir qui devraient encore augmenter les besoins en électricité et le souci de pollution, toutes ces perspectives ont encouragé le grand public à s'orienter vers les énergies renouvelables qui englobent entre autres l'énergie éolienne, l'énergie solaire et la biomasse[1].

L'énergie solaire est une source d'énergie inépuisable et propre car elle ne provoque pas d'émissions de gaz nocifs pour notre environnement. Elle se propage dans l'espace sous forme des photons, donc, elle est disponible partout et sans cesse renouvelable.

Les pays du tiers monde, particulièrement les zones rurales de certains d'entre eux et qui rencontrent des problèmes de maintenance, de manque de combustible et de pièces de rechange, verront dans le procédé photovoltaïque une possibilité de développement efficace.

L'Algérie, de par sa situation géographique, bénéficie des conditions favorables à l'utilisation des énergies renouvelables, en particulier l'énergie solaire, l'une des possibilités de l'exploitation de l'énergie solaire est sa transformation directe en une énergie électrique, au moyen des convertisseurs photovoltaïques [1].

L'intensité de l'énergie solaire reçue par la terre est variable et très souvent les besoins en électricité ne correspondent pas aux heures d'ensoleillement. Conséquemment, il est nécessaire d'équiper le système par des batteries d'accumulateurs qui permettent de stocker l'électricité et de la restituer en temps voulu. Or, dans une installation photovoltaïque autonome, les recherches ont montré que le couplage direct d'un générateur photovoltaïque et d'une batterie est le plus simple à réaliser, mais il ne peut pas offrir de bonnes performances vu que la batterie est un élément très fragile, elle ne doit pas être trop chargée ou trop déchargée, cela aura comme conséquence son vieillissement très rapide.

Pour assurer la meilleure autonomie du système photovoltaïque avec une batterie, la régulation de la charge et de la décharge de celle-ci est alors indispensable. Pour cela, il faut intercaler dans le système un "régulateur solaire", dont le rôle est de garder la batterie saine. Ces raisons, poussent les chercheurs et les scientifiques à développer, à améliorer et à optimiser l'exploitation des systèmes photovoltaïques. Généralement, les travaux effectués sont axés et orientés vers l'optimisation de la puissance du système photovoltaïque:

- Par l'orientation du panneau photovoltaïque.
- Par la recherche du point de la puissance maximale [MPPT].
- Par la régulation de la charge et de la décharge de la batterie en introduisant un régulateur solaire dans le système, qui est l'objectif du travail proposé.

L'évolution continue de l'électronique de commande, à ouvert de nouveaux horizons afin de concevoir de nouveaux schémas plus sophistiqués et moins encombrants. En effet l'emploi de microcontrôleurs programmables comme cerveau du régulateur s'impose vu leur fiabilité, leur faible encombrement, et leur capacité d'être flashés facilement et rapidement pour mettre à jour le programme.

L'objectif assigné à 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 au plomb acide afin d'augmenter sa durée vie. Cela est équivalent à une exploitation à moindre coût de l'énergie solaire en garantissant une plus grande fiabilité du système.

Le système à étudier est constitué d'un module photovoltaïque qui peut délivrer une puissance continue de crête de 80W, d'une batterie Plomb Acide d'une capacité de 150 A/h et d'un microcontrôleur PIC16F877A.

La réalisation expérimentale a été effectuée au Laboratoire des technologies avancées de génie électrique de l'université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou.

Présentation du mémoire

Le présent travail est constitué de trois chapitres et d'une introduction générale qui donne une perspective générale du but envisagé :

- Le premier chapitre est consacré à un rappel sur les notions de base des systèmes photovoltaïques : principe de la conversion photovoltaïque, et l'influence des différents paramètres : éclairage et température ...ext
- Dans le deuxième chapitre, nous avons étudié les différentes caractéristiques et performance des systèmes de stockage de l'énergie utilisés dans les centrales photovoltaïques.

- Le dernier chapitre est consacré à la conception, à la réalisation du régulateur de charge à base du pic 16F877A.
- Dans la conclusion générale, nous présentons un résumé de l'objectif du projet, les difficultés rencontrées lors du dimensionnement et la réalisation du dispositif expérimental.

Nous terminons par des idées et suggestions pour les travaux futurs. On retrouve par la suite dans l'annexe des fiches techniques des différents composants utilisés dans notre prototype.

CHAPITRE

1

**Généralités sur les
systèmes photovoltaïques**

Introduction

On distingue plusieurs types de sources d'énergies renouvelables: l'énergie hydroélectrique, l'énergie géothermique, l'énergie éolienne, l'énergie de la biomasse et l'énergie photovoltaïque. Excepté l'énergie géothermique qui provient de la chaleur des profondeurs de la terre, ces sources d'énergie proviennent directement ou indirectement du soleil. Elles sont donc disponibles indéfiniment tant que celui-ci brillera.

L'énergie photovoltaïque est la plus jeune des énergies renouvelables, elle a l'avantage d'être non polluante, souple et fiable. Dans ce chapitre nous décrivons la conception d'un système photovoltaïque « stand-alone » et le principe de fonctionnement de chaque élément le constituant.

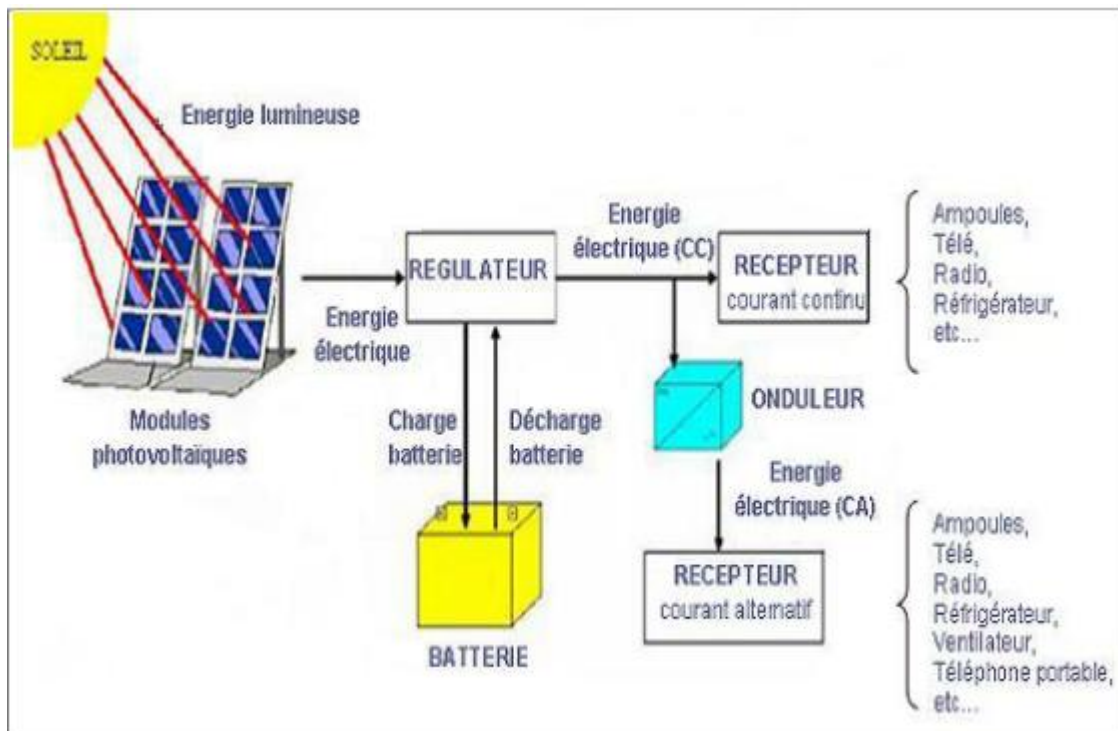


Fig. (I -1) : Système photovoltaïque autonome [1].

I Généralité sur le soleil

I.1 Rayonnement solaire

Le soleil est une étoile parmi tant d'autres. Il a un diamètre de 1390000 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 depuis que Langevin et Perrin, s'appuyant sur la théorie de la relativité d'Einstein, ont émis l'idée il y a une soixantaine d'années 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 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 300000km/s, met environ 8 minutes pour parvenir à la terre, sa distribution spectrale de l'atmosphère est présentée un maximum pour une longueur d'onde d'environ 0.5 μ m, la température de corps noir à la surface du soleil est d'environ 5780°k:

- Diamètre de soleil $D_s = 1.39 \cdot 10^9$ m
- Diamètre de la terre $D_t = 1.27 \cdot 10^{11}$ m
- Distance moyenne soleil- terre $L_{ts} = 1.5 \cdot 10^7$ m

I.1.1 Spectre du rayonnement:

Le rayonnement électromagnétique est composé de «grains» de lumière appelés photons. L'énergie de chaque photon est directement liée à la longueur d'onde. L'énergie de chaque photon est donnée par la formule suivante:

$$E = h\nu = hc/\lambda \quad (\text{I.1})$$

Avec :

$$h = 6,62 \cdot 10^{-34} \text{ JS}^{-1} \text{ est la constante de Planck.} \quad (\text{I.2})$$

$$C = 3 \cdot 10^8 \text{ ms}^{-1} \text{ étant la vitesse de propagation.} \quad (\text{I.3})$$

Le spectre du rayonnement extraterrestre correspond environ à l'émission d'un corps noir porté à 5800° K. Une courbe standard, compilée selon les données recueillies par les satellites, est désignée sous le nom de AM0. Sa distribution en énergie est répartie en :

- Ultraviolet UV $0.20 < \lambda < 0.38$ mm 6.4%
- Visible $0.38 < \lambda < 0.78$ mm 48.0%
- Infrarouge IR $0.78 < \lambda < 10$ mm 45.6%

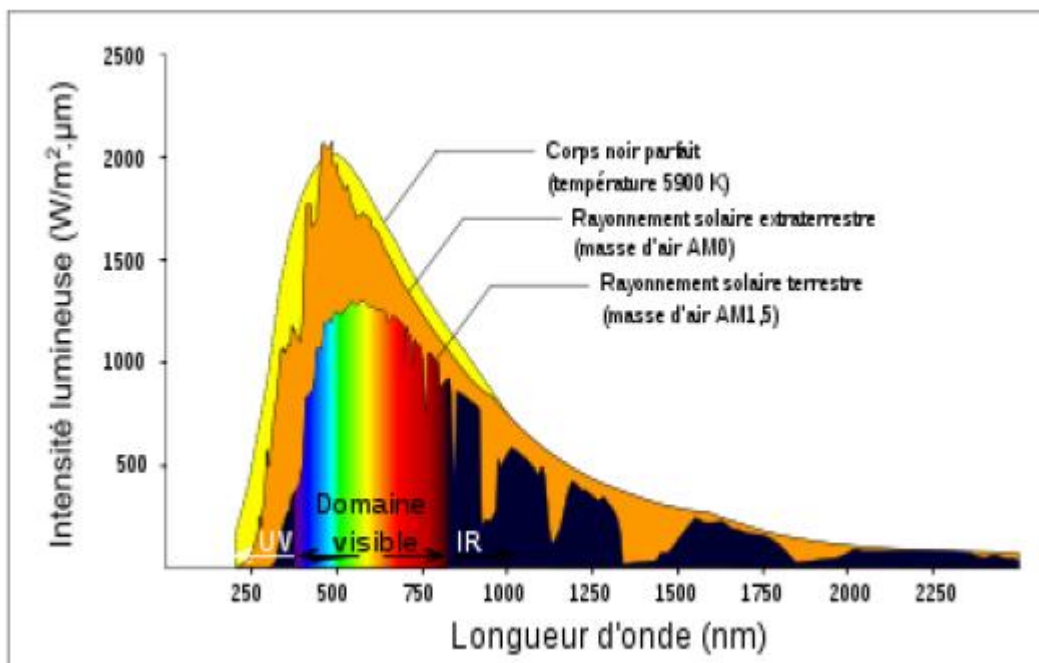


Fig. (I -2) : Spectre du rayonnement solaire [2].

I.1.2 Différents types de rayonnement

En traversant l'atmosphère, le rayonnement solaire est absorbé et diffusé. Au sol, on distingue plusieurs composantes :

I.1.2.1 Le rayonnement direct

est reçu directement du soleil, sans diffusion par l'atmosphère. Ses rayons sont parallèles entre eux, il forme donc des ombres et peut être concentré par des miroirs.

I.1.2.2 Le rayonnement diffus

est constitué des photons diffusés par l'atmosphère (air, nébulosité, aérosols). Sa structure varie avec les conditions météorologiques. Par temps couvert, on admet qu'il est isotrope, c'est-à-dire qu'on reçoit un rayonnement identique de toutes les directions de la voûte céleste. Par temps clair ou voilé, outre le ciel bleu relativement isotrope (diffusion sur l'air), on a une couronne plus brillante autour du soleil (composante appelée circumpolaire) et souvent un renforcement sur l'horizon, la bande horizon.

I.1.2.3 L'albédo

est la partie réfléchiée par le sol. Il dépend de l'environnement du site, il faudra en tenir compte pour évaluer le rayonnement sur plans inclinés.

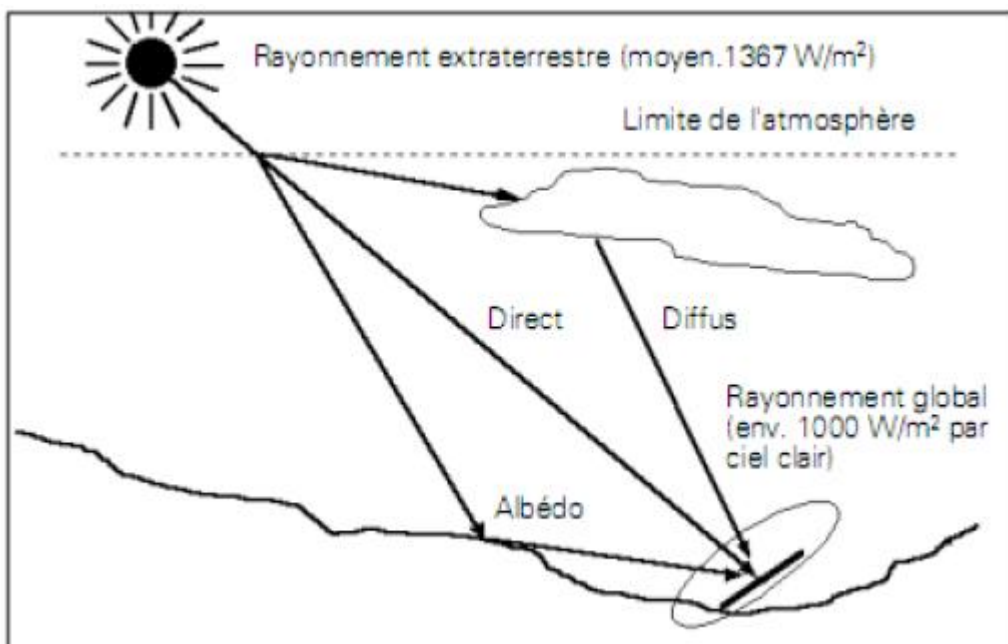


Fig. (I -3) : Composants du rayonnement solaire : extraterrestre, globale=direct+diffus +albédo[3].

I.2 Les systèmes photovoltaïques

Les systèmes PV sont classés en deux grandes catégories selon la manière dont l'énergie est utilisée:

- Systèmes isolés et autonomes.
- Systèmes raccordés au réseau.

I.2.1 L'isolé

Le rôle des systèmes autonomes est d'alimenter un ou plusieurs consommateurs qui se situent dans une zone isolée du réseau électrique. Comme on le remarque sur la Figure (I.4) qui représente l'exemple d'un système PV autonome, un système de stockage est associé aux générateurs PV pour assurer l'alimentation à chaque instant et pendant plusieurs jours malgré l'intermittence de la production.

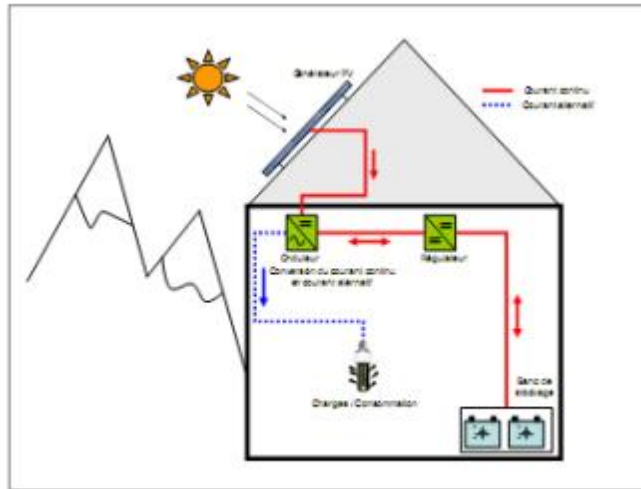


Fig. (I-4): Exemple de la structure d'un système PV autonome [4].

I.2.2 Le connecté au réseau

La Figure (I.5) représente un système PV connecté au réseau électrique, dont le rôle principal est de contribuer à la production d'électricité d'origine renouvelable sur le réseau. D'un point de vue de la physique, l'énergie produite par les modules est directement consommée par les Charges locales de l'habitat. L'éventuel surplus de production par rapport à la consommation Instantanée est injecté sur le réseau. Le réseau est utilisé en appoint à la production PV.

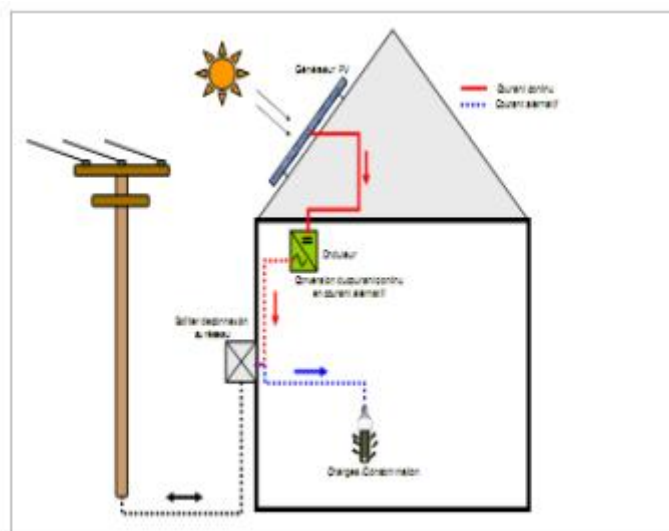


Fig. (I-5) : Exemple de la structure d'un système PV connecté au réseau [4].

I.3 Le générateur photovoltaïque (PV)

I.3.1 Les semi-conducteurs

Les semi-conducteurs sont des matériaux dont la conductivité est intermédiaire entre celle des conducteurs et celle des isolants. Cette conductivité des semi-conducteurs, à la différence de celle des conducteurs et des isolants, dépend fortement de sa pureté, des irrégularités de sa structure, de la température et d'autres quantités physiques et chimiques. Cette propriété représente leur avantage principal puisqu'elle permet la construction de la plupart des composants électroniques ayant des caractéristiques très diversifiées. A la température de **0 K (-273°C)** chaque atome de la grille cristalline est attaché à quatre atomes voisins par la mise en commun de leurs électrons périphériques (liaisons covalentes), assurant la cohésion du cristal, les électrons qui participent à ces liaisons sont fortement liés aux atomes de silicium, aucune charge mobile susceptible d'assurer la circulation d'un courant électrique n'existe. La conductivité du silicium est alors très faible. Cependant l'élévation de la température permet la libération dans la structure, de certains électrons périphériques, par apport d'énergie. De plus, la libération d'un électron provoque l'apparition d'un trou dans la structure cristalline, soit la création d'une paire électron-trou. Par exemple, à la température de **300 K (27°C)**, il y a **$1.45 \cdot 10^{10}$** paires électron-trou dans un centimètre cube de silicium. Ce phénomène est à l'origine de l'augmentation de la conductivité du semi-conducteur.

I.3.2 La jonction P-N

La jonction P-N est un dispositif semi-conducteur constitué d'un cristal dont une partie a été dopée N et l'autre dopée P, les deux parties étant séparées par un plan dit de jonction. Examinons le fonctionnement d'un tel dispositif. Imaginons que l'on sépare la jonction en deux parties et qu'on relie la région N au pôle négatif d'un générateur et la région P au pôle positif (polarisation directe). Les électrons libres de la région N, ainsi que les trous libres de la région P, vont vers la jonction, vu le sens de polarisation.

Si les deux parties sont en contact, un courant passe. Les électrons sont injectés dans la région P et les trous dans la région N. On dit qu'il y a injection de porteurs minoritaires. Si l'on polarise la jonction en sens inverse. Les électrons allant vers le pôle (+) et les trous vers le pôle (-), ils s'éloignent de la jonction, laissant au voisinage de celle-ci des charges dues aux impuretés ionisées. Mais ces impuretés sont des atomes rigidement liés au réseau cristallin, qui ne peuvent se déplacer. Si l'on met les deux parties en contact, on a au voisinage une région isolante, et la résistance du dispositif en polarisation inverse sera donc très élevée. La jonction N-P joue donc le rôle d'un redresseur laissant passer le courant électrique en polarisation directe et présentant une très forte résistance en polarisation inverse. Si la polarisation est directe, il y a injection de porteurs minoritaires, par exemple des électrons dans la région P ; ces électrons ont tendance à se recombiner avec les trous présents en grand nombre dans cette région P ; ils le font au bout d'un temps t appelé durée de vie des porteurs minoritaires.

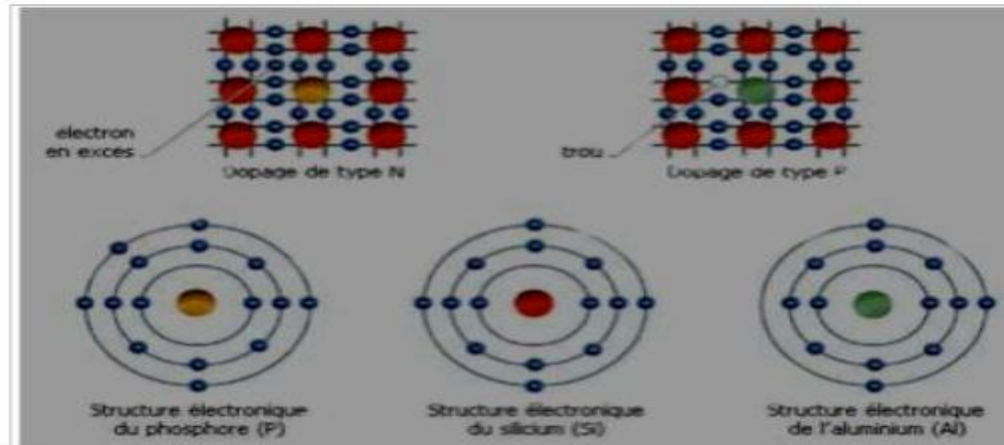


Fig. (I -6): Dopage de type N et de type P d'un semi-conducteur (Si) [5].

I.4 Les cellules photovoltaïques:

I.4.1 Historique

Quelques dates importantes dans l'histoire du photovoltaïque :

- 1839 : Le physicien français Edmond Becquerel découvre le processus de l'utilisation de l'ensoleillement pour produire du courant électrique dans un matériau solide. C'est l'effet photovoltaïque.
- 1875 : Werner Von Siemens expose devant l'Académie des Sciences de Berlin un article sur l'effet photovoltaïque dans les semi-conducteurs. Mais jusqu'à la seconde guerre mondiale, le phénomène reste encore une curiosité de laboratoire.
- 1954 : Trois chercheurs américains, Chapin, Pearson et Prince, mettent au point une cellule photovoltaïque à haut rendement au moment où l'industrie spatiale naissante cherche des solutions nouvelles pour alimenter ses satellites.
- 1958 : Une cellule avec un rendement de 9 % est mise au point. Les premiers satellites alimentés par des cellules solaires sont envoyés dans l'espace.
- 1973 : La première maison alimentée par des cellules photovoltaïques est construite à l'Université de Delaware.
- 1983 : La première voiture alimentée par énergie photovoltaïque parcourt une distance de 4000 km en Australie.

La première cellule photovoltaïque (ou photopile) a été développée aux Etats-Unis en 1954 par les chercheurs des laboratoires Bell, qui ont découvert que la photosensibilité du silicium pouvait être augmentée en ajoutant des "impuretés". C'est une technique appelée le "dopage" qui est utilisée pour tous les semi-conducteurs. Mais en dépit de l'intérêt des scientifiques au cours des années, ce n'est que lors de la course vers l'espace que les

cellules ont quitté les laboratoires. En effet, les photopiles représentent la solution idéale pour satisfaire les besoins en électricité à bord des satellites, ainsi que dans tout site isolé.

I.4.2 Principe de fonctionnement

L'effet photovoltaïque utilisé dans les cellules solaires permet de convertir directement l'énergie lumineuse des rayons solaires en électricité par le biais de la production et du transport dans un matériau semi-conducteur de charges électriques positives et négatives sous l'effet de la lumière. Ce matériau comporte deux parties, l'une présentant un excès d'électrons et l'autre un déficit en électrons, dites respectivement dopée de type N et dopée de type P. Lorsque la première est mise en contact avec la seconde, les électrons en excès dans le matériau N diffusent dans le matériau P. La zone initialement dopée N devient chargée positivement et la zone initialement dopée P chargée négativement. Il se crée donc entre elles un champ électrique qui tend à repousser les électrons dans la zone N et les trous vers la zone P. Entre les deux zones se développe une jonction PN avec une barrière de potentiel. Lorsque ce matériau est exposé à la lumière du soleil, les atomes exposés au rayonnement sont "bombardés" par les photons constituant la lumière ; sous l'action de ce bombardement, les électrons des couches électroniques supérieures (appelés électrons des couches de valence) ont tendance à être "arrachés/décrochés". Mais une partie de ces électrons ne revient pas à son état initial. Les électrons "décrochés" créent une tension électrique continue faible. Une partie de l'énergie cinétique des photons est ainsi directement transformée en énergie électrique : C'est l'effet photovoltaïque. La zone N est couverte par une grille métallique qui sert de cathode (contact avant) et surtout de collecteurs d'électrons, tandis qu'une plaque métallique (contact arrière) recouvre l'autre face du cristal et joue le rôle d'anode. **La figure (I.7)** illustre la constitution d'une cellule photovoltaïque en silicium. Lorsque les photons sont absorbés par le semi-conducteur, ils transmettent leur énergie aux électrons par collision. Si l'énergie transmise est supérieure à celle associée à la bande interdite (E_g) du semi-conducteur, des paires électrons-trous sont alors créés dans cette zone de déplétion par arrachement des électrons. Sous l'effet d'un champ électrique E qui règne dans cette zone, ces porteurs libres sont drainés vers les contacts métalliques des régions P et N. Il en résulte alors un courant électrique dans la cellule PV et une différence de potentiel (de 0.6 à 0.8 Volt) supportée entre les électrodes métalliques de la cellule, communément nommée tension de circuit ouvert (V_{co}) fortement dépendante de la température. Le courant maximal PV se produit lorsque les bornes de la cellule sont court-circuitées. On

parle alors de courant de court-circuit (I_{cc}) dépendant fortement du niveau d'éclairement.

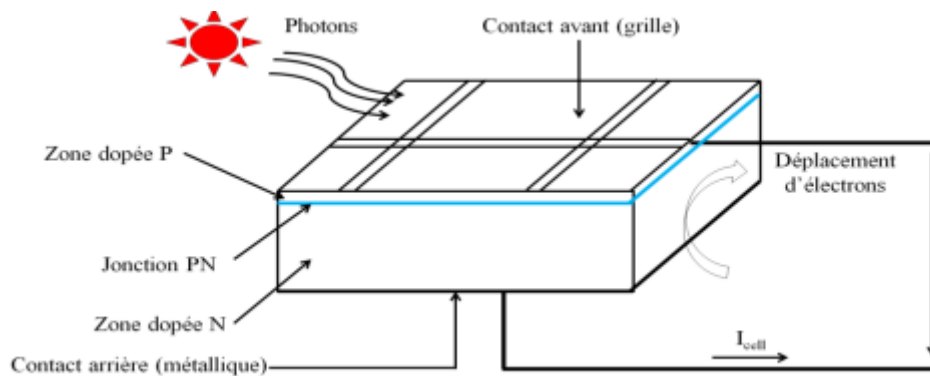


Fig. (I -7): Structure d'une cellule photovoltaïque utilisant le silicium comme matériau PV (présence d'une jonction PN) [6].

I.4.3 Les différents types des cellules photovoltaïques

Il existe trois types principaux des cellules :

I.4.3.1 Silicium monocristallin

Matériau le plus répandu, présentant un bon rendement à fort et moyen éclairement, il est à la base des panneaux «terrestres» les plus performants après ceux à l'arséniure de gallium.

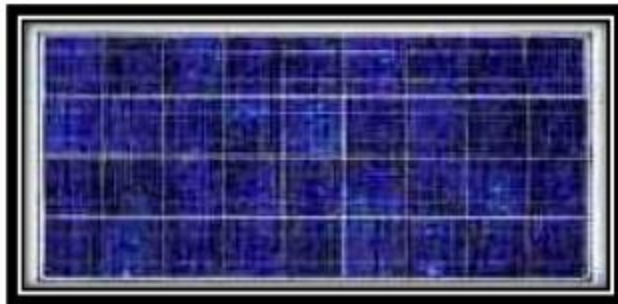


Fig. (I -8) : Cellule en silicium monocristallin [7].

Avantages

- Rendement électrique des panneaux : 15 % STC.
- Puissance des panneaux : 5 à 150 Wc
- Gamme d'éclairement : 100 à 1000 W/m².
- Usage : tous usages en extérieur de forte et moyenne puissance (télécoms, balisage, relais, habitat...).

Ces cellules souffrent néanmoins des inconvénients :

- Méthode de production laborieuse et difficile, et donc, très chère.
- Il faut une grande quantité d'énergie pour obtenir un cristal pur.

I.4.3.2 Silicium poly (ou multi -) cristallin

Cousin germain du précédent (composés de multicristaux), il est un peu moins performant, essentiellement aux éclairagements modérés, et également moins onéreux.

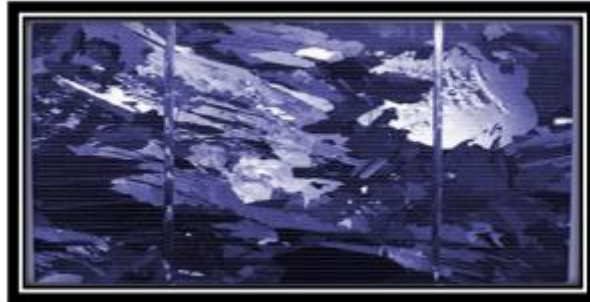


Fig. (I -9):Cellule en silicium polycristallin[7].

Avantages

- Rendement électrique des panneaux : 12-14 % STC.
- Puissance des panneaux : 5 à 150 W c .
- Gamme d'éclairément : 200 à 1000 W/m² .
- Rendement faible sous un faible éclairément.

I.4.3.3 Silicium amorphe

Nettement moins puissant au soleil que les deux précédents, ce silicium en couche très mince répond par contre à tous les éclairagements, extérieur et intérieur. Sa technologie de fabrication est théoriquement moins onéreuse (mais la production n'a pas atteint des niveaux comparables) et permet de réaliser des petits formats, grâce à la mise en série intégrée et la simplicité de découpe.



Fig. (I -10):Cellule silicium amorphe [7].

- Rendement électrique des panneaux : 5-7 % STC (jusqu'à 9 % pour les «multi

jonctions »).

- Puissance des photopiles intérieures : 0 à 1 Wc.
- Puissance des panneaux extérieurs : 0,5 à 60 Wc.
- Gamme d'éclairement : 20 lux (en intérieur) à 1000 W/m2 (en extérieur).
- Usage électronique professionnel par le grand public (montres, calculettes...).

I.5 Modèle électrique d'un générateur photovoltaïque

Pour trouver le modèle du générateur photovoltaïque, il faut tout d'abord retrouver le circuit électrique équivalent à cette source. De nombreux modèles mathématiques, ont été développés pour représenter leur comportement très fortement non linéaire qui résulte de celui des jonctions semi-conductrices qui sont à la base de leurs réalisations.

On présentera deux modèles du générateur photovoltaïque:

- Modèle à une diode.
- Modèle à deux diodes.

I.5.1 Modèle à une diode :

Le fonctionnement d'un module photovoltaïque est décrit par le modèle « standard » à une diode, établi par Shokley pour une seule cellule PV, est généralisé à un module PV en le considérant comme un ensemble de cellules identiques branchées en série ou en parallèle.

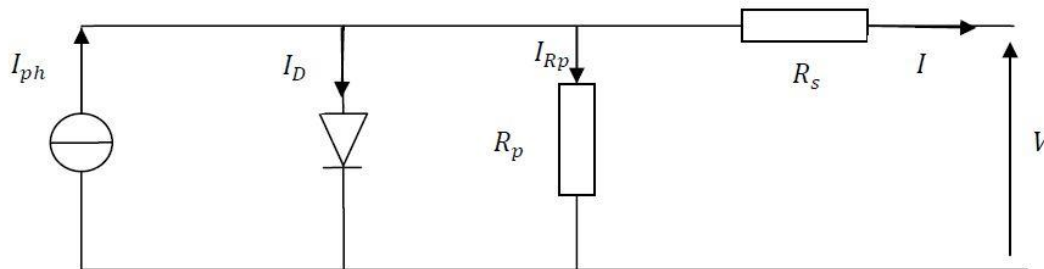


Fig (I.12) : Schéma équivalent d'une cellule PV Modèle à une diode [8].

A partir du circuit équivalent de la figure (I.12) on peut écrire :

$$I_{ph} = I_D + I + I_{Rp} \tag{I.4}$$

Le courant qui passe dans la résistance R_p est donné par :

$$I_{Rp} = \frac{V + I R_s}{R_p} \tag{I.5}$$

Le courant dans la diode est donné par :

$$V_{co} = nVt \ln\left(\frac{I_{cc}}{I_s}\right) \quad (\text{I.6})$$

Avec I_s : courant de saturation de la diode donné par :

$$I_s = K_1 T^3 e^{\frac{-E_g}{KT}} \quad (\text{I.7})$$

Ou :

$$V_t = \frac{KT}{q} : \text{tension thermique à la température } T. \quad (\text{I.8})$$

q : charge de l'électron ($1.602 \times 10^{-19} \text{C}$)

K : constante de Boltzmann ($1.381 \times 10^{-23} \text{ J/k}$)

K_1 : constante ($1.2 \text{ A/cm}^2 \text{K}^3$)

n : facteur de non idéalité de la jonction

T : température effective de la cellule en degré Kelvin

E_g : énergie de gap (pour le silicium cristallin est égale à 1.12 eV)

Donc l'expression de la caractéristique $I(V)$ est :

$$I = I_{ph} - I_s \left[e^{\frac{(V+IR_s)}{nVt}} - 1 \right] - \frac{V + IR_s}{R_p} \quad (\text{I.9})$$

Modélisation de la cellule photovoltaïque

Rappelons l'équation donnant la caractéristique $I(V)$ de la cellule basée sur le circuit équivalent à une diode :

$$I = I_{ph} - I_s \left[e^{\frac{(V+IR_s)}{nVt}} - 1 \right] - \frac{V + IR_s}{R_p} \quad (\text{I.10})$$

I.5.1.1 Calcul de I_{ph} :

Le courant de court circuit I_{cc} représente le courant maximum généré par la cellule. Il est produit lorsque elle est soumise à un court circuit $V=0$. Comme $R_s \ll R_p$ on peut admettre que $I_{ph} \approx I_{cc}$ pour ($G=1000 \text{W/m}^2$) l'équation (1) devient :

$$I = I_{cc} - I_s \left[e^{\frac{(V+IR_s)}{nVt}} - 1 \right] - \frac{V + IR_s}{R_p} \quad (\text{I.11})$$

I.5.1.2 Calcul de I_s

La tension en circuit ouvert V_{co} est calculée lorsque le courant est nul, comme suit :

$$V_{co} = nVt \ln\left(1 + \frac{I_{cc}}{I_s}\right) \quad (\text{I.12})$$

Comme $I_{cc} \gg I_s$, il est possible aussi de calculer V_{co} par la relation suivante :

$$V_{co} = nV_t \ln\left(\frac{I_{cc}}{I_s}\right) \tag{I.13}$$

Le courant de saturation inverse est donné de référence de la diode I_{sr} est donné par :

$$I_{sr} = I_{cc} / \left[\frac{V_{co}}{e^{nV_{tref}-1}} \right] \tag{I.14}$$

$$I_{sr} = I_{cc} / \left[\frac{V_{co}}{e^{nV_{tref}-1}} \right]$$

V_{tref} : la tension thermique pour une température de référence T_{ref}

Si l'on suppose que la résistance parallèle est infinie ($R_p = \infty$) l'équation (2) se simplifie à :

$$I = I_{cc} - I_s \left[e^{\frac{(V+IR_s)}{nV_t}} - 1 \right] \tag{I.15}$$

I : le courant fourni par la cellule

V : la tension aux bornes de la cellule

I.5.2 Modèle à deux diodes

Nous avons, cette fois-ci, deux diodes pour représenter les phénomènes de polarisation de la jonction PN. Ces diodes symbolisent la recombinaison des porteurs minoritaires, d'une part en surface du matériau et d'autre part dans le volume du matériau. Le schéma du générateur photovoltaïque devient dans le cas de la figure (I.13).

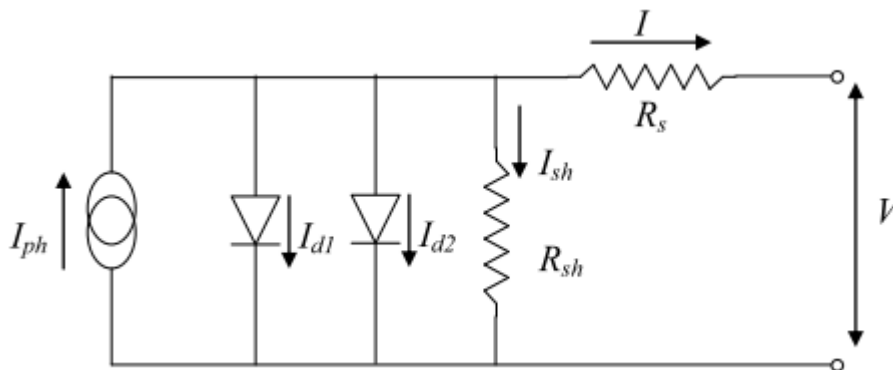


Fig. (I.13) : Schéma équivalent d'une cellule PV Modèle à deux diodes [8].

$$I = I_{ph} + \frac{V - R_s I}{R_{sh}} + I_{s1} \left[\exp\left\{ \frac{q(V - R_s I)}{AKT} \right\} - 1 \right] + I_{s2} \left[\exp\left\{ \frac{q(V - R_s I)}{2AKT} \right\} - 1 \right] \tag{I.16}$$

A : Facteur de qualité de la diode, normalement compris entre 1 et 2.

I.5.3 Puissance d'une cellule photovoltaïque :

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

$$P = VI \quad (\text{I.17})$$

$P(W)$: Puissance fournie par la cellule PV.

$V(V)$: Tension mesurée aux bornes de la cellule PV.

$I(A)$: Intensité débitée par la cellule PV.

I.5.4 Puissance maximale d'une cellule PV

Pour une cellule solaire idéale, la puissance maximale $P_{\text{maximale, idéale}}$ correspondrait donc à la tension de circuit ouvert V_{co} multipliée par le courant de court-circuit I_{cc} . L'expression de la puissance en ce point est donnée par :

$$P_{\text{max, idéale}} = V_{co} I_{cc} \quad (\text{I.18})$$

$P_{\text{max, idéale}} (w)$: la puissance fournie par la cellule PV.

$V_{co}(V)$: la tension de circuit ouvert mesurée aux bornes de la cellule PV.

$I_{cc}(A)$: l'intensité du courant de court circuit débitée par la cellule PV.

En pratique la courbe caractéristique d'une cellule PV est plus arrondie et la tension au point de puissance maximale $V_{p_{\text{max}}}$ est inférieure à la tension de circuit ouvert V_{co} , de même pour le courant fourni $I_{p_{\text{max}}}$ est inférieur, pour cette même tension, au courant de court circuit I_{cc} , l'expression de la puissance en ce point est donnée par :

$$P_{\text{max}} = V_{p_{\text{max}}} I_{p_{\text{max}}} \quad (\text{I.19})$$

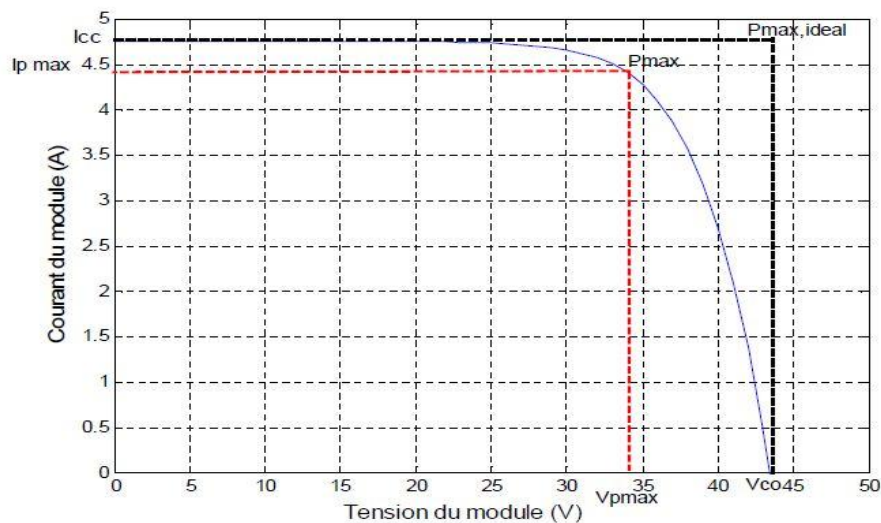


Fig. (1.14) : Puissance maximale idéale et pratique [9].

I.5.5 Rendement d'une cellule

On définit le rendement énergétique d'une cellule par le rapport entre la puissance maximum et la puissance incidente.

$$\eta_c = \frac{V_{max} * I_{max}}{P_{solaire}} \quad (I.20)$$

Ps: est la puissance maximum mesurée dans les conditions STC (Standard Test Conditions), c'est-à-dire sous un spectre AM1., une température de 25°C, et un éclairement de 1000W/ m².

Le facteur de remplissage

Le facteur de remplissage ou facteur de forme, encore souvent appelé par sa dénomination anglaise (Fill Factor) correspond à la puissance maximum délivrée par la cellule, divisée par le produit $V_{CO} * I_{CC}$, correspondant à la puissance maximale idéale.

$$FF = \frac{P_{max}}{V_{co} * I_{cc}} \quad (I.21)$$

Le rendement d'une cellule photovoltaïque est dans le cas général assez faible, de l'ordre de 10 à 20%. Des rendements plus importants ont été obtenus à l'aide de nouveaux matériaux (en laboratoire, l'arséniure de gallium AsGa donne des rendements supérieurs à 25%) ou de techniques expérimentales (technologies multicouches), souvent difficiles et coûteuses à mettre en œuvre. Cependant, le matériau photovoltaïque le plus utilisé est le silicium, qui représente une solution économique. Pour de telles cellules, le rendement énergétique ne dépasse pas les 15%. D'après les caractéristiques courant-tension et puissance-tension, on peut déduire d'autres paramètres :

- Le courant de court circuit I_{cc} , soit le courant débité par la cellule quand la tension à ses bornes est nulle. En pratique ce courant est très proche du photo courant I_{ph} .
- La tension de circuit ouvert V_{co} , soit la tension qui apparaît aux bornes de la cellule quand le courant débité est nul.
- Entre ces deux extrêmes, il existe un optimum donnant la plus grande puissance P_{max} ou MPP(Maximum Power Point).

I.6 Association des cellules photovoltaïques

I.6.1 Association en série

Dans un groupement en série, les cellules sont traversées par le même courant et la caractéristique résultante du groupement en série est obtenue par addition des tensions à courant donné. La figure I-15 montre la caractéristique résultante obtenue en associant en série n cellules identiques.

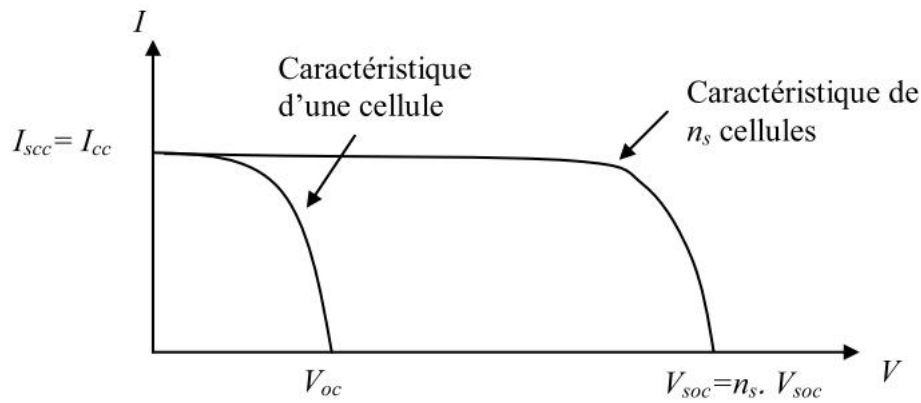


Fig. (I.15) : Caractéristique résultante d'un groupement en série de n_s cellules identiques [8] .

I.6.2 Association en parallèle

Les propriétés du groupement en parallèle des cellules sont duales de celles du groupement en série. Ainsi, dans un groupement de cellules connectées en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et la caractéristique résultante de groupement est obtenue par addition des courants à tension donnée. La figure I-16 montre la caractéristique résultante obtenue en associant en parallèles n_p cellules identiques.

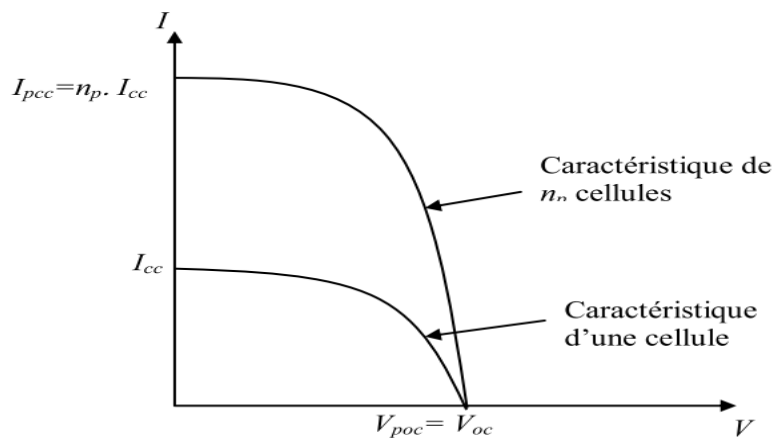


Fig. (I.16) : Caractéristique résultante d'un groupement en parallèle de n_p cellules identiques [8] .

I.6.3 Association hybride (en série et en parallèle)

Selon l'association en série et/ou parallèle de ces cellules, les valeurs du courant de court-circuit total et de la tension à vide totale sont données par les relations :

$$I_{cc}^t = n_p * I_{cc} \quad (\text{I.23})$$

$$V_{co}^t = n_s * V_{co} \quad (\text{I.24})$$

Avec :

n_p : nombre des cellule en parallèle,

n_s : nombre des cellule en série.

La figure I-17 montre la caractéristique résultante obtenue en associant, en série n_s et en parallèle n_p , cellules identiques.

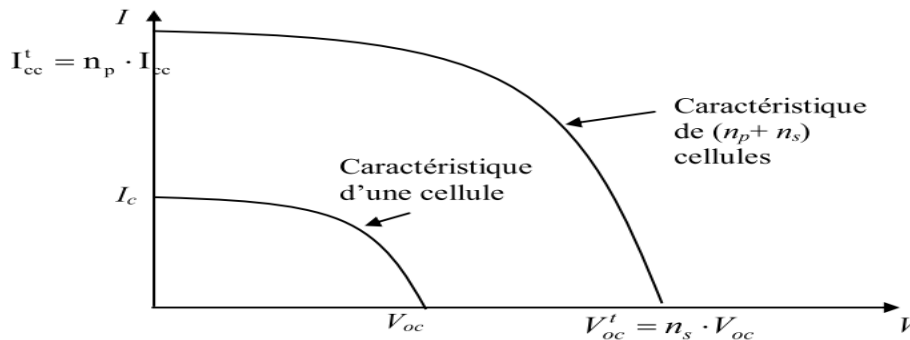


Fig. (I.17) : Caractéristique résultante d'un groupement hybride de $(n_p + n_s)$ cellules identiques [8] .

Selon l'association en série et/ou parallèle de ces cellules, les valeurs du courant de court-circuit I_{cc} et de la tension à vide V_{oc} sont plus ou moins importantes (figure I-17). La caractéristique d'un générateur PV constitué de plusieurs cellules a une allure générale assimilable à celle d'une cellule élémentaire, sous réserve qu'il n'y ait pas de déséquilibre entre les caractéristiques de chaque cellule (irradiation et température uniformes).

I.7 Caractéristiques Courant-Tension

La caractéristique courant-tension (I-V) de la cellule solaire qui se présente comment la cellule photovoltaïque réagit à toutes les charges possibles sous des conditions particulières d'ensoleillement et de température, est montrée sur la figure I.18. En observant la caractéristique, on peut voir qu'il y a trois points importants:

- Point un (1) correspond au courant maximum que peut fournir la cellule solaire à la tension zéro (courant à court-circuit).
- Point deux (2) correspond à la tension maximale de la cellule solaire sans charge; conditions (circuit ouvert).
- Point trois ((3) correspond à la puissance maximale que peut délivrer la cellule solaire.

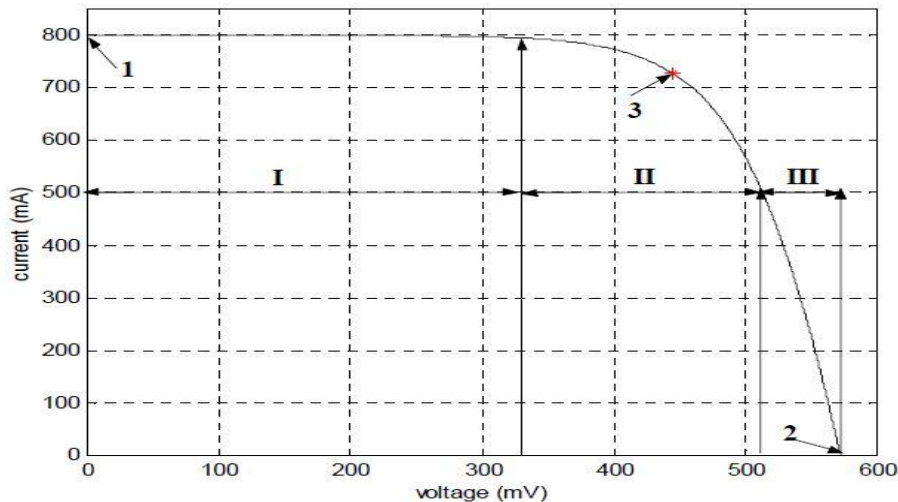


Fig. (I.18) : Caractéristique courant-tension (I-V) d'une cellule solaire [9] .

Sans tenir compte de la tension courant (I-V), la caractéristique peut être divisée en trois intervalles différents:

- L'intervalle **I** où, dans une cellule solaire, est considéré en tant que source courant comme le courant est constant alors la tension est variable
- L'intervalle **II**, où dans une cellule solaire, n'est ni considéré comme source de courant ni une source de tension.
- L'intervalle **III** où dans une cellule solaire, est considéré comme une source tension, la variation du courant est considérablement grande par rapport à la tension

Une fois qu'une cellule solaire est chargée avec une charge résistive constante, la charge est présentée avec un point quelque part sur la caractéristique de cellules d'I-V. Quand la charge augmente, le point de fonctionnement se déplace le long de la caractéristique vers la droite. Cependant, une diminution de la charge fait monter le point de fonctionnement de la caractéristique vers la gauche de la direction.

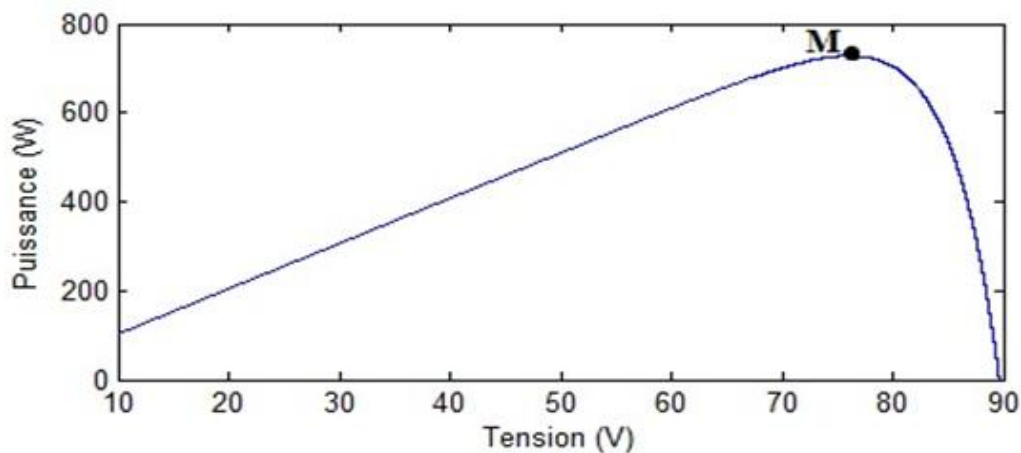


Fig.(I .19) : caractéristique P(V) d'une cellule solaire $T=25^{\circ}\text{C}$ et $G=1000\text{W}/\text{m}^2$ [9].

I.7.1 Effet de l'ensoleillement sur la caractéristiques I-V

La figure (I.20) présente la caractéristique I-V d'un module photovoltaïque pour différents ensoleillements à la température fixe. Comme on peut voir sur la figure, le courant du module est proportionnel à l'ensoleillement, tandis que la tension de circuit-ouvert change légèrement avec l'ensoleillement.

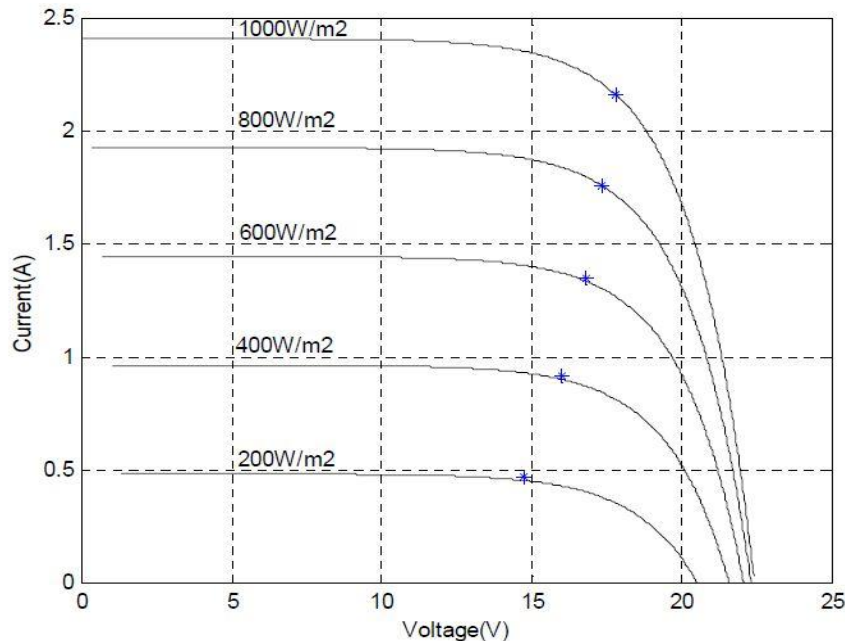


Fig. (I.20) : Effet de l'ensoleillement sur la caractéristique du module I-V à $T=25^{\circ}\text{C}$ [10] .

I.7.2 Effet de température Sur la Caractéristique I-V

On peut observer l'effet de la température sur la caractéristique I-V du module sur la figure (I.21). Comme est montré sur la figure, la température a un léger effet sur le courant, mais une augmentation de la température cause une diminution apparente sur la tension de circuit ouvert.

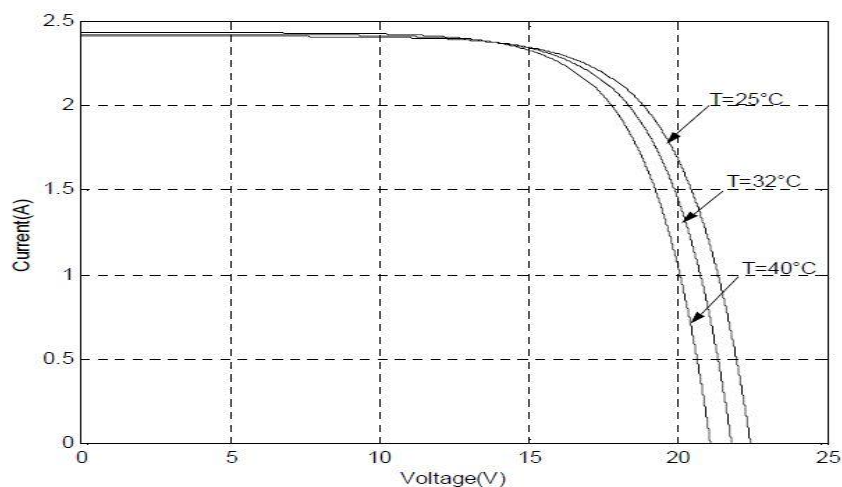


Fig.(I.21) : Effet de la température sur la caractéristique du module I-V à un ensoleillement constant (1000W/m^2) [10] .

I.8 Le panneau solaire

Le panneau solaire ou (champ solaire) se compose de modules photovoltaïques interconnectés en série et/ou en parallèle afin de produire la puissance requise. Ces modules sont montés sur une armature métallique qui permet de supporter le champ solaire avec un angle d'inclinaison spécifique. Le composant le plus crucial de toute installation PV est le module PV, qui se compose de piles solaires interconnectées. Ces modules sont raccordés entre eux pour former des panneaux et des ensembles (champs) de manière à pouvoir satisfaire différents niveaux de besoins en énergie, comme le montre la figure (I.22).

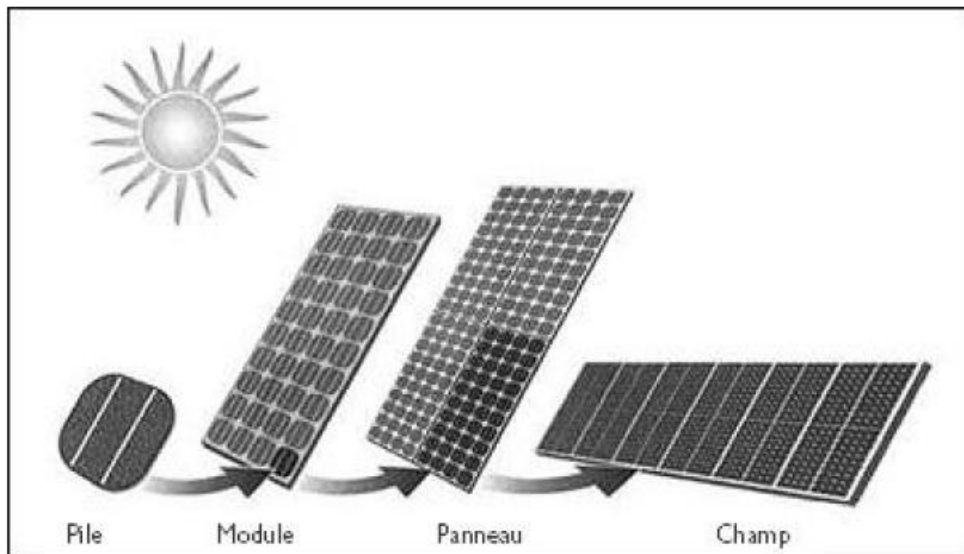


Fig. (I -22): Composants d'un champ de modules PV [10] .

I.9 Avantages et inconvénients d'une installation photovoltaïque

I.9.1 Avantages

- D'abord une haute fiabilité. L'installation ne comporte pas de pièces mobiles qui la rendent particulièrement appropriée aux régions isolées. C'est la raison de son utilisation sur les engins spatiaux.
- Ensuite le caractère modulaire des panneaux photovoltaïques permet un montage simple et adaptable à des besoins énergétiques divers. Les systèmes peuvent être dimensionnés pour des applications de puissances allant du milliWatt au MégaWatt.
- Le coût de fonctionnement est très faible vu les entretiens réduits et il ne nécessite ni combustible, ni son transport, ni personnel hautement spécialisé.
- La technologie photovoltaïque présente des qualités sur le plan écologique car le produit fini est non polluant, silencieux et n'entraîne aucune perturbation du

milieu, si ce n'est par l'occupation de l'espace pour les installations de grandes dimensions.

I.9.2 Inconvénients

- La fabrication du module photovoltaïque relève de la haute technologie et requiert des investissements d'un coût élevé.
- Le rendement réel de conversion d'un module est faible, de l'ordre de 10-15 % (soit entre 10 et 15 MW/km² par an pour le BENELUX) avec une limite théorique pour une cellule de 28%. · Les générateurs photovoltaïques ne sont pas compétitifs par rapport aux générateurs diesel que pour des faibles demandes d'énergie en régions isolées.
- Tributaire des conditions météorologiques.
- Lorsque le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batterie) est nécessaire, le coût du générateur est accru.
- Le stockage de l'énergie électrique pose encore de nombreux problèmes. Le faible rendement des panneaux photovoltaïques s'explique par le fonctionnement même des cellules. Pour arriver à déplacer un électron, il faut que l'énergie du rayonnement soit au moins égale à 1 eV. Tous les rayons incidents ayant une énergie plus faible ne seront donc pas transformés en électricité. De même, les rayons lumineux dont l'énergie est supérieure à 1 eV perdront cette énergie, le reste sera dissipé sous forme de chaleur.

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les bases indispensables à la compréhension du sujet. Nous avons rappelé quelques notions sur le rayonnement solaire, leurs différents types et leurs applications dans le domaine photovoltaïque, nous avons ensuite expliqué le fonctionnement de cellules photovoltaïques et leurs caractéristiques principales ainsi que les paramètres limitant leurs rendement et leurs coût, une synthèse d'assemblage des panneaux et une spécification des différentes zones de fonctionnement. Nous avons rappelé aussi les modules photovoltaïques et leurs associations.

CHAPITRE

2 Les dispositifs de stockage de l'énergie électrique

Introduction

Notre niveau de vie et de confort nous ont habitués à disposer instantanément et facilement d'énergie. L'apparition de nouveaux concepts de production décentralisée d'électricité et le développement des sources renouvelables suscitent un vif intérêt pour les techniques de stockage de l'énergie.

Le stockage contribue à stabiliser l'offre et la demande, à améliorer les conditions d'utilisation des réseaux de transport et de distribution, ainsi qu'à accroître le rendement de certaines unités de production à puissance nominale, tout en réduisant les émissions polluantes.

Dans ce chapitre nous nous proposons d'étudier les accumulateurs électrochimiques, l'objectif étant de créer une base de connaissances sur ce type d'accumulateur et permettre une analyse de ses caractéristiques et performances.

II. Stockage de l'énergie

Le stockage de l'énergie est l'action qui consiste à placer une quantité d'énergie en un lieu donné pour permettre son utilisation ultérieure. Par extension, le terme « stockage d'énergie » est souvent employé pour désigner le stockage de matière qui contient cette énergie. La maîtrise du stockage de l'énergie est particulièrement importante pour valoriser les énergies alternatives, telles que le solaire ou l'éolien, sûres et renouvelables, mais par nature intermittentes.

Dans une installation PV, le stockage correspond à la conservation de l'énergie produite par le générateur PV, en attente pour une utilisation ultérieure. La gestion de l'énergie solaire nécessite d'envisager des stockages suivant les conductions météorologiques et qui vont répondre à deux fonctions principales :

- Fournir à l'installation de l'électricité lorsque le générateur PV n'en produit pas (la nuit ou par mauvais temps par exemple)
- Fournir à l'installation des puissances plus importantes que celles fournies par le générateur PV.

Les photo-générateurs, comme on l'a vu, ne produisent de l'énergie que s'ils sont exposés à la lumière et le courant produit dépend de la valeur de l'éclairement.

- S'il y a concordance entre la présence de la lumière et le besoin d'énergie, il n'est pas nécessaire de la stocker (exemples : une calculatrice, un ventilateur...).
- Si l'on stocke l'énergie sous une autre forme, on peut également se passer de

stockage électrique (exemple: une pompe alimentée par énergie solaire stockée, l'eau dans un réservoir: la pompe fonctionnera à débit variable, en fonction de l'ensoleillement et sur une journée, ou une autre base de temps, elle aura stocké suffisamment d'eau pour les usagers).

Dans ces deux cas, on parle de fonctionnement «au fil du soleil» : il y a de la lumière, cela fonctionne ; il n'y en a plus, cela s'arrête.

Mais le plus souvent, on souhaite disposer d'énergie électrique dans l'obscurité pour de multiples raisons, et on doit alors la stocker :

- La montre ne doit pas s'arrêter la nuit (ni quand on la laisse un certain temps dans un tiroir).

On s'éclaire plutôt quand il fait nuit... etc.

II.1 Autonomie (sans apport solaire)

On appelle nombre des jours d'autonomie sans apport solaire N_{ja} , la durée de jours pendant laquelle la batterie peut alimenter seule l'installation à toute période de l'année (les panneaux étant considérés comme absents), ou en d'autres termes c'est la durée pendant laquelle le stockage assure le fonctionnement du récepteur sans recevoir aucune charge de la part du photo-générateur. Elle dépend de la capacité de l'accumulateur et de l'énergie requise par le récepteur, indépendamment du photo-générateur. Le besoin en autonomie, dépend du type de récepteur et de son usage.

Par précaution et de sécurité on prévoit toujours une marge par exemple pour une installation où on estime la durée d'autonomie entre 2 à 4 jours sans apport solaire, on réduira le risque en travaillant avec une autonomie de 4 jours sans apport solaire.

La durée d'autonomie varie de 2 à 4 jours sans apport solaire pour les zones équatoriales.

II.2 Principe du couplage photo-générateur batterie

Certains pensent qu'il faut utiliser l'énergie issue directement du photo-générateur quand la lumière est présente, et «basculer» sur le stockage dans l'obscurité : c'est inutile.

Le plus rationnel est de monter le photo-générateur, la batterie, et le récepteur en parallèle avec des composants de régulation. Ainsi, la batterie sera le «réservoir d'énergie», que l'on remplira d'un côté par le photo-générateur et videra d'un autre par le récepteur. Ces deux événements peuvent être simultanés ou non, peu importe, pourvu que la batterie ne soit jamais déchargée.

Autre avantage de ce montage photo-générateur/batterie/récepteur en parallèle. La

batterie jouera le rôle de régulateur de tension pour alimenter le récepteur ; car le photogénérateur, n'est en fait qu'un générateur de courant qui peut travailler sur une large plage de tension (de 0 V à sa tension de circuit ouvert). La batterie impose la tension du montage parallèle et stabilisera ainsi la tension fournie au récepteur, ce qui est un avantage évident pour certains d'entre eux. Un tube fluorescent en 12 V continu, par exemple, se détériore assez vite s'il reçoit une tension trop faible (<10V).

II.2.1 Montage de plusieurs accumulateurs sur le même système

Les règles de montage série et parallèle s'appliquent également aux accumulateurs. Deux batteries de 150 Ah de 12 V en série donneront 150 Ah-24 V, et les mêmes en parallèle donneront 300 Ah-12 V. Mais pour les montages en parallèle, il est impératif que les deux batteries soient des «sœurs jumelles» (même capacité), sinon on risque de voir la plus faible dépérir au profit de l'autre: sa résistance interne augmentera et la batterie «en meilleure santé» prendra la plus grande part du courant de charge, ce qui ne fait qu'accentuer le déséquilibre.

On préférera donc les montages séries (addition de tensions), plutôt que les montages en parallèle (addition de capacités).

II.2.2 Les différentes Caractéristiques principales d'une batterie :

Il existe plusieurs paramètres qui caractérisent une batterie, nous avons mentionné ci-dessus les plus importantes :

II.2.2.1 Capacité en Ampère heure :

Les Ampères heure d'une batterie sont simplement le nombre d'Ampères qu'elle fournit multiplié par le nombre d'heures pendant lesquelles circule ce courant. Théoriquement, une batterie de 150 Ah peut fournir 150 A pendant une heure, ou 50 A pendant 3 heures, ou 3 A pendant 50 heures.

II.2.2.2 Rapports de chargement et déchargement :

Si la batterie est chargée ou est déchargée à un rythme différent que celui spécifié, la capacité disponible peut augmenter ou diminuer. Généralement, si la batterie est déchargée à un rythme plus lent, sa capacité augmentera légèrement. Si le rythme est plus rapide, la capacité sera réduite.

II.2.2.3 Température

Un autre facteur qui influence la capacité est la température de la batterie et celle de son atmosphère. Le comportement d'une batterie est spécifié à une température de 27 degrés. Des températures plus faibles réduisent leur capacité significativement. Des températures plus hautes produisent une légère augmentation de leur capacité, mais ceci peut augmenter la perte d'eau et diminuer la durée de vie de la batterie [11].

II.2.2.4 La durée de vie

Un accumulateur peut être chargé puis déchargé complètement un certain nombre de fois avant que ces caractéristiques ne se détériorent. Par ailleurs, quelque soit le mode d'utilisation de l'accumulateur, il y'a une durée de vie totale exprimée en année (ou en nombre de cycles) [12].

II.2.2.5 Profondeur de décharge

La profondeur de décharge est le pourcentage de la capacité totale de la batterie qui est utilisé pendant un cycle de charge/décharge. Les batteries de "cycle peu profond" sont conçues pour des décharges de 10 à 25% de leur capacité totale dans chaque cycle. La majorité des batteries de "cycle profond" fabriquées pour les applications photovoltaïques sont conçues pour des décharges jusqu'à 80% de leur capacité, sans les endommager. Les fabricants de batteries de nickel- Cadmium assurent qu'elles peuvent totalement être déchargées sans aucuns dommages.

II.2.2.6 La tension d'utilisation

C'est la tension à laquelle l'énergie stockée est restituée normalement à la charge.

II.2.2.7 Le rendement

C'est le rapport entre l'énergie électrique restituée par l'accumulateur et l'énergie fournie à l'accumulateur.

II.2.2.8 Le taux d'autodécharge

L'autodécharge est la perte de capacité en laissant l'accumulateur au repos (sans charge) pendant un temps donné.

II.3 Technologies et Types d'accumulateurs

Il existe plusieurs types de stockage dans le système PV, les puissances rencontrées sont généralement inférieures au MW, le seul stockage d'énergie électrique possible est le stockage électrochimique [13].

Le choix de la technologie d'accumulateur va dépendre du coût d'investissement et de

la durée de vie des batteries dans les conditions de fonctionnement correspondent à l'application choisie.

Les batteries de technologie Plomb acide sont actuellement les plus utilisées pour les applications photovoltaïques. Elles sont principalement avantagées par leurs faibles coûts pour des rendements satisfaisants. Leur inconvénient majeur est leur durée de vie qui est la plus courte des technologies comparées. Par contre La technologie Nickel-Cadium (Ni-Cd) présente un cout plus élève que les batteries au Plomb, pour une durée de vie supérieure mais un rendement plus faible. Des efforts sont nécessaires pour faire du Ni-Cd une technologie concurrentielle pour l'application photovoltaïque. La technologie Lithium-ion (Li-ion) s'annonce comme la concurrente la plus prometteuse. Sa durée de vie et son rendement sont parmi les meilleurs des accumulateurs électrochimiques. Le cout est encore important par rapport a la technologie Plomb mais une baisse significative dans les prochaines années est attendue de sorte que le Li-ion devienne la technologie la plus intéressante pour le applications PV.

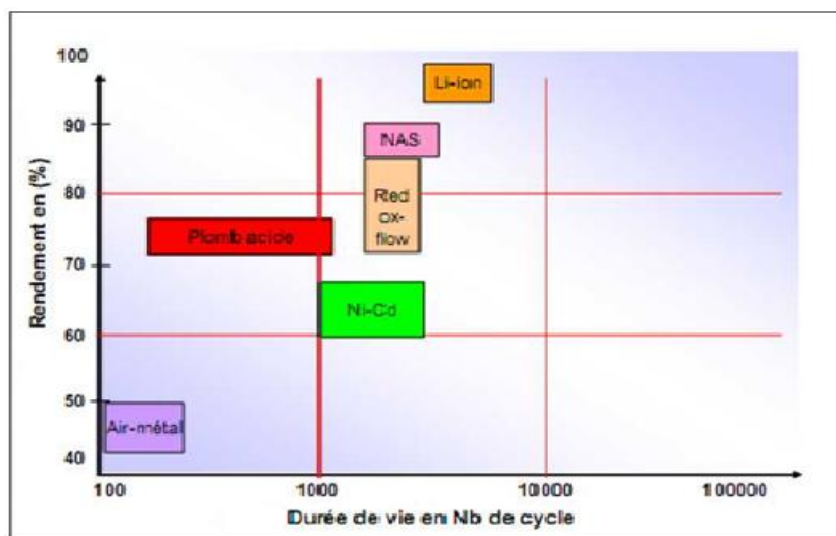


Fig. (II-1) : Durée de vie et rendement des différentes technologies de batteries [14].

II.3.1 Les Accumulateurs au plomb acide

La batterie au plomb acide est la forme de stockage de l'énergie électrique la plus courante, en raison de son coût qui est relativement faible et d'une large disponibilité. Par contre, les batteries nickel-cadmium sont plus chères, elles sont utilisées dans les applications où la fiabilité est vitale.

II.3.1.1 Composition d'une batterie solaire plomb- Acide [15]

Ces batteries sont composées de plusieurs plaques de plomb dans une solution d'acide sulfurique. La plaque consiste en une grille d'alliage de Plomb avec une pâte d'oxyde de plomb marquée sur la grille. La solution acide sulfurique et l'eau est appelée électrolyte.

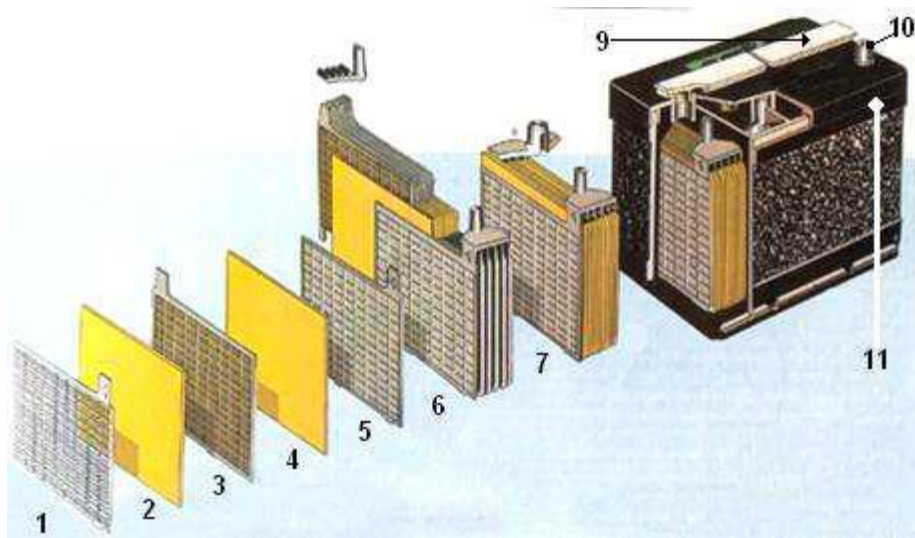


Fig. (II-2) : Construction d'une batterie monobloc [15]

- | | |
|-----------------------|------------------------|
| 1 : Grille. | 7 : Élément complet |
| 2 : Séparateur. | 8 : Pont |
| 3 : Plaque positive. | 9 : Rampe de bouchons. |
| 4 : Plaque négative. | 10 : Borne. |
| 5 : Barrette. | 11 : Bac. |
| 6 : Faisceau négatif. | |

Le matériel de la grille est un alliage de plomb parce que le plomb pur est un matériel physiquement faible, et pourrait se casser pendant le transport et le service de la batterie.[14]

L'alliage peut être en plomb avec 2-6% d'Antimoine. Moins la teneur en

Antimoine sera grande, moins résistante sera la batterie pendant le processus de charge.

Une petite quantité d'Antimoine réduit la production d'hydrogène et d'oxygène pendant la charge, et par conséquent la consommation d'eau. D'autre part, une plus grande proportion d'Antimoine permet des décharges plus profondes sans endommager les plaques, ce qui

implique une plus grande durée de vie des batteries. Ces batteries plomb- Antimoine sont de type de "cycle profond".

Le Cadmium et le Strontium sont utilisés à la place de l'Antimoine pour fortifier la grille. Ceux-ci offrent les mêmes avantages et inconvénients que l'Antimoine, mais réduisent en outre le pourcentage d'autodécharge quand la batterie n'est pas en utilisation.

Le Calcium fortifie aussi la grille et réduit l'autodécharge. Toutefois, le Calcium réduit la profondeur de décharge recommandée dans non plus de 25%. D'autre part, les batteries de plomb- Calcium sont de type "cycle peu profond".

Les plaques sont alternées dans la batterie, avec des séparateurs entre elles, qui sont fabriqués d'un matériel poreux qui permet le flux de l'électrolyte. Ils sont électriquement non conducteurs, ils peuvent être des mélanges de silice et de matières plastiques ou gommées.

Les séparateurs peuvent être des feuilles individuelles ou des "enveloppes". Les enveloppes sont des manchons, ouverts par en haut, qui sont uniquement placés sur les plaques positives.

Un groupe de plaques positives et négatives, avec des séparateurs, constituent un "élément". Un élément dans un conteneur plongé dans un électrolyte constitue une "cellule" de batterie. Des plaques plus grandes, ou en plus grand nombre, entraînent une plus grande quantité d'ampères heure que la batterie pourra fournir.

Indépendamment de la taille des plaques, une cellule fournira une tension qui varie entre 1,7 et 2 volts suivant l'état de charge dans les conditions nominales de fonctionnement, et un rendement énergétique de l'ordre de 70% à 85%.(pour plomb- Acide). Une batterie est constituée par plusieurs cellules ou éléments reliés en série, interne ou externe, pour augmenter le voltage à des valeurs normales aux applications électriques. Pour cette raison, une batterie de 6 V est composée de trois cellules, et une de 12 V de 6.

Les plaques positives d'une part, et les négatives de l'autre, sont interconnectées au moyen de bornes externes dans la partie supérieure de la batterie. Les éléments des batteries sont souvent montés dans des bacs isolés du sol pour éviter le refroidissement de l'électrolyte par l'intermédiaire de support de bois, ces bacs sont réalisés en plastique transparent afin de bien visualiser le repérage de niveau de l'électrolyte. Les liaisons entre les éléments doivent être dimensionnées de manière à avoir une chute de tension très faible quelque soit le régime [9].

II.3.1.2 Principe de fonctionnement

Une réaction chimique intervient lorsque la batterie alimente une charge connectée à ces Deux électrodes. Pendant la décharge, il y a une oxydation à la plaque négative qui se traduit par une perte d'électrons et réduction à la plaque positive ou gain d'électrons. L'électrolyte en

présence dans la batterie facilite le déplacement des charges électrochimiques sous forme d'ions. Le processus inverse se produit quand la batterie se recharge on voit apparaître immédiatement une force électromotrice entre les deux électrodes. Les équations des réactions suivantes décrivent la réaction principale:

Electrode Positive: $\text{PbO}_2 + 3\text{H}^+ + \text{HSO}_4^- + 2\text{e}^- = \text{PbSO}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$.

Electrode negative: $\text{Pb} + \text{HSO}_4^- = \text{PbSO}_4 + \text{H}^+ + 2\text{e}^-$.

Reaction: $\text{Pb} + \text{PbO}_2 + 2\text{H}^+ + 2\text{HSO}_4^- = 2\text{PbSO}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$.

II.3.1.3 Processus de décharge

Quand l'accumulateur est complètement chargé, l'anode possède un surplus d'électrons et la cathode un manque d'électrons. Le déplacement des électrons à travers une charge, connectée entre les deux électrodes, va créer ainsi le courant comme le montre la figure (II-8). Lorsque les deux électrodes auront le même nombre d'électrons, l'accumulateur ne débitera plus de courant, ce qui indique la fin de la décharge. Pendant la décharge, la force électromotrice varie en fonction du temps comme l'indique la figure... Pendant une assez longue durée d'utilisation, elle reste remarquablement constante à la valeur de 2 V environ. A partir de point N, elle diminue brusquement (1.8 V), alors il faut recharger l'accumulateur, sous peine de voir apparaître la sulfatation des plaques.

En pratique, on ne descend pas en général en dessous de 20% de la capacité de la batterie. Sinon, la sulfatation entraîne une perte de capacité et une augmentation de la résistance interne d'où baisse de tension.[17]

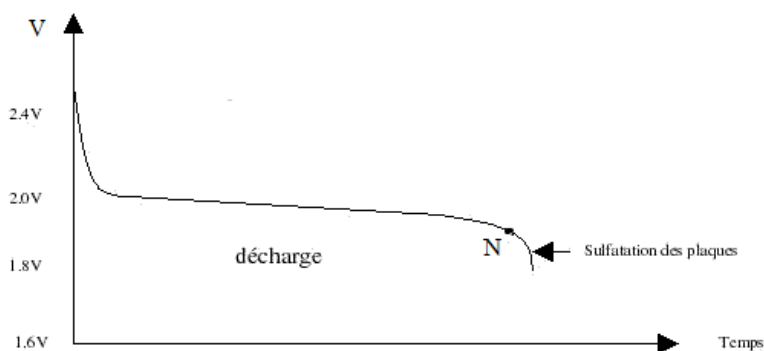


Fig. (II-3): Allure de la décharge d'un élément d'une batterie au plomb

II.3.1.4 Processus de charge

La charge est le processus inverse de la décharge. L'accumulateur est chargé par un courant constant, ce qui va causer le déplacement des électrons de l'anode (borne positive dans ce cas) vers la cathode (borne négative).

Pendant la charge, l'accumulateur est un récepteur. Si on trace graphiquement la différence de potentiel aux bornes en fonction du temps, on constate qu'après un court régime transitoire elle s'établit aux environs de 2,2 V.

En fin de charge (point M sur la figure II-9), on note un accroissement rapide de la tension. Les plaques, complètement polarisées, ne retiennent plus l'oxygène et l'hydrogène dégagés. La fin de charge est atteinte à 2,6 V.

En charge flottante (régulation de charge) on se limite 2.25 V et 2.35 V par élément [17].

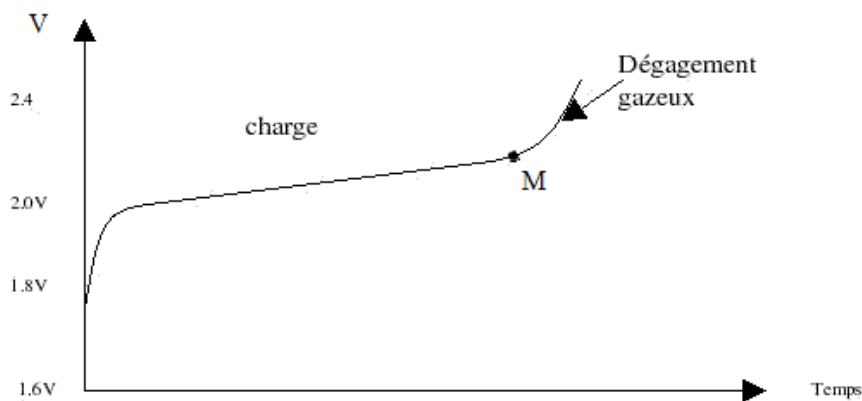


Fig. (II-4) : Allure de la charge d'un élément de batterie au plomb.

II.3.2 Les Accumulateurs au Nickel- cadmium [15]

Les batteries de nickel- Cadmium ont une structure physique semblable à celles du plomb-Acide. Au lieu du Plomb, elles utilisent de l'hydroxyde de Nickel pour les plaques positives et de l'oxyde de Cadmium pour les plaques négatives. L'électrolyte est de l'hydroxyde de Potassium.

La tension de ce type d'accumulateur varie entre 1,15 et 1,17 Volts, par élément suivant l'état de charge. Le rendement énergétique est de l'ordre de 70%. En dépit d'un prix encore prohibitif, ce type d'accumulateur présente beaucoup d'avantages :

- Très bonne résistance mécanique.
- Possibilité de supporter des décharges profondes.
- Pas d'émanations toxique à partir de l'électrolyte.

- Ne craint pas de gel.

II.3.3 Les batteries au lithium

L'utilisation et la diversité sans cesse grandissantes des applications électriques ont conduit au développement de nouvelles technologies de stockage. Les efforts menés en matière de recherche et de développement ont permis de voir apparaître de nouvelles technologies de stockage électrochimique comme les systèmes Redox, les systèmes de stockage via l'hydrogène, ou les batteries au lithium. L'élément lithium présente des caractéristiques physico-chimiques très intéressantes. Utilisé comme matière active à l'anode, il permet d'obtenir des batteries à fort potentiel énergétique. Mais sa réactivité avec le milieu ambiant (notamment avec l'air) en fait un matériau difficile à manipuler à l'état métallique.

Il existe trois grandes familles de batteries au lithium : Lithium métallique, Lithium-Ion et Lithium-polymère [18].



Fig. (II-5): Accumulateur lithium [18].

II.4 Connexion d'une batterie

La batterie est l'élément le plus fragile d'une installation photovoltaïque. C'est également l'un des organes essentiels à son bon fonctionnement. Il est donc très important de bien choisir sa batterie et d'en prendre soin, notamment lors du montage.

Avant d'être raccordées, les batteries doivent être installées à leur emplacement définitif. Pour les branchements, il faut se munir de câbles électriques adaptés à leur puissance: la section du câble doit être plus ou moins grande en fonction de l'intensité pour limiter les pertes par «effet de Joule ». Il est recommandé d'intégrer un fusible externe entre la batterie et le régulateur, et/ou entre la batterie et les consommateurs pour empêcher tout risque de court-

circuit. Ce fusible devra être au plus près des pôles de la batterie.

Si les batteries sont plusieurs et qu'elles nécessitent un branchement en série ou en parallèle, il faut les connecter entre elles avant tout. Elles pourront ensuite être raccordées au régulateur (on connecte toujours les batteries en premier, avant les modules photovoltaïques ou les consommateurs) [19].

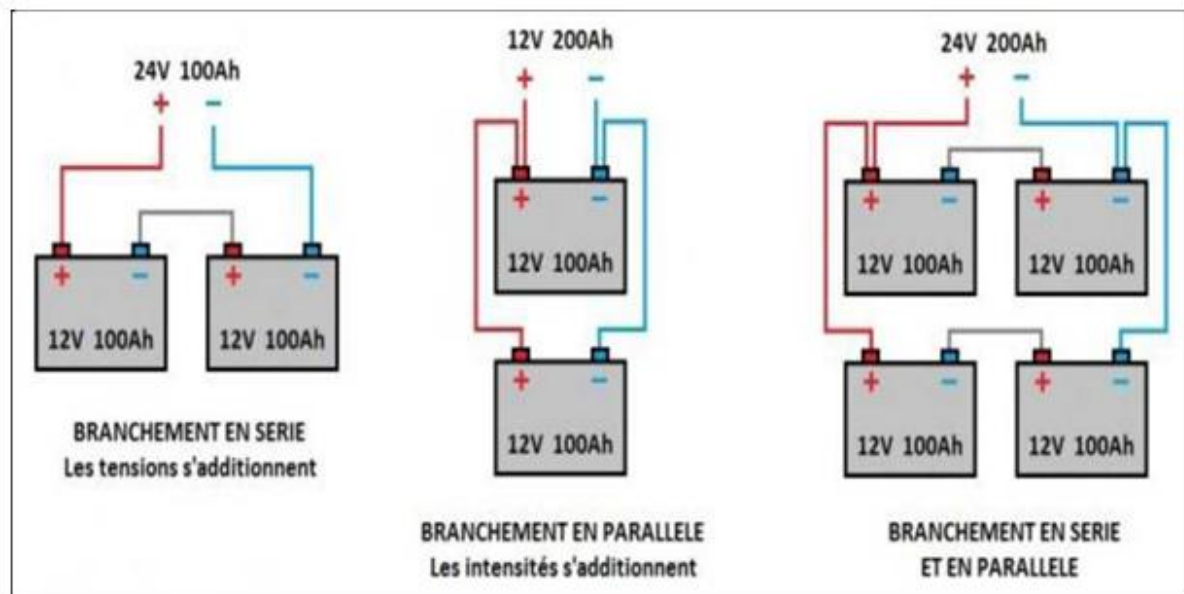


Fig. (II-6): Connexions des batteries

II.5 Sécurité et bon fonctionnement des batteries

La sécurité des personnes est primordiale dans l'usage des batteries, car celles-ci dégagent de l'hydrogène. Au contact de l'oxygène présent dans l'air, en présence d'une flamme, ce gaz provoque des explosions violentes. Il est donc impératif de ventiler le local pour éviter l'accumulation d'hydrogène. Dans les régions à basse température, il est nécessaire de prendre en compte le problème du gel dans le choix de type de batteries.

Conclusion :

L'un des principaux inconvénients de l'énergie solaire est son caractère intermittent. Pour une utilisation permanente, il est donc nécessaire de stocker une partie de l'énergie produite. C'est la raison pour laquelle nous avons essayé de dégager, de façon critique, un ensemble de caractéristiques techniques et économiques qui permettraient d'améliorer les estimations de coût qui conditionnent l'acceptabilité du stockage. Afin d'augmenter et de prolonger la durée de vie des batteries de stockage donc réduire le coût et l'investissement de la centrale PV, on

utilise un régulateur de charge/décharge qui aura pour rôle la surveillance et le maintien des seuils des batteries a des niveaux optimaux.

CHAPITRE

Conception et réalisation d'un régulateur de charge

Introduction

Les batteries rechargeables sont largement utilisées dans les systèmes photovoltaïques autonomes pour emmagasiner le surplus d'énergie. Ces batteries sont cependant si fragiles devant les phénomènes de surcharge, de décharge profonde et les dérives de température et de courant qu'il faut leur associer un régulateur de charge approprié pour assurer leur protection. L'importance d'un régulateur de charge dans un système photovoltaïque autonome n'est donc plus à discuter. Il doit cependant être réalisé avec le plus grand soin pour répondre aux exigences de coût, de simplicité, de généralité et de fiabilité.

Lors de la mise au point d'un tel composant, un certain nombre de problèmes se posent notamment parce qu'il existe plusieurs schémas possibles pour le contrôle de charge. Les contraintes supplémentaires imposées au régulateur de charge, telles que la possibilité de varier les paramètres de l'algorithme de contrôle, d'afficher numériquement les grandeurs utiles du système et la possibilité d'analyser son fonctionnement par ordinateur apportent des complications supplémentaires au problème de mise en œuvre et favorisent les solutions à base de microcontrôleurs.

L'objet de ce chapitre est de présenter les étapes de conception et de réalisation d'un régulateur de charge/décharge de batterie, fonctionnant sous le contrôle du microcontrôleur 16F877A et offrant la possibilité d'afficher numériquement les grandeurs utiles du système. Tout d'abord nous avons commencé par une approche théorique du système puis par la suite nous avons expliqué son principe de fonctionnement et les différentes phases de réalisation

III. Définition d'un régulateur

Comme son nom l'indique, le régulateur de charge est un dispositif qui contrôle et régule l'état de charge et de décharge de la batterie. Il protège l'installation photovoltaïque, et notamment la batterie qui est l'élément le plus sensible et fragile de l'installation. Connecté au cœur du système, il est branché à la fois sur les modules solaires, la batterie et les appareils qui consomment l'électricité (la charge), si la batterie était à pleine charge et que les modules continuaient de lui fournir de l'énergie, il y aurait alors surcharge et la batterie se détériorerait. De même, il est recommandé de ne pas vider entièrement une batterie. Ainsi, même s'il s'agit d'une batterie à décharge profonde, il vaut mieux ne pas descendre en dessous de 50% à 80% de décharge pour ne pas trop la dégrader. Le régulateur augmente donc sa durée de vie en lui évitant des états extrêmes.

III.1 Différents types de régulateurs

Le fait que les panneaux solaires ont la particularité d'être court-circuités ou peuvent voir leur circuit s'ouvrir sans les endommager, a donné naissance à deux principales méthodes de contrôle de la charge des batteries : le régulateur série et le régulateur shunt.

III.1.1 Régulateur shunt

La figure (III.1) montre une structure shunt d'un régulateur solaire, le régulateur shunt contrôle la charge de la batterie en court-circuitant le module photovoltaïque sans aucun risque.

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

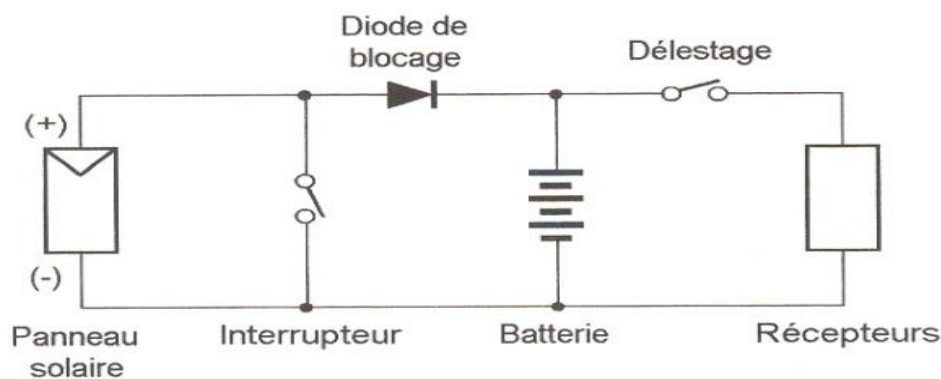


Fig. (III-1) : Conception d'un régulateur shunt

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

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

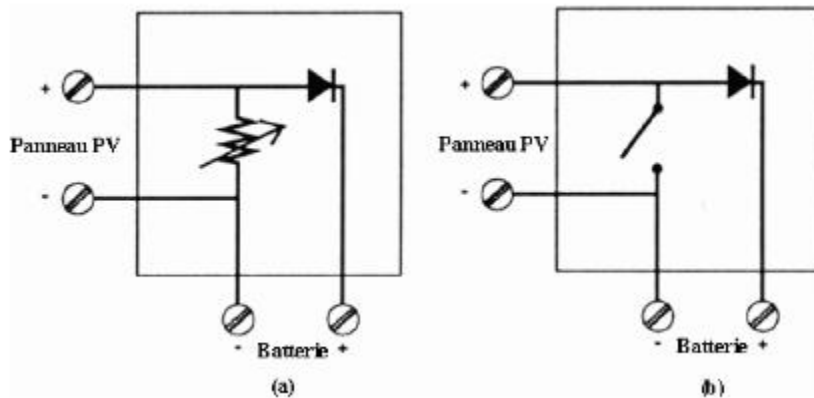


Fig. (III-2) : Schéma fonctionnel du régulateur shunt.

=

III.1.2 Régulateur type série

Comme son nom l'indique, ce type fonctionne en série entre le générateur photovoltaïque et la batterie. La figure (2.7) montre une structure électrique typique d'un contrôleur série.

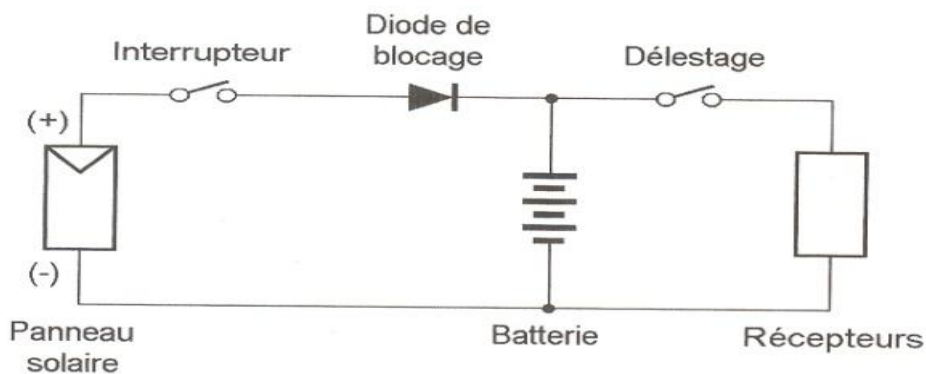


Fig. (III-3) : Conception d'un régulateur série

Le régulateur de type série peut fonctionner selon plusieurs méthodes soit:

- a. Par une interruption série «*Series- Interrupting-Design*» où le régulateur déconnecte complètement la batterie du panneau photovoltaïque si sa tension atteint la tension de régulateur V_R , puis il la reconnecte si sa tension diminue à la valeur V_{ARV} . [12]. [16].
- b. Par limitation linéaire du courant de charge «*Series-Linear -Design*» afin de maintenir la tension de la batterie à la valeur V_R .

c. Par une technique PWM «*series -Interrupting, PWM Design*». Cette technique est caractérisé par la présence d'un élément de puissance entre le panneau photovoltaïque et la batterie, cet élément de puissance s'ouvre et se referme par un signal de commande «*PWM*» d'une fréquence constante et d'un rapport cyclique variable. Cette technique de commande hache le courant généré par le panneau photovoltaïque en impulsions afin de réguler la quantité de la charge dans la batterie. Si la tension de la batterie augmente, la largeur d'impulsion diminue, et le courant de charge diminue également. [16]

III.2 Régulateurs de charge à base d'un micro contrôleur (Pic 16F877A)

L'utilisation du **PIC16f877A** nous a simplifié le réglage des seuils de charge et de décharge de la batterie, car dans ce genre de circuit intégré toute est géré a l'aide de programme qu'on injecte à l'intérieure, dans lequel on a prédéfinie les défèrent paramètre de notre système.

III.2.1 Les seuils de charge et de décharge de la batterie

Pour le bon fonctionnement de l'accumulateur on a désigné quatre seuils de surveillance :

a. les seuils dans le cas de la charge (figure ...a)

Ces seuils sont :

- H1 (high1) : c'est le seuil haut (12.9v) depuis lequel la batterie commencera la charge rapide avant d'atteindre le seuil critique.

b.le seuil dans le cas de la décharge

- L1 (low1) : signifiant seuil bat (11.9v). À partir de cette valeur la batterie entamera une décharge rapide.

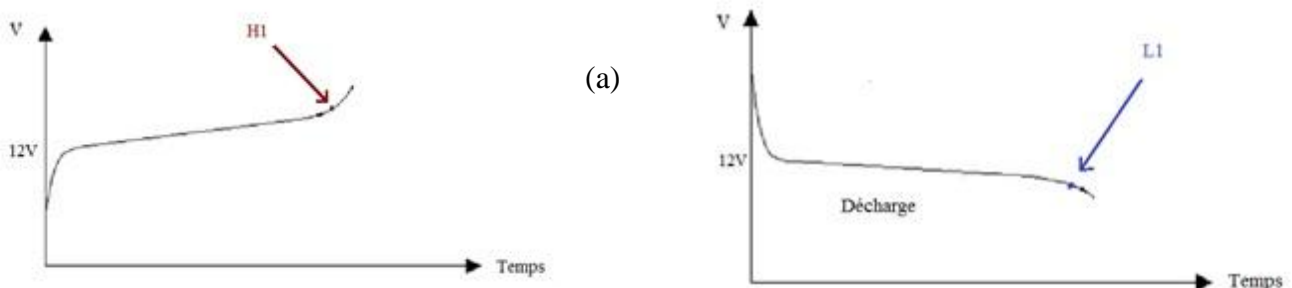


Fig. (III-4) : les seuils de lacharge et de la décharge de la batterie

III.2.2 Description générale de la maquette réalisée

On peut représenter la maquette réalisée par la figure ci-dessous:

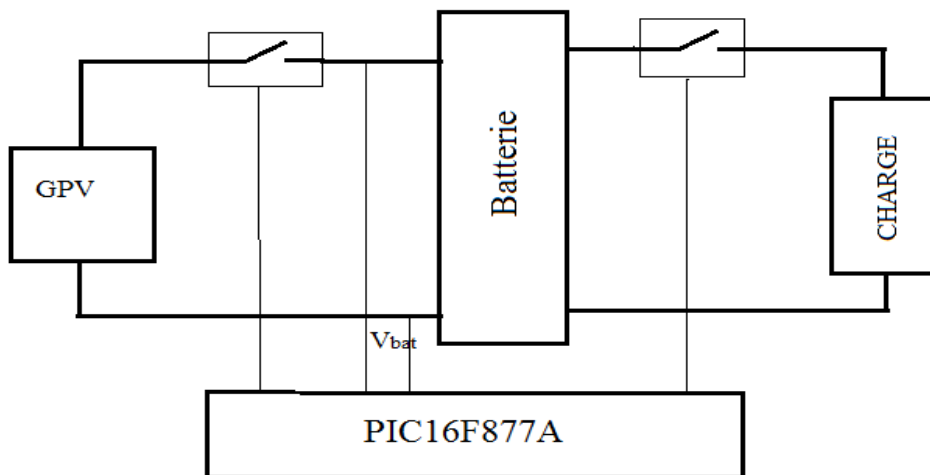


Fig. (III-5) : Schéma synoptique de la maquette réalisée

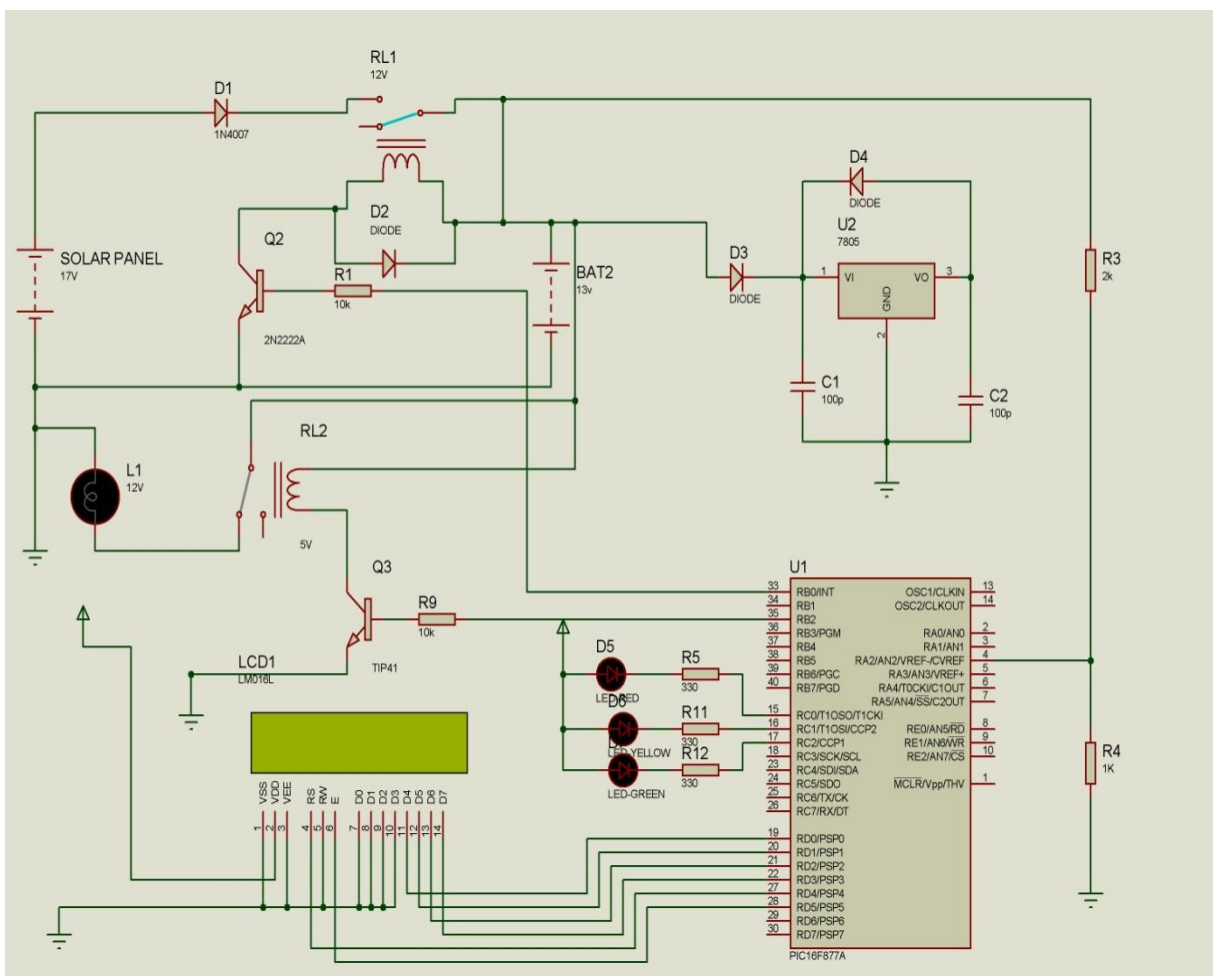


Fig. (III-6) : Schéma du régulateur de charge à base de pic 16F877A sous Proteus

III.2.3 Présentation du microcontrôleur (Pic 16f877A)

Le microcontrôleur est le cerveau du système. C'est à lui qu'incombe la gestion de la batterie ainsi que la communication avec l'utilisateur via différents périphériques. Pour réaliser le choix du microcontrôleur, nous avons donc défini un certains nombres de critères tels que :

- ❖ le prix
- ❖ une faible consommation
- ❖ la mise en œuvre
- ❖ la présence d'un module de conversion analogique-numérique avec une bonne résolution afin de réaliser les mesures nécessaires à l'algorithme de gestion de charge
- ❖ présence de modules de communication série ou parallèles

Après une comparaison des différents microcontrôleurs proposés par Motorola, Intel et Microchip, notre choix s'est porté sur le PIC16F877A du dernier fabricant cité car il présentait tous les critères ci-dessus et possédait de loin le meilleur rapport qualité/prix. En effet, il possède 8 entrées de conversion A/N avec une résolution sur 10 bits. De plus, sa mise en œuvre était simplifiée par un packaging DIP contrairement aux autres fabricants où la technologie CMS domine. Les outils de développement ont été aussi un critère clé. Les microcontrôleurs ont en général une trentaine d'instructions assembleur. Pour un programme complexe comme celui à développer, il était préférable de le réaliser en langage C. Le logiciel MikroC de Mikroelektronika s'est avéré être l'outil providentiel. Il permet de programmer les codes en langage C et intègre de nombreuses fonctions.

III.2.4 Définition d'un pic

Un pic (Programmable Interface Controller) est un microcontrôleur de Microship Technology Inc. Un pic est un composant dit RISC (Reduced Instructions Set Computer), ou encore composant à jeu d'instructions réduit. Ces microcontrôleurs sont conçus sur une architecture dite HARVARD, elle est basée sur deux bus ; un pour les données (Bus de données) et l'autre pour les instructions (Bus de programme).

Différentes familles des PIC :

La famille des pics est subdivisée en trois (03) grandes familles :

- Base line : c'est la famille ou l'unité centrale travaille sur 12 bits

Exemple : 12CXXX...

- Mid-Range : c'est la famille ou l'unité centrale travaille sur 14 Bits

Exemple : 16F877A.

- High-Performance : c'est la famille ou l'unité centrale travaille sur 16 Bits

Exemple : 18FXXX, 18CXXX...

III.2.5 Brochage du Pic 16f877A sous forme de boitier PDIP

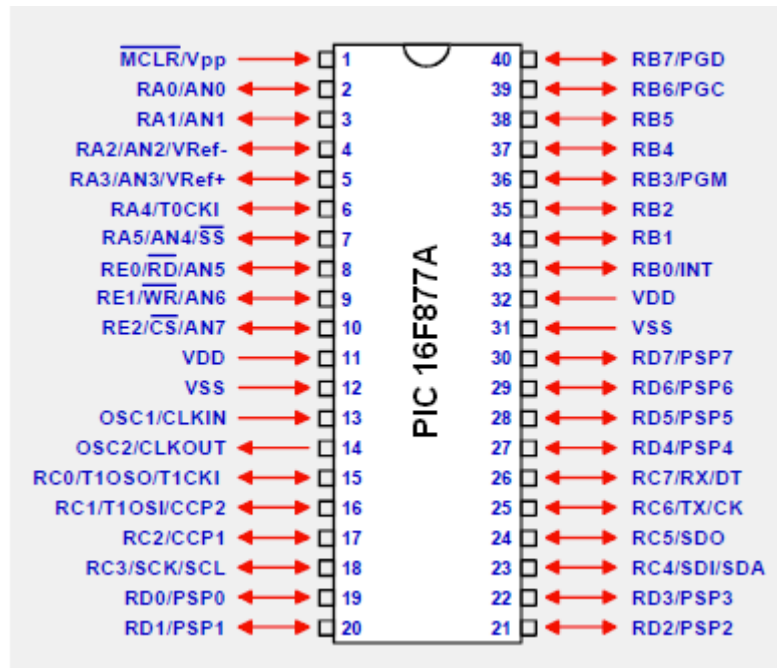


Fig. (III-7) : Brochage du PIC 16F877A.

III.2.6 Les principales caractéristiques du PIC 16F877A

- Une fréquence de fonctionnement allant jusqu'à 20MHz.
- Jeu d'instructions de 35 instructions.
- Une mémoire de programme de type FLASH sur 8K mots (1 mot=14 bits).
- Une mémoire de donnée de type RAM sur 368 octets.
- Une mémoire de données de type EEPROM sur 256 octets
- Une pile (Stack) à 8 niveaux.
- 14 sources d'interruptions.
- Un chien de garde WDT (Watch Dog Timer).
- Timer 0 (Compteur 8 bits avec pré-diviseur)
- Timer 1 (compteur 16 bits avec pré-diviseur et possibilité d'utiliser une horloge externe).
- Timer 2 (Compteur 8 bits avec pré-diviseur et post-diviseur).
- Un convertisseur analogique numérique 10-bits à 8 entrées multiplexés.
- Deux modules de capture/comparaison/PWM.
- Port Entrées/sorties : A,B,C,D et E.
- Une interface de communication série (MSSP, USART).

- Une interface de communication parallèle (PSP).
- Tension e fonctionnement est entre 2.0V et 5.5V.

III.2.7 Architecture interne du PIC 16F877A

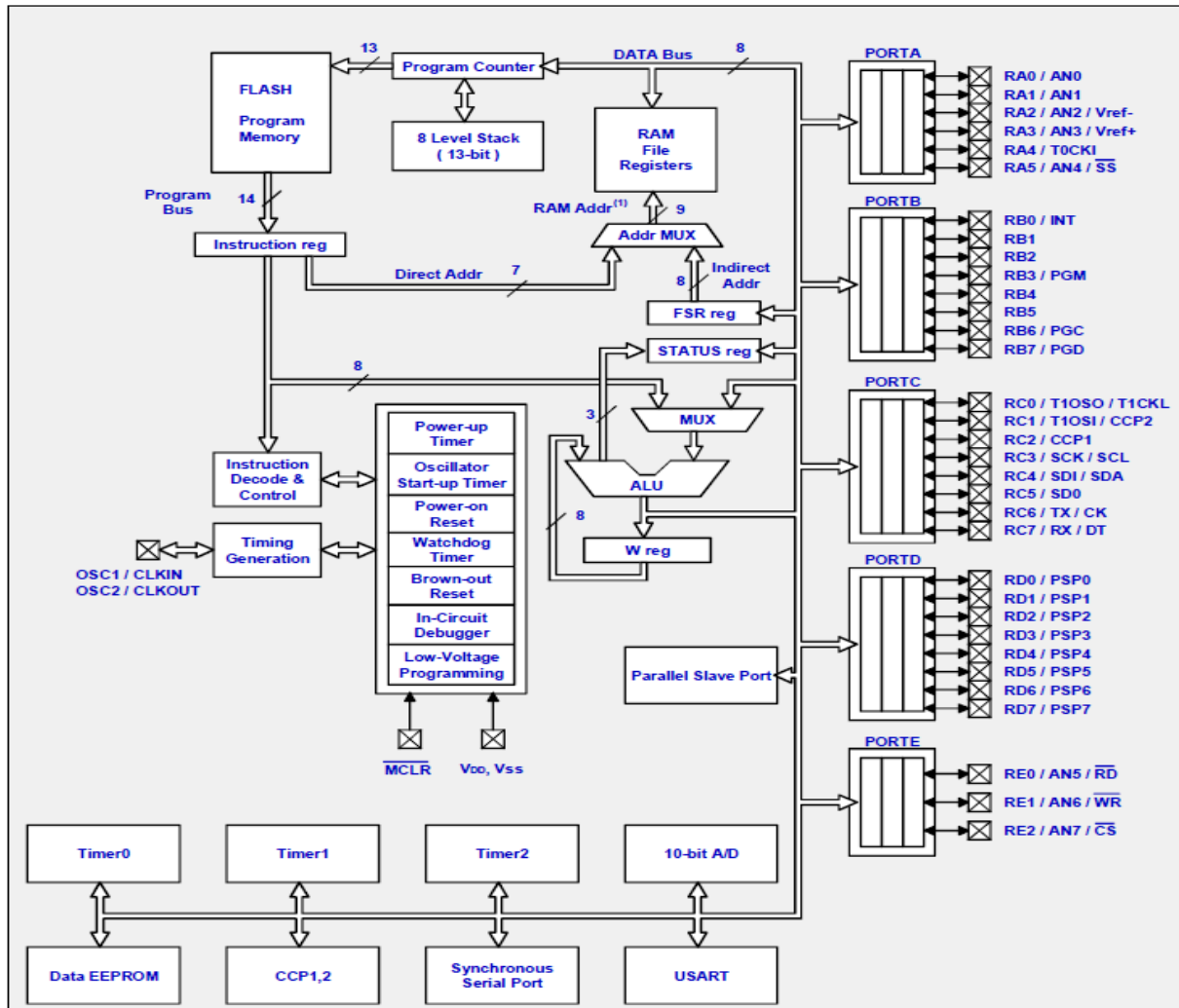


Fig. (III-8) : Architecture interne du PIC 16f877A.

III.2.8 Les éléments de base du PIC 16F877A

- **L'horloge** : l'horloge peut être soit interne ou externe. L'horloge interne est constituée d'un oscillateur à quartz ou d'un oscillateur RC.

Quel que soit l'oscillateur utilisée, l'horloge système dite aussi horloge instruction est obtenue en divisant la fréquence par 4.

- **L'ALU et l'accumulateur W** :

L'ALU est une unité arithmétique et logique 8 Bits qui réalise les opérations arithmétiques et logiques de base/ L'accumulateur W est un registre de travail 8 bits, toutes les opérations à deux opérandes passant par lui :

- Une instruction sur un seul opérande qui est en général un registre situé dans la RAM.
- Une instruction sur deux (02) opérandes. Dans ce cas, l'un des deux opérandes est toujours l'accumulateur W, et l'autre peut être soit un registre ou une constante.

Pour les instructions dont un des opérandes est un registre, le résultat peut être récupéré soit dans l'accumulateur, ou dans le registre lui-même.

- **La mémoire RAM**

L'espace mémoire RAM adressable est de 512 positions de 1 octets chacune :

- 96 positions sont réservées au SFR (Special Function Registers) qui sont les registres de configurations du PIC.
- Les 416 positions restantes constituent les registres GPR (General Purpose Registers) ou RAM utilisateur. Sur le 16F877A, 3 blocs de 16 Octets chacun ne sont pas implantés physiquement d'où la capacité de la RAM utilisateur de 368 GPR, elle est répartie de la manière suivante :
 - ✓ 80 octets en banque 0.
 - ✓ 80 octets en banque 1.
 - ✓ 96 octets en banque 2.
 - ✓ 96 octets en banque 3.
 - ✓ 16 octets communs aux 4 banques.

- **Le module de conversion Analogique/Numérique (CAN) :**

Ce module est constitué d'un convertisseur analogique Numérique 10 bits dont l'entrée analogique peut être connectée sur l'une des 8 entrées analogiques externes.

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

Les tensions de références permettant de fixer la dynamique du convertisseur. Elles peuvent être choisies parmi V_{0dd}, V_{ss}, V_{ref+} ou V_{ref-}.

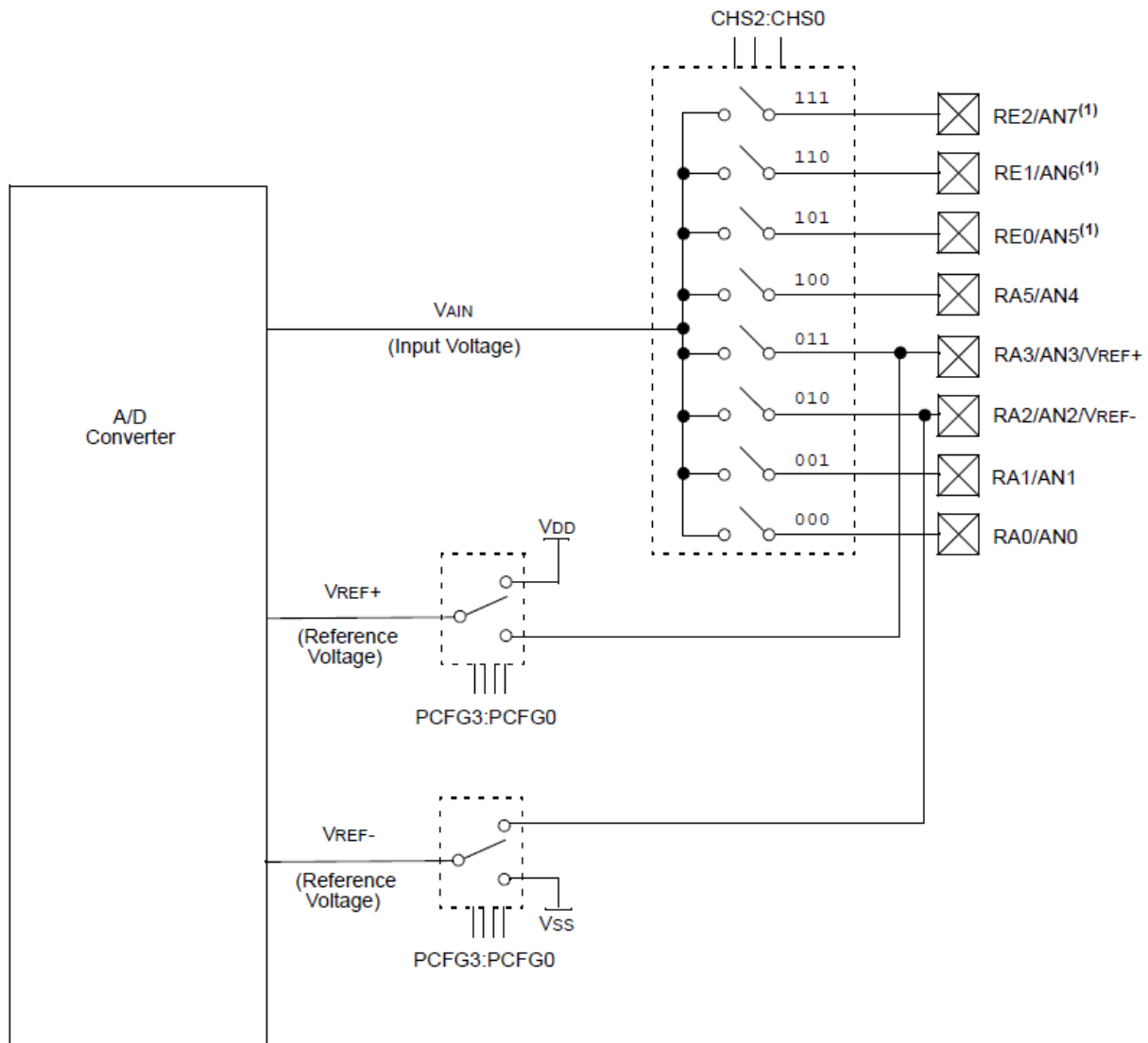


Fig. (III-9) : Schéma synoptique du convertisseur Analogique numérique.

III.2.8.1 Le capteur de tension

Ce capteur est tout simplement un diviseur de tension constitué de 2 résistances.

Il divise la tension aux bornes des batteries par 3. C'est-à-dire, lorsque nous avons 15V en entrée du capteur nous avons en sortie du capteur 5V. Les mesures vont décroissant jusqu'à 0V.

Nous avons des batteries de 12V, mais nous avons commencé à 15V par mesure de sécurité.

Pour déterminer les valeurs des résistances, nous avons effectué des calculs en fixant une résistance $R1=2k\Omega$ et nous avons trouvé la seconde résistance $R2=1k\Omega$.

La tension V_{bat} est mesurée à travers la broche RA1 configurée en entrée A/N, La valeur mesurée sera ensuite convertie en une valeur numérique V_n à travers un convertisseur analogique/numérique intégré en interne.

III.2.8.2 Les éléments de commutation (les relais électromécanique)

Un relais électromécanique est un organe électrique permettant de dissocier la partie puissance de la partie commande : il permet l'ouverture/fermeture d'un circuit électrique par un second circuit complètement isolé et pouvant avoir des propriétés différentes.

Dans notre circuit nous avons utilisé deux type de relais le premiers est un relais 12v alimenté directement depuis la batterie, il est utiliser afin de géré la connexion du panneau. Le second est un relais 5v alimenté partir de régulateur de tension, et il est utilisé pour géré la connexion de la charge.

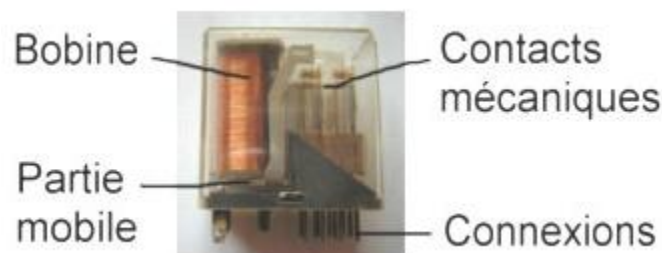
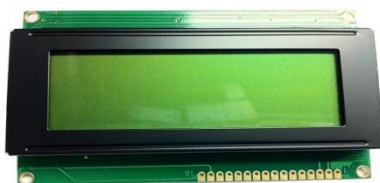


Fig. (III-10) : Relais électromécanique

III.2.8.3 L'interface de communication home machine.

- L'afficheur LCD

Les afficheurs LCD (Liquid Crystal Display) sont devenues incontournables dans toutes applications qui demandent la visualisation de paramètres, il s'agit donc d'une interface Homme/Machine. Il permet d'afficher des informations diverses. le modèle utilisé dans notre application est un afficheur parallèle 16 caractères 2 lignes avec affichage rétro éclairé vert.



Face avant



Face arrière

Fig. (III-11) : Afficheur LCD

Nous utilisons l'écran LCD pour afficher différentes informations tels que:

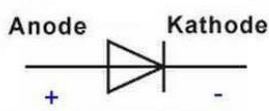
- le fonctionnement de notre système
- le niveau des batteries

- **Les leds**

Sur notre carte électronique, nous avons utilisé 3 leds rouge, orange et verte.

- La led verte indique que le niveau de charge de la batterie est correct.
- La led orange indique que le relais qui gère le panneau est commandé (panneaux déconnecté), afin d'éviter la surcharge de la batterie.
- La led rouge indique que le relais qui gère la charge est commandé (Charge déconnecté), pour éviter la décharge profonde de la batterie.

Les caractéristiques de la led:



$I_f=20\text{mA}$
 $V_f=2\text{v}$



Fig. (III-12) :

III.2.8.4 Le régulateur de tension (12v-5v) :

Ce régulateur est un LM7805 qui permet la régulation d'une tension environ égale à 12V en une tension de sortie égale à 5V. Nous utiliseront la tension de sortie de régulateur pour alimenter le microcontrôleur et l'afficheur Lcd.

C1 et C2 : des condensateurs dont la capacité est de 100pF, branchés aux bornes du régulateur pour filtrer la tension d'entrée (diminuer les ondulations d'entrée).

III.2.8.5 Diode anti-retour type « 1N5408 »

Caractérisée par une tension inverse maximale V_{RRM} de 1000V, et un courant direct maximal de 3A. Elle est insérée afin d'éviter la décharge de la batterie dans le panneau quand la tension de ce dernier tombe au-dessous de la tension de la batterie (périodes nocturnes).

III.2.9 L'organigramme de programme

L'algorithme à implémenter est schématisé par l'organigramme ci-dessous.

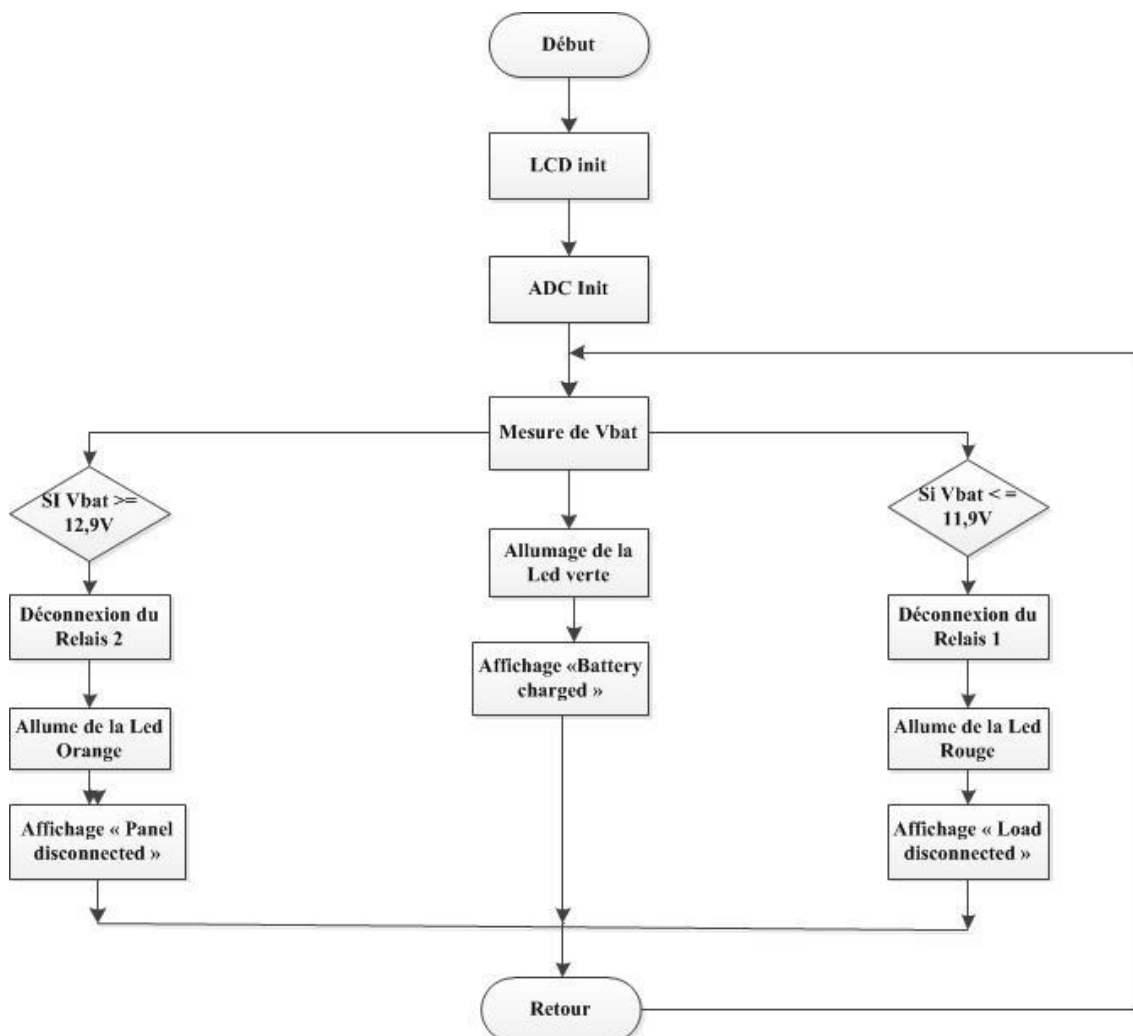


Fig. (III-13) : Organigramme du fonctionnement

III.2.10 Principe de fonctionnement :

Le microcontrôleur récupère la tension captée au borne de batterie à travers la broche RA2 de port A qui est configuré en convertisseur analogique numérique, puis après avoir traité le signal et obtenu une valeur numérique, il procède à la comparaison entre la valeur captée et celle des seuils prédéfinis (high et low) à l'aide d'un comparateur interne, puis il exécute la série d'instructions comme c'est expliqué dans l'organigramme du programme.

III.3 Réalisation de la carte

La réalisation de notre régulateur solaire a été effectuée au laboratoire LATAGE de département d'électrotechnique de l'UMMTO. Nous avons procédé en deux étapes. La

première est la réalisation du circuit imprimé et l'implantation des composants. La seconde, concerne la programmation du Pic16F887A.

III.3.1 Le typon

Réaliser à l'aide de logiciel ARESS, après avoir configuré les paramètres adéquats nous avons tracé les piste en veillant à éviter le chevauchement des lignes et les courts-circuits, le résultat est illustré dans la figure ci-dessous.

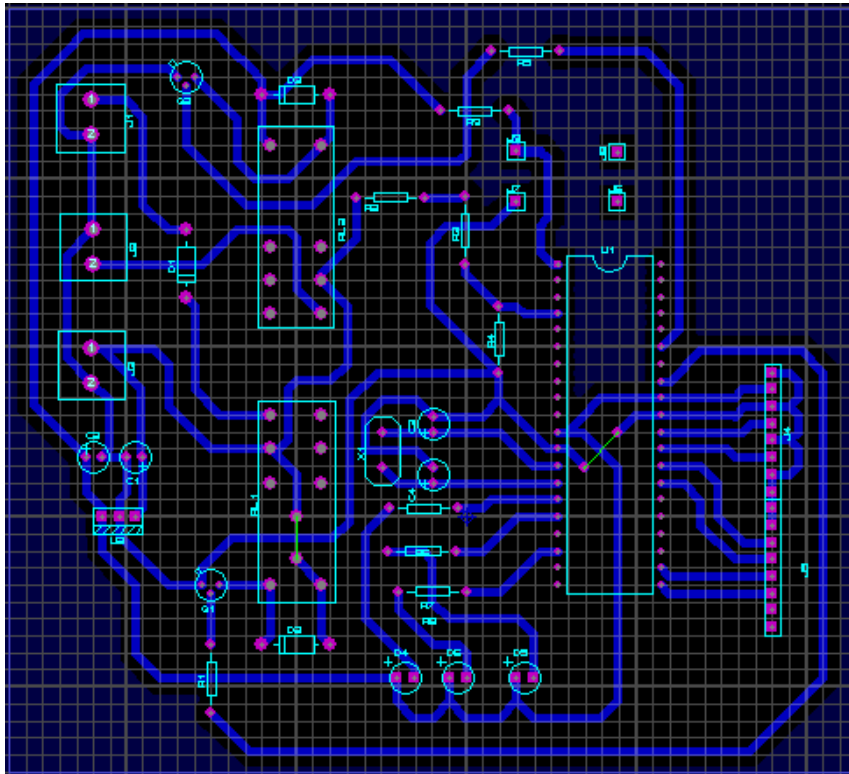


Fig. (III-14) : Implantation des composants

III.3.2 L'insolation

C'est une phase très importante du processus de réalisation d'un circuit imprimé. Il faudrait bien vérifier les points suivants :

- le bon plaquage du typon sur la face sensible du circuit.
- le sens de l'image.
- la distance entre la source de lumière et le typon doit être connue et maintenue constante. En effet il faut maintenir une certaine distance pour assurer une uniformité du point de vue puissance lumineuse.
- il faut respecter la durée d'exposition à la lumière

III.3.3 La gravure

Cette étape consiste à plonger la plaquette de l'insolation dans un bain de perchlorure de fer afin d'éliminer le cuivre non protégé par la résine. Après avoir terminé la gravure, le circuit imprimé est rincé à grande eau. Une fois le circuit sec, on vérifie que tout le cuivre a été éliminé et on vérifie la continuité des pistes et les courts-circuits avec un testeur.

III.3.4 Le perçage

On fixe la plaquette sur une planche en bois afin d'éviter tous mouvements de cette dernière pendant le perçage, et pour le diamètre des trous un foret de 0,8mm pour toutes les pastilles.

III.4 Programmation de pic 16F877A :

Pour la programmation de pic nous avons opté pour le compilateur MicroC pro, car c'est un logiciel complet disposant de tous les outils nécessaires pour l'écriture de notre programme, de même qu'il est simple et facile d'utilisation.

III.5 Présentation de compilateur MikroC pro :

Le langage *MikroC Pro* a trouvé une large application pour le développement de systèmes embarqués sur la base de microcontrôleur. Il assure une combinaison de l'environnement de programmation avancée *IDE* (Integrated Development Environment), et d'un vaste ensemble de bibliothèques pour le matériel, de la documentation complète et d'un grand nombre d'exemples.

Le compilateur *mikroC pro* bénéficie d'une prise en main très intuitive et d'une ergonomie sans faille. Ses très nombreux outils intégrés (mode simulateur, terminal de communication Ethernet, terminal de communication USB, gestionnaire pour afficheurs 7 segments, analyseur statistique, correcteur d'erreur, explorateur de code, mode Débug ICD...) associé à sa capacité à pouvoir gérer la plupart des périphériques rencontrés dans l'industrie (Bus I2C™, 1Wire™, SPI™, RS485, Bus CAN™, USB, gestion de cartes compact Flash et SD™/MMC™, génération de signaux PWM, afficheurs LCD alphanumériques et graphiques, afficheurs LEDs à 7 segments, etc...) en font un outil de développement incontournable pour les systèmes embarqués, sans aucun compromis entre la performance et la facilité de débogage.[5]

III.6 Le fonctionnement du système :

III.6.1 Cas où la batterie est chargée :

La figure(III.14) montre le cas où la batterie est chargée, la tension de la batterie $V_{bat} \in]11.9v, 12.9v[$, le régulateur connecte la charge, allume une Led verte et un message s'affiche sur le LCD "Battery Charged" ce qui veut dire batterie chargée.

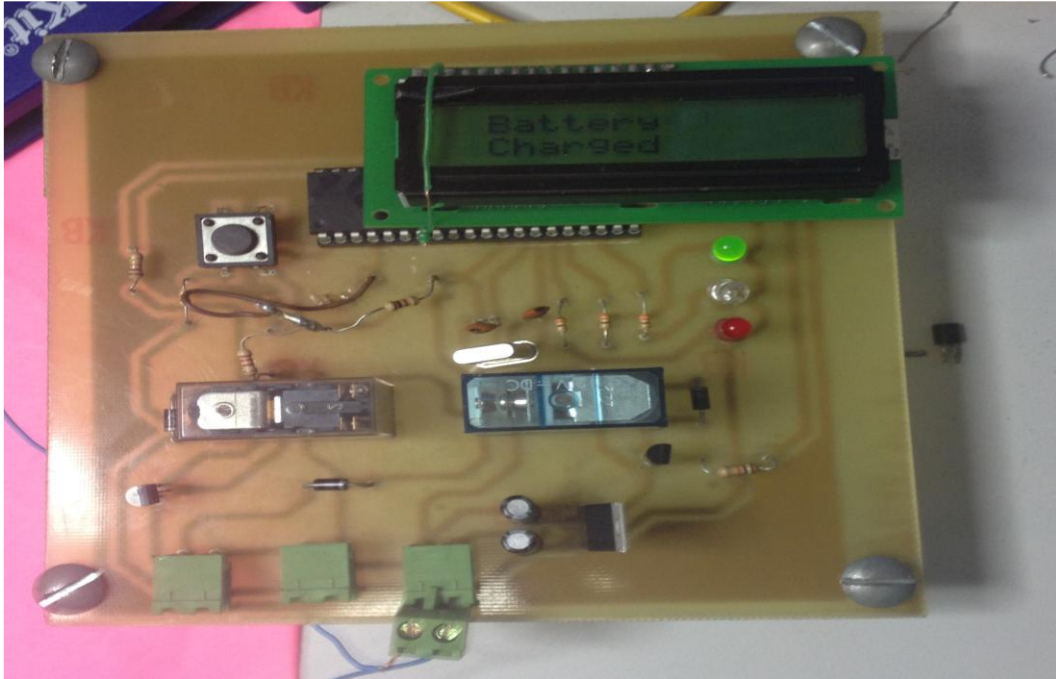


Fig. (III-14) : Cas où la batterie est chargée

III.6.2 Cas où la batterie est déchargée :

Dans ce fonctionnement la tension de la batterie est inférieure ou égale à 11,9v ($V_{bat} \leq 11,9v$) et pour éviter une décharge profonde à cette dernière on déconnecte la charge, une Led rouge s'allume et un message "Load Disconnected" indiquant que la charge est déconnectée.

La figure (III-15) montre ce cas de fonctionnement.

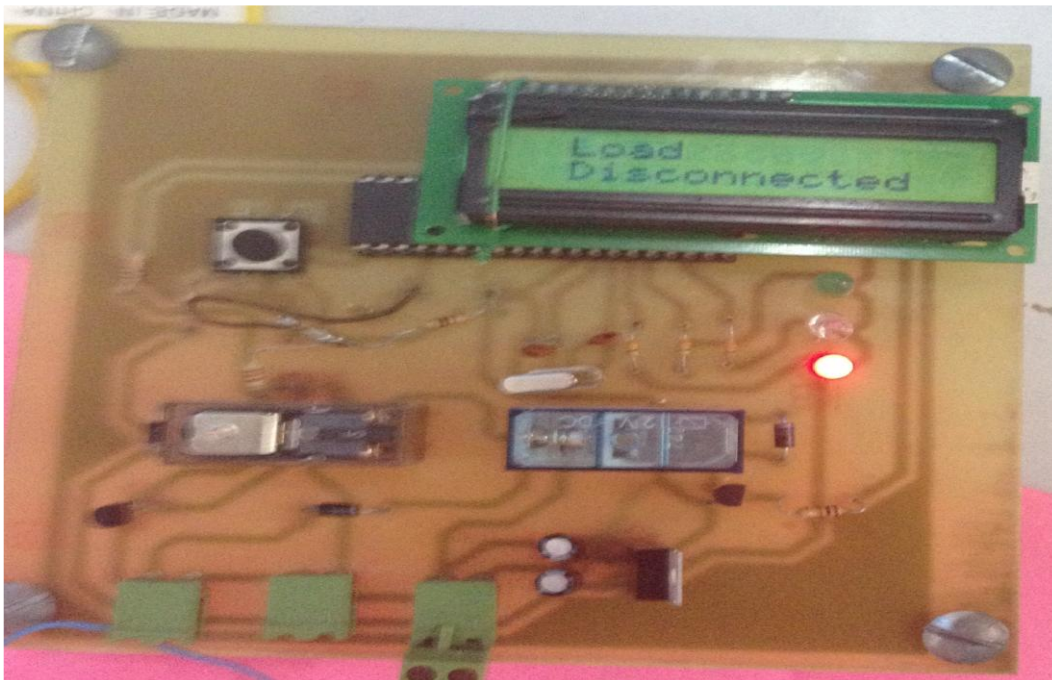


Fig. (III-15) : Cas où la batterie est déchargée

III.6.3 Cas ou la batterie est pleine :

La figure (III-16) montre le cas de fonctionnement batterie pleine, la tension de la batterie est supérieure ou égale à 12,9 v ($V_{bat} \geq 12,9v$), pour éviter une surcharge qui va provoquer une détérioration de cette dernière on déconnecte le panneau, une Led jaune s'allume et un message "Panel Disconnected" indiquant que le panneau est déconnecté.

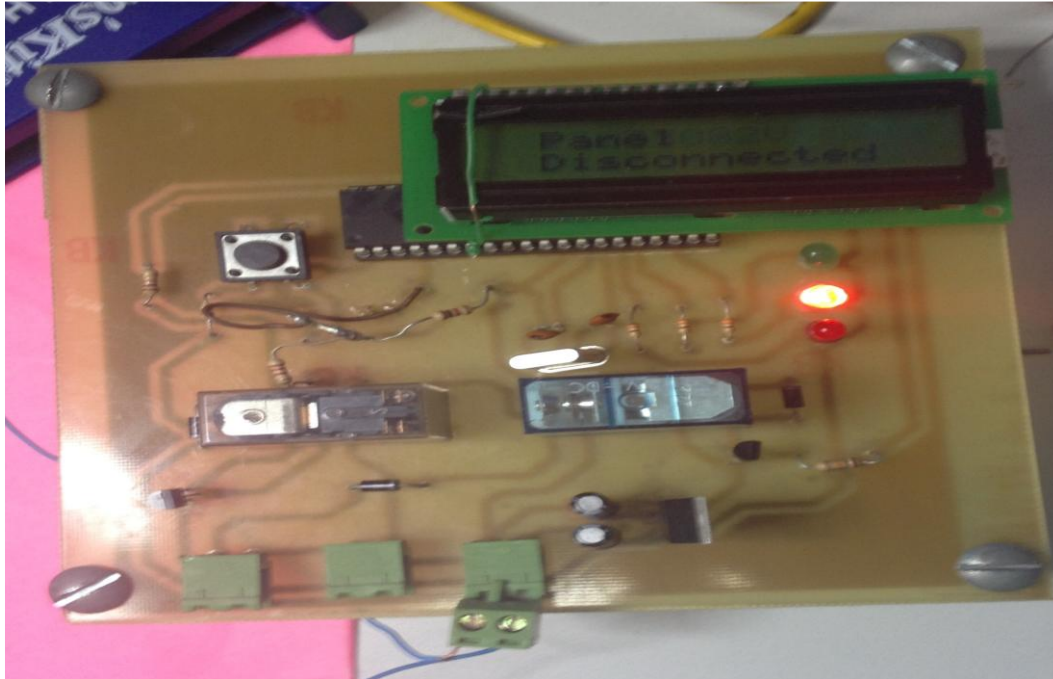


Fig. (III-15) : Cas ou la batterie est pleine

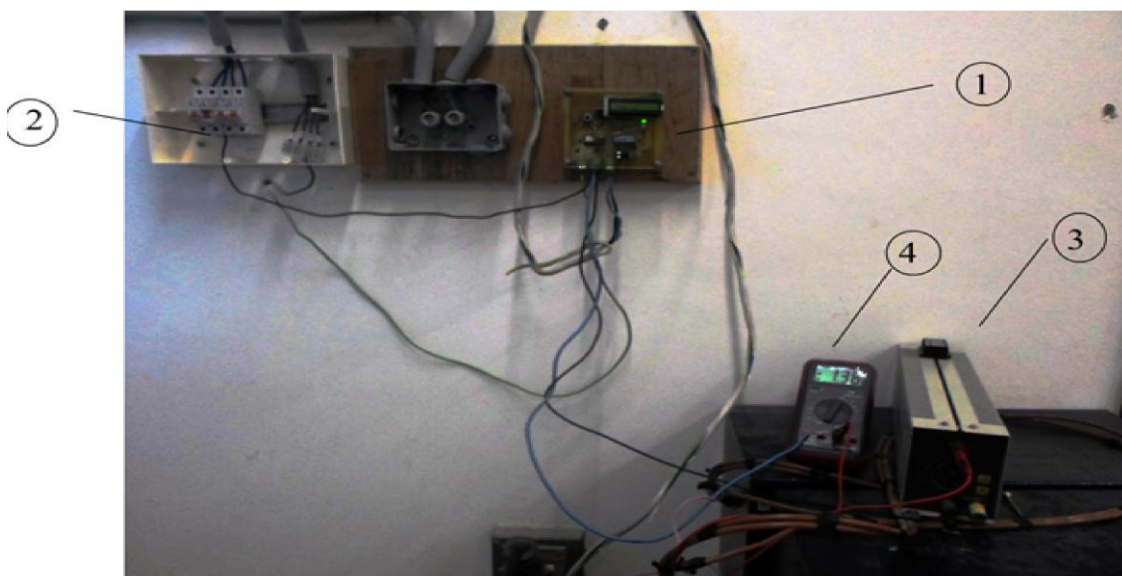


Fig. (III-16) : Banc d'essai

- 1 : Le régulateur de charge
- 2 : Représente la prise du PV qui est installé sur le toit du laboratoire
- 3 : La charge (résistance variable)
- 4 : Multimètre pour la mesure du courant débité à la charge

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons conçu et réalisé un régulateur de charge solaire commandé par un microcontrôleur. Cette application est utilisée pour améliorer le fonctionnement et les performances de l'installation, en assurant une meilleure gestion du système de stockage de l'énergie électrique produite par le panneau photovoltaïque afin d'augmenter la durée de vie de ce dernier, et donc réduire le coût de l'investissement ce qui reviendrait à avoir une production d'énergie a moindre prix.

Conclusion Générale

Conclusion générale

Le développement de la commande des systèmes par circuit programmables a occupé le domaine de la technologie moderne, ce qui nous a poussé à choisir les microcontrôleurs pic qui sont plus fiables, moins encombrants et peuvent être flashés facilement afin d'apporter des mise à jours au système.

L'objectif de ce modeste travail est une contribution pour développer l'utilisation de l'énergie photovoltaïque, notamment dans les systèmes autonomes qui nécessite l'utilisation des accumulateurs qui sont très chers et qui nécessitent un contrôle continu de leur état de charge. Le but envisagé via ce travail est de concevoir un régulateur solaire dont le but est de réguler l'état de charge d'une batterie au plomb acide dans un système photovoltaïque constitué d'un module photovoltaïque, d'une batterie au plomb acide et d'une charge continue.

On a commencé par approfondir et mettre à jour nos connaissances sur le domaine de l'énergie solaire, suivie par des notions de base concernant l'effet photovoltaïques, principe de fonctionnement des cellules photovoltaïques, ensuite nous avons exposé l'algorithme de charge à suivre, en partant par des définitions préliminaires des différents paramètres relatifs à la batterie en question (batterie au plomb acide).

Enfin, nous avons développé l'ensemble du dispositif expérimental, où nous avons décrit en détail chacune des pièces qui composent notre régulateur solaire.

D'après les résultats obtenus, on peut conclure que le régulateur envisagé est bien adapté pour le contrôle de l'état de charge de notre batterie, afin de la protéger contre toute charge et décharge excessive, en assurant une meilleure autonomie au système photovoltaïque et un prolongement de la durée vie notre batterie en diminuant ainsi le coût du système.

Cependant, on peut dire que notre travail nous a permis d'améliorer nos capacités pratiques, il nous a aussi permet d'enrichir nos connaissances dans le domaine des circuits intégrés et des circuits programmables.

Cependant, malgré la satisfaction sur les résultats obtenus puisqu'ils répondent adéquatement aux objectifs fixés au départ. Nous sommes tout de même conscient que, comme dans tout projet, il y'aurait place à l'amélioration.

Nous estimons que ce travail sera enrichi par plus de recherches et investigations notamment sur les points suivants:

- Élargir l'utilisation de notre dispositif pour d'autres applications (charges alternatives), en introduisant dans le système un onduleur « convertisseur DC/AC ».
- Tenir compte de la température de la batterie, en établissant un seuil maximal à ne pas dépasser tout en affichant constamment sa valeur.

En fin, nous espérons que ce modeste travail peut être un fond documentaire appréciable et aussi une modeste référence dans le domaine du photovoltaïque.

Résumé

L'énergie solaire est une source d'énergie inépuisable et propre, mais reste que l'intensité reçue par la terre est variable et très souvent les besoins en électricité ne correspondent pas aux heures d'ensoleillement. Conséquemment, il est nécessaire d'équiper le système par des batteries qui permettent de stocker l'électricité et de la restituer en temps voulu. le couplage direct d'un générateur photovoltaïque et d'une batterie est le plus simple à réaliser, mais il n'offre pas de bonnes performances vu que la batterie est un élément très fragile, elle ne doit pas être trop chargée ou trop déchargée, cela aura comme conséquence son vieillissement très rapide. Pour assurer la meilleure autonomie du système photovoltaïque doté d'une batterie, la régulation de la charge et de la décharge de celle-ci est alors indispensable. Pour cela, il faut intercaler dans le système un "régulateur solaire", dont le rôle est de garder la batterie saine.

Mots clés : énergie solaire, générateur photovoltaïque, batterie, régulateur.

Bibliographie

BIBLIOGRAPHIE

- [1]: A.Zerga: «Optimisation du rendement d'une cellule solaire à base de silicium monocristallin de type n+p », Mémoire de Magister Tlemcen-1998.
- [2] : K.DJERIOUT : « optimisation des rendement des cellules photovoltaïques à hétérojonction » Mémoire de Magister, Université de Tlemcen 2010/2011.
- [3] : Anne Labouret, Michel Villoz : « énergie solaire photovoltaïque » 4^{ème} édition, Dunod 2010 France.
- [4]:Yann.Riffonneau : « Gestion des flux énergétiques dans un système photovoltaïque avec stockage connecte au réseau », thèse de doctorat , Université josph fourier,octobre2009 ,france.
- [5]: Bendjellouli Zakaria :«Contribution à la modélisation d'une cellule solaire mémoire de Magister .Université de.Bechar 2008/2009.
- [6]: M Angel .C.Pastor: « conception et réalisation de modules photovoltaïques électroniques » Thèse de doctorat de l'Institut National des sciences Appliquées de.Toulouse, septembre2006.
- [7]: <http://energies2demain.com/wpcontent/uploads/polycristaline.jpg>..
- [8] : S.MOUHADJER « contribution à l'optimisation du rendement des generateurs photovoltaïques et éolienne par l'intégration des systèmes électroniques d'adaptation à commandes MPPT . thèse de Doctorat, Université de Tlemcen 2010.
- [9] : bouden abdelmaliek : « Analyse optimisée de système de pompage photovoltaïque ». Mémoire de Magister 2008, Université Mentouri de Constantine.
- [10] : DJERIOU SALIM « Simulation d'un système photovoltaïque alimentant une machine asynchrone », thèse de magister ; Université de Sétif 2011.
- [11]: N. Achaïbou, A Malek, N Bacha « Modèle de vieillissement des batteries plomb acide dans l'installation PV » ; N. spécial (CHEMSS), pp 61-66,2000.
- [12]: Julien LABBÉ: hydrogène L'électrolytique comme moyen de stockage D'électricité pour systèmes photovoltaïques isolés .l'école des mines de paris .décembre 2006 .
- [13]: <http://fr.wikipedia.org/wiki/Fichier:Lithium-Ionen-Accumulator.jpg>
- [14]: « Technologies and comparisions », Energy Storage Association, <http://electricitystorage.org/>, 2007
- [15]: JONES R.*Bringing Nickel-Hydrogen Down to earth* Batteries Internationall Avril 1993
- [16]: Belhadj Mohammed « Modélisation D'un Système De Captage photovoltaïque Autonome », Mémoire de Magister 2007/2008, Université de Béchar.

[17] : Si Salah M.cherif « Etude et réalisation d'un régulateur photovoltaïque à base du pic 16F84A », DEUA ELN, UMMTO, 2008.

[18] : http://fr.wikipedia.org/wiki/Accumulateur_%C3%A9lectrique

[19] : www.mikroe.com/en/suport.

[20]: Eric P. Usher and Michael M.D. Ross «Recommended practices for charge controllers»
Report IEA PVPS T3-05:1998.

Annexes



2N2222

TO-18
Metal Can Package

Switching and Linear Application DC and VHF Amplifier Applications

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS (Ta=25°C unless specified otherwise)

| DESCRIPTION | SYMBOL | 2N2221, 22 | UNIT |
|--|----------------|-------------|-------|
| Collector Emitter Voltage | V_{CE0} | 30 | V |
| Collector Base Voltage | V_{CB0} | 60 | V |
| Emitter Base Voltage | V_{EB0} | 5 | V |
| Collector Current Continuous | I_C | 800 | mA |
| Power Dissipation @Ta=25°C | P_D | 500 | mW |
| Derate Above 25°C | | 2.28 | mW/°C |
| Power Dissipation @ Tc=25°C | P_D | 1.2 | W |
| Derate Above 25°C | | 6.85 | mW/°C |
| Operating and Storage Junction Temperature Range | T_j, T_{stg} | -65 to +200 | °C |

ELECTRICAL CHARACTERISTICS (Ta=25°C unless specified otherwise)

| DESCRIPTION | SYMBOL | TEST CONDITION | VALUE | | UNIT |
|--------------------------------------|-----------------|----------------------------------|-------|-----|---------|
| | | | MIN | MAX | |
| Collector Emitter Breakdown Voltage | BV_{CEO} | $I_C=10mA, I_B=0$ | 30 | | V |
| Collector Base Breakdown Voltage | BV_{CBO} | $I_C=10\mu A, I_E=0$ | 60 | | V |
| Emitter Base Breakdown Voltage | BV_{EB0} | $I_E=10\mu A, I_C=0$ | 5 | | V |
| Collector Leakage Current | I_{CBO} | $V_{CB}=50V, I_E=0$ | | 10 | nA |
| | | $V_{CB}=50V, I_E=0$ Ta=150 °C | | 10 | μA |
| Collector Emitter Saturation Voltage | $V_{CE(sat)}$ * | $I_C=150mA, I_B=15mA$ | | 0.4 | V |
| | | $I_C=500mA, I_B=50mA$ | | 1.6 | V |
| Base Emitter Saturation Voltage | $V_{BE(sat)}$ * | $I_C=150mA, I_B=15mA$ | 0.6 | 1.3 | V |
| | | $I_C=500mA, I_B=50mA$ | | 2.6 | V |



MC78XX/LM78XX/MC78XXA

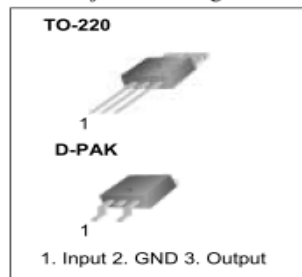
3-Terminal 1A Positive Voltage Regulator

Features

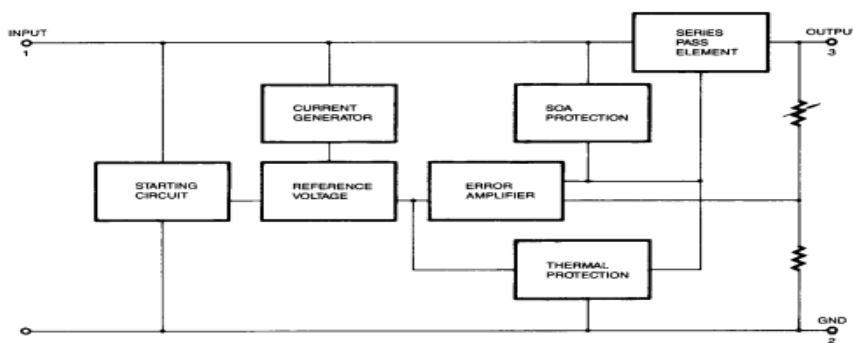
- Output Current up to 1A
- Output Voltages of 5, 6, 8, 9, 10, 12, 15, 18, 24V
- Thermal Overload Protection
- Short Circuit Protection
- Output Transistor Safe Operating Area Protection

Description

The MC78XX/LM78XX/MC78XXA series of three terminal positive regulators are available in the TO-220/D-PAK package and with several fixed output voltages, making them useful in a wide range of applications. Each type employs internal current limiting, thermal shut down and safe operating area protection, making it essentially indestructible. If adequate heat sinking is provided, they can deliver over 1A output current. Although designed primarily as fixed voltage regulators, these devices can be used with external components to obtain adjustable voltages and currents.



Internal Block Diagram





1N5400 Thru 1N5408

3 AMP PLASTIC SILICON RECTIFIER

FEATURES

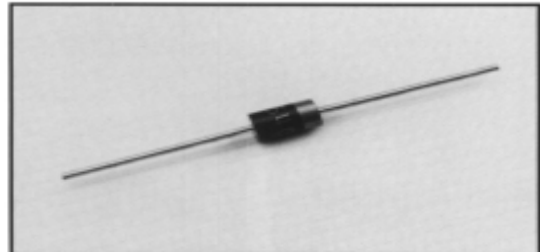
- Rating to 1000V PRV
- Low cost
- Diffused junction
- Low leakage
- Low forward voltage drop
- High current capability
- Easily cleaned with freon, alcohol, chloroethene and similar solvents
- UL recognized 94V-O plastic material

Mechanical Data

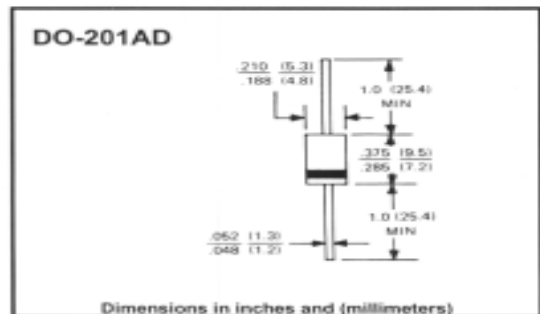
- Case: JEDEC DO-201AD
- Terminals: Axial leads, solderable per MIL-STD-202, Method 208
- Polarity: Color band denotes cathode
- Weight: 0.04 ounce, 1.1 grams
- Mounting Position: Any

Maximum Ratings & Characteristics

- Ratings at 25° C ambient temperature unless otherwise specified
- Single phase, half wave, 60Hz, resistive or inductive load
- For capacitive load, derate current by 20%



Outline Drawing



| | | 1N5400 | 1N5401 | 1N5402 | 1N5403 | 1N5404 | 1N5405 | 1N5406 | 1N5407 | 1N5408 | Units |
|--|-----------------|-------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------------|
| Maximum Recurrent Peak Reverse Voltage | V_{RRM} | 50 | 100 | 200 | 300 | 400 | 500 | 600 | 800 | 1000 | V |
| Maximum RMS Voltage | V_{RMS} | 35 | 70 | 140 | 210 | 280 | 350 | 420 | 560 | 700 | V |
| Maximum DC Blocking Voltage | V_{DC} | 50 | 100 | 200 | 300 | 400 | 500 | 600 | 800 | 1000 | V |
| Maximum Average Forward Rectified Current, .500" (12.7mm) Lead Length | $I_{(AV)}$ | 3.0 | | | | | | | | | A |
| Peak Forward Surge Current 8.3 ms Single Half-Sine-Wave Superimposed On Rated Load | I_{FSM} | 200 | | | | | | | | | A |
| Maximum Forward Voltage At 3.0A DC | V_F | 1.0 | | | | | | | | | V |
| Maximum DC Reverse Current At Rated DC Blocking Voltage | I_R | 10 | | | | | | | | | μA |
| Typical Junction Capacitance (Note 1) | C_J | 50 | | | | | | 25 | | | pF |
| Typical Thermal Resistance (Note 2) | $R_{\theta JA}$ | 15 | | | | | | | | | $^{\circ}C/W$ |
| Operating Temperature Range | T_J | -65 to +175 | | | | | | | | | $^{\circ}C$ |
| Storage Temperature Range | T_{STG} | -65 to +175 | | | | | | | | | $^{\circ}C$ |

- Notes: 1. Measured at 1.0 MHz and applied reverse voltage of 4.0V DC
2. Thermal resistance Junction to Ambient

Annexe N° 04: Programme en C injecté dans le microcontrôleur

```
// LCD module connections

sbit LCD_RS at RD7_bit;
sbit LCD_EN at RD6_bit;
sbit LCD_D4 at RD5_bit;
sbit LCD_D5 at RD4_bit;
sbit LCD_D6 at RD3_bit;
sbit LCD_D7 at RD2_bit;

sbit LCD_RS_Direction at TRISD7_bit;
sbit LCD_EN_Direction at TRISD6_bit;
sbit LCD_D4_Direction at TRISD5_bit;
sbit LCD_D5_Direction at TRISD4_bit;
sbit LCD_D6_Direction at TRISD3_bit;
sbit LCD_D7_Direction at TRISD2_bit;

// End LCD module connections

unsigned int a;

float b;

char txt[10];

char txt1[] = "Panel";
char txt2[] = "Disconnected";
char txt3[] = "Battery";
char txt4[] = "Charged";
char txt5[] = "Load";
char txt6[] = "Disconnected";

void main()
{
    ADCON0 = 0x05;

    TRISA = 0xFF;           // PORTA is input
    TRISB = 0x00;           // PORTB is output
    TRISC = 0x00;           // PORTC is output
    PORTC = 0xFF;

    ADC_Init();             // Initialize ADC module with default settings
```

```

Lcd_Init(); // Initialize LCD(1)
while(1)
{
    a = ADC_Read(2);
    b = a*0.0048875126*3.18;
    if(b < 11.9)
    {
        PORTB.f2 = 1;
        PORTB.f0 = 0;
        PORTC.f0 = 0;
        PORTC.f1 = 1;
        PORTC.f3 = 1;

        Lcd_Cmd(_LCD_CLEAR); // Clear display
        Lcd_Cmd(_LCD_CURSOR_OFF); // Cursor off
        Lcd_Out(1,3,txt5); // Write text in first row
        Lcd_Out(2,3,txt6);
        Delay_ms(500);
        Lcd_Cmd(_LCD_CLEAR); // Clear display
        Lcd_Cmd(_LCD_CURSOR_OFF); // Cursor off
        FloatToStr(b, txt); //convert value to string (text)
        strcat(txt,"V");
        Lcd_Out(1,3,txt); // Write text in first row
        Delay_ms(400);
    }
    else if(b >= 12.9)
    {
        PORTB.f0 = 1;
        PORTB.f2 = 0;
        PORTC.f3 = 0;
        PORTC.f0 = 1;
        PORTC.f1 = 1;

        Lcd_Cmd(_LCD_CLEAR); // Clear display
        Lcd_Cmd(_LCD_CURSOR_OFF); // Cursor off
        Lcd_Out(1,3,txt1); // Write text in first row
    }
}

```

```

Lcd_Out(2,3,txt2);
Delay_ms(500);
Lcd_Cmd(_LCD_CLEAR);           // Clear display
Lcd_Cmd(_LCD_CURSOR_OFF);     // Cursor off
FloatToStr(b, txt);           //convert value to string (text)
strcat(txt,"V");
Lcd_Out(1,3,txt);             // Write text in first row
Delay_ms(400);
}
else
{
PORTB.f0 = 0;
PORTB.f2 = 0;
PORTC.f1 = 0;
PORTC.f0 = 1;
PORTC.f3 = 1;
Lcd_Cmd(_LCD_CLEAR);         // Clear display
Lcd_Cmd(_LCD_CURSOR_OFF);   // Cursor off
Lcd_Out(1,3,txt3);          // Write text in first row
Lcd_Out(2,3,txt4);
Delay_ms(500);
Lcd_Cmd(_LCD_CLEAR);         // Clear display
Lcd_Cmd(_LCD_CURSOR_OFF);   // Cursor off
FloatToStr(b, txt);         //convert value to string (text)
strcat(txt,"V");
Lcd_Out(1,3,txt);           // Write text in first row
Delay_ms(400);
}
}
}

```