

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE  
UNIVERSITE MOULOD MAMMERI, TIZI-OUZOU



FACULTE DE GENIE ELECTRIQUE ET DE L'INFORMATIQUE  
DEPARTEMENT D'ELECTRONIQUE

**Mémoire de fin d'études**  
**Présenté en vue de l'obtention**  
**du Diplôme d'Ingénieur d'Etat en Electronique**

**Option : Instrumentation.**

***Thème:***

***Conception et réalisation d'un  
régulateur de charge/décharge d'une batterie  
(dans le domaine photovoltaïque) à base du  
PIC 16F876A avec afficheur LCD.***

**Proposé et dirigé par :**

**M<sup>r</sup> : N.ORABIA**

**Conçu et réalisé par :**

**M<sup>r</sup>: LARBANI Sofiane**

**M<sup>r</sup>: KARA Sofiane**

Année universitaire **2008/2009**



## *Dédicaces*

*On dédie ce travail à :*

*Nos chers parents*

*Nos frères et nos sœurs*

*Toute la famille KARA et la*

*Famille LARBANI*

*Mémoire de mon père KARA Boualem et ma  
tante BOUTELDJA Hadjila*

*Nos ami(e) s*

*Toute personne ayant participé de près ou de  
loin à la réalisation de ce travail en général  
et les HACKERS en particulier*

# Sommaire

<i>Introduction générale</i> .....	- 1 -
------------------------------------	-------

## **CHAPITRE I : Les Généralités :**

<b>I-1- Le silicium</b> .....	<b>- 3-</b>
I-1-1- Le procès de fabrication.....	-3-
I-1-2- Le dopage des semi – conducteurs .....	-6-
I-1-3- La jonction PN .....	-8 -
<b>I-2- Energie solaire</b> .....	<b>-10-</b>
I-2-1- Le soleil.....	-10-
I-2-2- Le rayonnement solaire.....	-11-
I-2-3- Le photon.....	-11-
I-2-4- Le nombre d'air masse .....	-12-
<b>I-3- coordonnées géographiques</b> .....	<b>-13-</b>
I-3-1- La latitude et longitude d'un lieu sur la surface de la terre .....	-13-
I-3-2- L'altitude .....	-13-

## **CHAPITRE II : Les générateurs photovoltaïques**

<b>Introduction</b> .....	<b>-14-</b>
<b>II- 1- La cellule solaire ( photopile )</b> .....	<b>-14-</b>
<b>II-2- Effet photovoltaïque</b> .....	<b>-15-</b>
<b>II-3- Cellule solaire sous éclairement</b> .....	<b>-17-</b>
<b>II-4- Les différents types de cellules solaires</b> .....	<b>-18-</b>
<b>II-5- Paramètres des cellules photovoltaïque</b> .....	<b>-20-</b>
II-5-1- caractéristique courant tension et schéma équivalent.....	-20-
II-5-1-1- Cas idéal .....	-21-
II-5-1-2- Cas réel .....	-22-
II-5-2- Paramètres des cellules photovoltaïques .....	-22-
II-5-2-1- Courant de court- circuit , $I_{cc}$ .....	-22-
II-5-2-2- Tension à circuit ouvert , $V_{oc}$ .....	-22-
II-5-2-3- Facteur de forme , $ff$ .....	-23-
II-5-2-4- Le rendement , .....	-23-
<b>II-6- Influence de la température</b> .....	<b>-24-</b>
<b>II-7- Association des cellules photovoltaïques en série et en parallèle</b> .....	<b>-24-</b>
II-7-1- Association en parallèle .....	-25-
II-7-2- Association série .....	-26-
<b>II-8- Constitution d'un générateur photovoltaïque (GPV )</b> .....	<b>-26-</b>
<b>II-9- Protection d'un générateur photovoltaïque</b> .....	<b>-26-</b>
II-9-1- Protection lors de la connexion en parallèle de plusieurs GPV.....	-27-
II-9-2- Protection du GPV constitué de la mise en série d'un grand nombre de cellules PV.....	-27-
<b>II-10- Avantages et inconvénients des systèmes photovoltaïques</b> .....	<b>-27-</b>
II-10-1- Avantages.....	-27-
II-10-2- Inconvénients .....	-28-
<b>II-11- La technologie du silicium cristallin (85% du marché)</b> .....	<b>-28-</b>
<b>II-12- Les caractéristiques des modules photovoltaïques</b> .....	<b>-29-</b>
II-12-1- La puissance .....	-29-
II-12-2- La tension.....	-29-
II-12-3- La surface.....	-29-

<b>II-13- Les applications des systèmes photovoltaïques.....</b>	<b>-29</b>
<b>II-14- Dimensionnement d'une installation photovoltaïque .....</b>	<b>-30</b>
<b>II-15- Mise en place d'un générateur photovoltaïque .....</b>	<b>-30</b>
II-15-1- Réception technique du matériel.....	-30
II-15-2- Emplacement, orientation et inclinaison des modules .....	-30
II-15-2-1- Emplacement des modules .....	-31
II-15-2-2- Choix de l'orientation des modules.....	-31
II-15-2-3- Choix de l'inclinaison des modules.....	-31
II-15-3- Préparation des sites d'installation , génie civil .....	-31
II-15-4- Arrimages des modules sur toiture .....	-31
II-15-5- Local technique .....	-31
II-15-6- Maintenance et entretien.....	-31
II-15-7- Mise en place des batteries.....	-31

## **CHAPITRE III : Le dispositif de stockage de l'énergie électrique**

<b>Introduction .....</b>	<b>-33</b>
<b>III-1- Définition .....</b>	<b>-33</b>
<b>III-2- Différents types d'accumulateurs .....</b>	<b>-33</b>
III-2-1- Les accumulateurs au plomb .....	-34
III-2-1-1- Description .....	-34
III-2-1-2- Principe de fonctionnement.....	-36
III-2-1-5- Caractéristiques de la batterie au plomb.....	-36
III-2-1-5-1- Densité d'énergie et rendement .....	-36
III-2-1-5-2- Décharge .....	-36
III-2-1-5-3- Autodécharge .....	-37
III-2-1-5-4- Charge .....	-37
III-2-1-5-5- Dégazage .....	-38
III-2-1-5-6- Association des batteries série/parallèle .....	-39
III-2-1-5-7- Influence de la température sur la durée de vie des batteries .....	-39
III-2-2- Les accumulateurs au nickel – cadmium .....	-39
<b>III-3- La sécurité et le bon fonctionnement des batteries .....</b>	<b>-39</b>

## **CHAPITRE IV : Régulateur de charge / décharge à base du PIC16F876A**

<b>Introduction.....</b>	<b>-40</b>
<b>IV-1- Définition .....</b>	<b>-40</b>
<b>IV-2- Différents types de régulateurs .....</b>	<b>-40</b>
IV-2-1- Régulation parallèle.....	-40
IV-2-1-1- Régulation parallèle contrôlée par une diode Zener.....	-41
IV-2-1-2- Régulation parallèle contrôlée par une tension de référence ajustable .....	-41
IV-2-2- Régulation série.....	-41
IV-2-2-1- Régulateur série à base de transistor .....	-42
IV-2-2-2- Régulateur série à relais mécanique avec hystérésis ajustable .....	-42
<b>IV-3- Le régulateur photovoltaïque à base du PIC16F876A.....</b>	<b>-43</b>
IV-3-1- Les seuils de charge et de décharge de la batterie .....	-43
IV-3-2- Etude du régulateur photovoltaïque à base du PIC16F876A.....	-43
IV-3-1-2-1- Etude des différents blocs.....	-44
IV-3-1-2-2- Le principe de fonctionnement du régulateur à base du PIC16F876A.....	-49
<b>IV-4- Brève présentation du PIC16F876A.....</b>	<b>-52</b>
IV-4 -1- Aspect externe du PIC16F876A.....	-54
IV-4-2- La mémoire programme (Flash ).....	-54
IV-4-3- La mémoire RAM – Registre .....	-55

IV-4-4- L'UAL et le registre W .....	55-
IV-4-5- Le convertisseur analogique numérique.....	55-
<b>IV-7- Programme du PIC16F876A.....</b>	<b>57-</b>
<b>IV-6- Les organigrammes .....</b>	<b>59-</b>
<b>IV-7- Le programme en basic.....</b>	<b>65-</b>

## ***CHAPITRE V: La réalisation pratique***

<b>Introduction.....</b>	<b>79-</b>
<b>V-1- La réalisation du circuit imprimé et l'implantation des composants .....</b>	<b>79-</b>
V-1-1- Les circuits imprimés.....	79-
V-1-1-1- Le typon .....	79-
V-1-1-2- L'insolation.....	82-
V-1-1-3- La gravure .....	82-
V-1-1-4- Le perçage.....	82-
V-1-2- L'implantation des composants.....	82-
<b>V-2- La programmation du PIC16F876A.....</b>	<b>85-</b>
V-2-1- Micro Basic.....	85-
V-2-2- IC Prog.....	85-
<b><i>Conclusion générale .....</i></b>	<b>.....</b>

## ***Introduction :***

La récente prise de conscience relative aux effets de l'activité humaine sur le climat motive de plus en plus des recherches pour économiser l'énergie et la produire de façon plus écologique. Parallèlement, l'un des grands challenges de l'économie concerne l'énergie et la recherche d'alternatives pour réduire notre dépendance face aux industries pétrolières. Si le photovoltaïque constitue aujourd'hui une énergie renouvelable très prometteuse sur ces deux plans, de nombreux efforts de recherche sont encore à fournir, et ce afin d'augmenter l'efficacité, et de diminuer les coûts .

Pour convertir la lumière émise par le soleil (source inépuisable ou presque d'énergie renouvelable saine et silencieuse) en courant électrique, les cellules photovoltaïques les plus répandues à ce jour utilisent une jonction p-n réalisée à partir d'un substrat de silicium.

Le seul inconvénient d'un système photovoltaïque et qu'il est opérationnel que durant la journée et qu'il est moins efficace durant les jours nuageux ou pluvieux, il faut donc installer des accumulateurs (batteries) qui vont permettre de stocker l'énergie sous forme chimique et pouvoir la restituer plus tard sous formes d'énergie électrique.

On distingue trois types de systèmes photovoltaïque :raccordés au réseau, hybride, et autonomes.

### **1-Systèmes raccordés aux réseaux :**

Dans ce genre de système, le champ photovoltaïque est couplé directement aux réseaux électrique, à l'aide d'un convertisseur courant continu-courant alternatif (CC-CA)

Les accumulateurs ne sont pas nécessaires dans le réseau, à moins que nous voulions une forme autonome d'énergie pendant les pannes d'électricité.

### **2-Systèmes hybrides :**

Ces systèmes reçoivent une partie de leur énergie, d'une ou plusieurs sources supplémentaires (une éolienne ou groupe électrogène ou les deux à la

fois) avec des accumulateurs de stockage d'énergie, et ces systèmes sont indépendants des réseaux de distribution d'électricité.

### **3-Systèmes autonomes :**

Ce sont des systèmes photovoltaïques totalement indépendants d'autre source d'énergie, et ils produisent de l'électricité sans être connecté au réseau électrique.

Dans la majorité des cas un système autonome exigera des batteries pour le stockage d'énergie.

Le problème rencontré dans les systèmes photovoltaïques utilisant des accumulateurs, est que ces derniers doivent être surveillés en permanence par un dispositif nommé régulateur de charge de batterie, qui assure leur bon fonctionnement et leur durabilité.

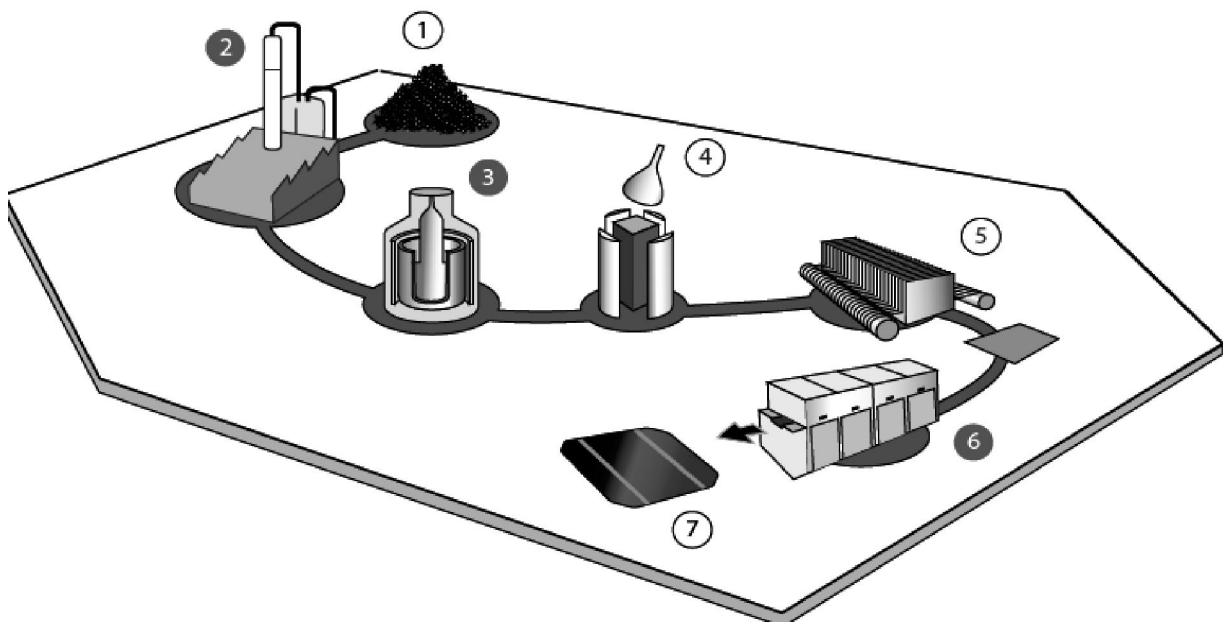
## ***I-1- Le silicium :***

Le silicium est le principal composant des cellules photovoltaïques.

Etape essentielle du cycle de production de ces cellules, la purification du silicium est fortement consommatrice de graphite ultra-pur.

### ***I-1-1- Le procès de fabrication :***

- Silicium métallurgique
- , Production de poly silicium
- f* Fabrication des lingots
- „ Découpe des lingots
- ... Sciage des wafers
- † Enrichissements / traitement de surface
- ‡ Cellule photovoltaïque



***-Fig1- Le procès de fabrication-***

Le silicium est produit à partir du sable. Mélangé à des comburants (charbon...), cette matière première est chauffée dans un four à arc pour donner du silicium liquide qui est ensuite refroidi et “cassé” pour donner des cailloux de silicium pur à 98 %.

Ce silicium est dit “métallurgique” car il est surtout utilisé comme élément d’alliage par les industries de l’acier et de l’aluminium ; une part modeste –mais de plus en plus significative– sert à produire du silicium solaire et électronique.

Pour cela, le silicium métallurgique est purifié puis attaqué chimiquement au chlorure d'hydrogène (HCl) afin de récupérer un gaz, le silane, ou trichlorosilane (TCS) dont la molécule est notamment constituée de silicium.

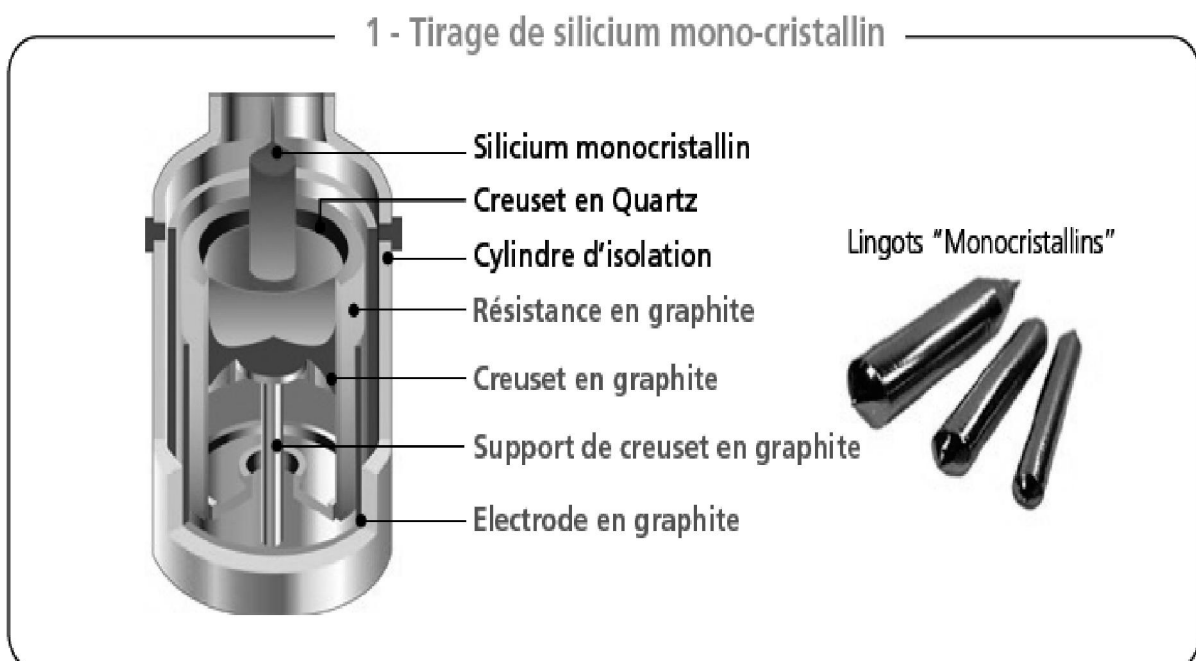
Le silane est "craqué" à très haute température (environ 1600°C) dans un réacteur.

Grâce à un procédé chimique, des atomes se déposent sur le support en silicium chauffé par le courant circulant entre les électrodes, pour former des barreaux de poly silicium. Ces derniers sont ensuite cassés pour obtenir des cailloux de poly silicium très pur. Carbone Lorraine fournit des électrodes en graphite ultra-pur qui sont changées à chaque opération de craquage, des pièces complexes en graphite consommées dans le recyclage du TCS, et des équipements de génie chimique lors de la construction des usines de poly silicium.

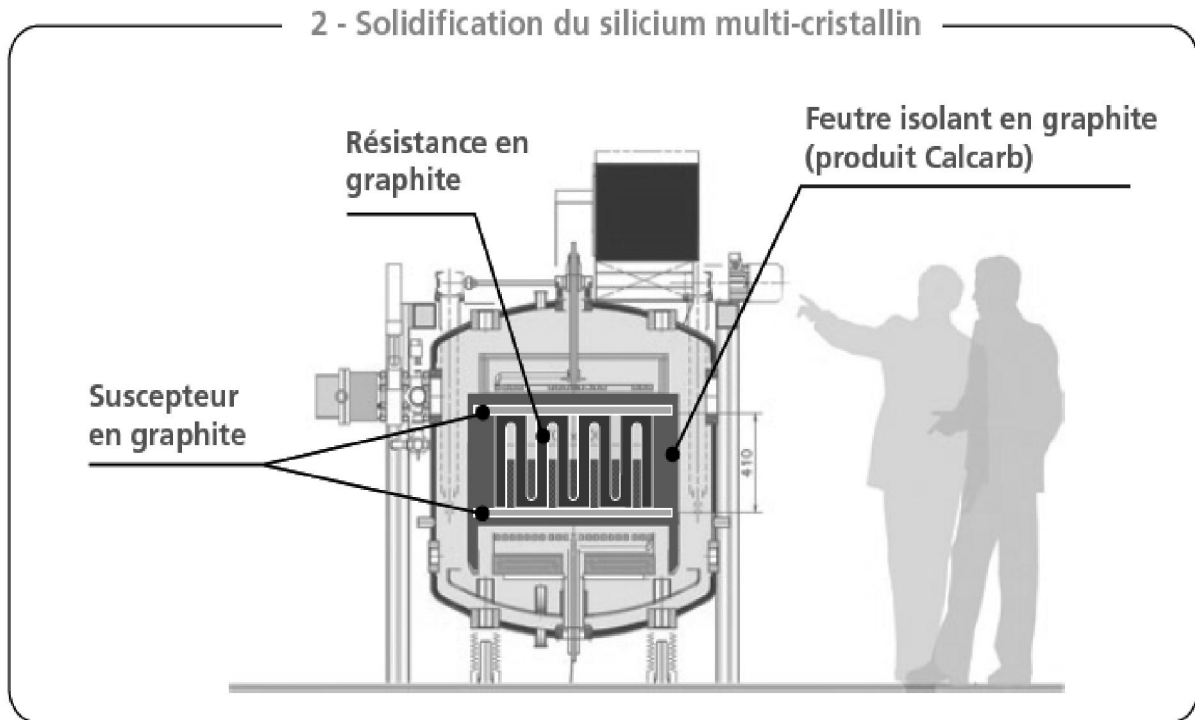
Carbone Lorraine possède un savoir-faire unique dans la fabrication de ces produits à forte valeur ajoutée.

Les cailloux de poly silicium sont ensuite refondus dans des fours à haute température pour fabriquer des lingots de section ronde ou carrée qui constitueront le principal élément d'une cellule photovoltaïque. Pour réaliser cette opération, trois procédés sont principalement utilisés :

- Ø Celui qui consiste à fabriquer par "tirage" un lingot "monocristallin" cher à produire, mais à la structure cristalline parfaite, ce qui optimise le rendement de la cellule photovoltaïque (environ 18 %).

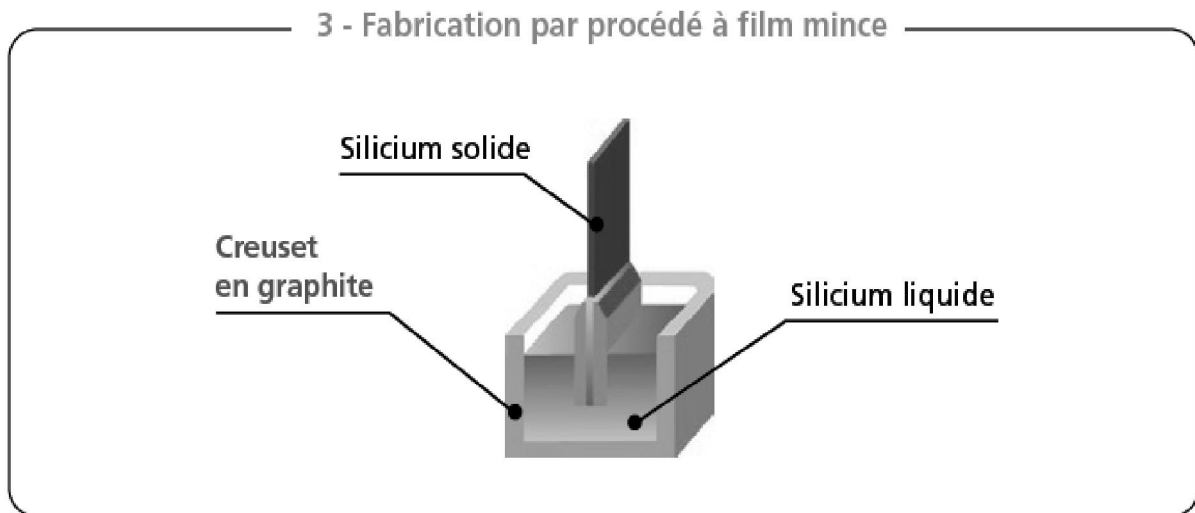


- Ø La technique dite de “solidification dirigée” qui consiste à chauffer le silicium dans un creuset puis à le refroidir lentement pour obtenir un silicium “multi-cristallin” (le rendement photovoltaïque est alors de 13 à 14 %).



**NB :** Ces deux procédés (1 et 2) consomment énormément d'équipements en graphite. Carbone Lorraine offre à ses clients une large gamme d'équipements de haute technologie : revêtements de fours, équipements usinés, creusets, feutres d'isolation.

- Ø Le “ribbon casting” ou procédé à film mince qui produit un ruban multi cristallin dont l'atout est d'être très fin, ce qui permet de minimiser les pertes de silicium dues à la coupe. Le rendement de cette technologie est très faible.



**NB :** Ce procédé consomme moins d'équipements en graphite, mais la valeur ajoutée est très élevée du fait d'usinages très complexes.

Enfin, le silicium est scié en fines plaques de 200 micromètres d'épaisseur appelées "wafers" qui sont ensuite enrichies en éléments dopants.

## I-1-2- Le dopage des semi – conducteurs :

Le silicium intrinsèque a des applications pratiques limitées : photorésistance, thermistance...etc.

Cependant, il est possible en introduisant certaines impuretés en quantité contrôlée, de privilégier un type de conduction : par électrons libres ou trous libres.

### Ø Silicium dopé N :

On obtient un S.C. de type N en injectant dans le cristal de silicium des atomes qui possèdent 5 électrons sur leur couche périphérique (phosphore et arsenic de la 5<sup>ème</sup> colonne de la classification).

Quatre de ces cinq électrons sont mis en commun avec les atomes de silicium voisins pour réaliser des liaisons de covalences. Le 5<sup>o</sup> électron, inutilisé, est très faiblement lié à l'atome pentavalent. Une très faible énergie suffit pour le libérer et il se retrouve "libre" dans la bande de conduction.

L'atome de phosphore qui a fourni un électron libre est appelé atome donneur. Il a perdu sa neutralité pour devenir un ion positif fixe.

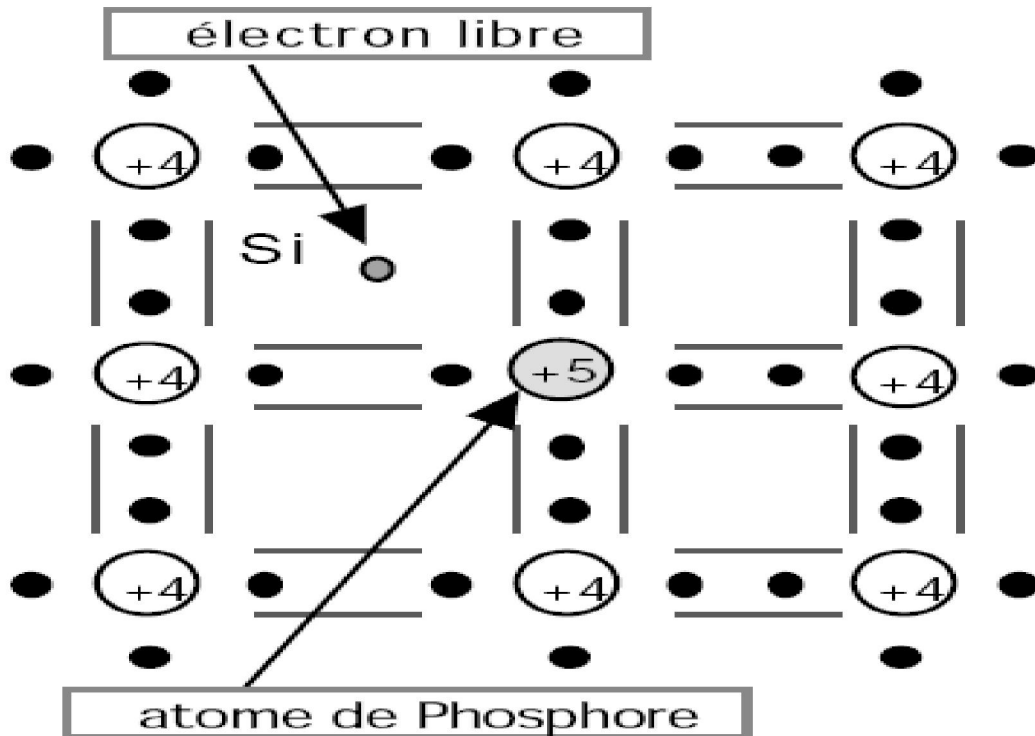
A la température ordinaire, la quasi-totalité des atomes donneurs sont ionisés.

Si  $N_D$  est la concentration des atomes donneurs, ceux-ci vont libérer  $n = N_D$  électrons libres.

Les concentrations en électrons libres ( $n$ ) et en trous libres ( $p$ ) sont liées par la loi d'action de masse :

$$n.p = n_i^2$$

Si  $N_D = n = 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  alors :  $p = 225 \text{ cm}^{-3}$  à  $T = 300 \text{ °K}$   
 Les électrons sont les porteurs majoritaires et les trous les porteurs minoritaires.



### Ø Silicium dopé P :

On obtient un S.C. dopé P en injectant dans le silicium des atomes de la 3<sup>ème</sup> colonne (bore, indium) qui possèdent trois électrons périphériques.

Il manque ainsi un électron à l'atome trivalent pour réaliser les liaisons covalentes avec les quatre atomes de silicium qui l'entourent. En fait, les électrons participant aux liaisons sont indiscernables les uns des autres.

Tout ce passe alors comme si un des atomes de silicium voisin avait cédé un électron à l'atome trivalent de bore, créant ainsi un trou dans le cristal de silicium.

L'atome de bore qui capte un électron est appelé atome accepteur, il a perdu sa neutralité pour devenir un ion négatif fixe.

A la température ordinaire, la quasi-totalité des atomes accepteurs sont ionisés.

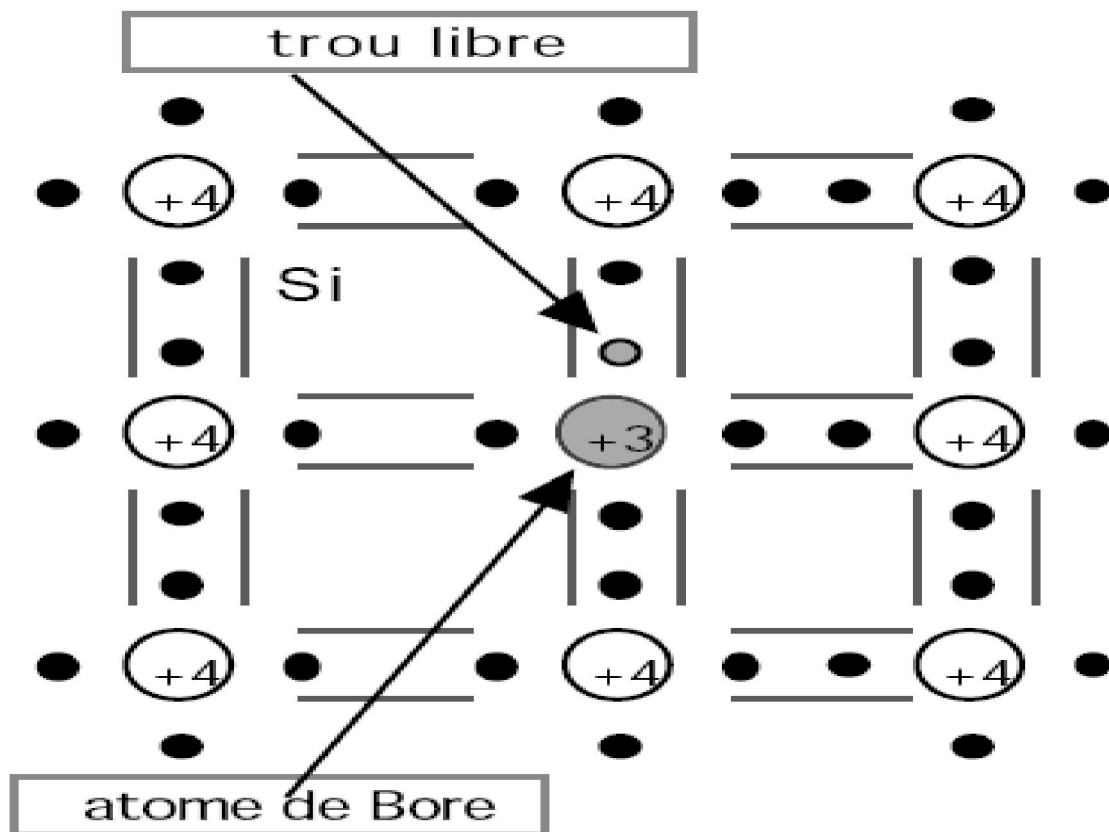
Si  $N_A$  est la concentration par  $\text{cm}^3$  des atomes accepteurs, ceux-ci vont libérer :  
 $p = N_A$  trous libres.

Les concentrations en électrons libres ( $n$ ) et en trous libres ( $p$ ) sont liées par la loi d'action de masse :

$$n \cdot p = n_i^2$$

Si  $N_A = p = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$  et  $n = 2 \cdot 10^4 \text{ cm}^{-3}$  à  $T = 300\text{K}$ .

Les trous sont les porteurs majoritaires et les électrons les porteurs minoritaires.



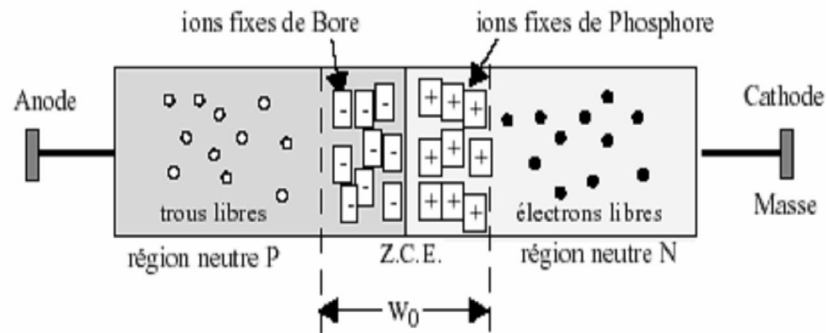
### I-1-3- La jonction PN :

La jonction PN constitue l'élément de base de toute l'électronique, et constitue le module élémentaire dont dépend le fonctionnement d'un grand nombre de dispositifs à semi-conducteurs.

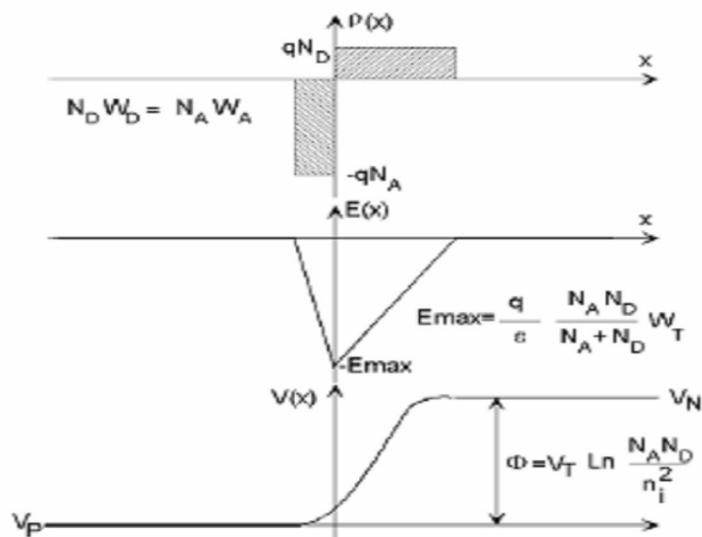
Les résultats obtenus trouveront leurs applications dans de nombreux composants plus complexes.

Une jonction PN est constituée de deux zones respectivement dopées P et N et juxtaposées d'une façon que nous supposons abrupte, c'est-à-dire que la transition de la zone P à la zone N se fait brusquement. Lorsque l'on assemble les deux régions, la différence de concentration entre les porteurs des régions P

et N va provoquer la circulation d'un courant de diffusion tendant à égaliser la concentration en porteurs d'une région à l'autre. Les trous de la région P vont diffuser vers la région N laissant derrière eux des atomes ionisés, qui constituent autant de charges négatives fixes. Il en est de même pour les électrons de la région N qui diffusent vers la région P laissant derrière eux des charges positives. Il apparaît aussi au niveau de la jonction une zone contenant des charges fixes positives et négatives. Ces charges créent un champ électrique E qui s'oppose à la diffusion des porteurs de façon à ce qu'un équilibre électrique s'établisse.



**-Fig.2-La jonction PN-**

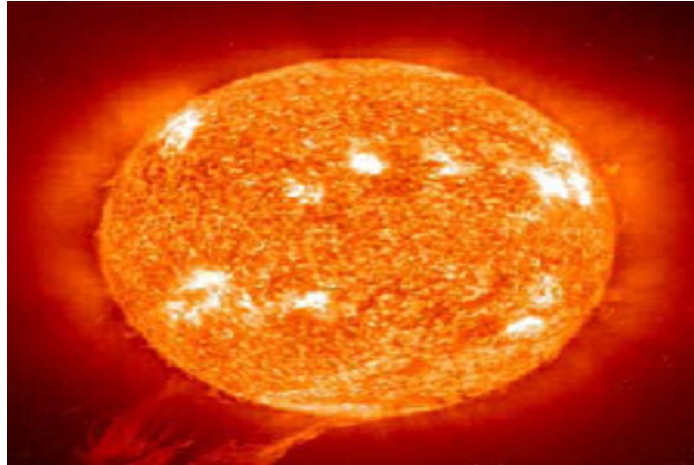


**- Fig.3- Représentation d'une jonction PN à l'équilibre thermodynamique-**

## I-2- Energie solaire :

L'énergie solaire est l'énergie la plus répandue sur terre. Elle est parmi les causes de la vie sur notre planète. La source de cette énergie est l'étoile la plus proche de notre globe, qui est le soleil.

### I-2-1- Le soleil :



Le Soleil est une étoile de 1 392 000 km de diamètre (109 fois le diamètre de la Terre) parmi les milliards de notre galaxie, la Voie lactée. Il est la principale source d'énergie, de lumière et de chaleur dans le Système solaire, ce qui a permis la vie sur Terre. C'est aussi la seule étoile dont il est possible d'observer la composition de près. Le Soleil ne tourne pas aussi rond partout : alors que sa surface effectue une révolution tous les 25,40 jours à l'équateur, il ne lui faut pas moins de 36 jours aux pôles. Cette rotation est responsable de l'activité. En tournant sur lui-même il crée un champ magnétique 5 000 fois plus intense que celui de la Terre.

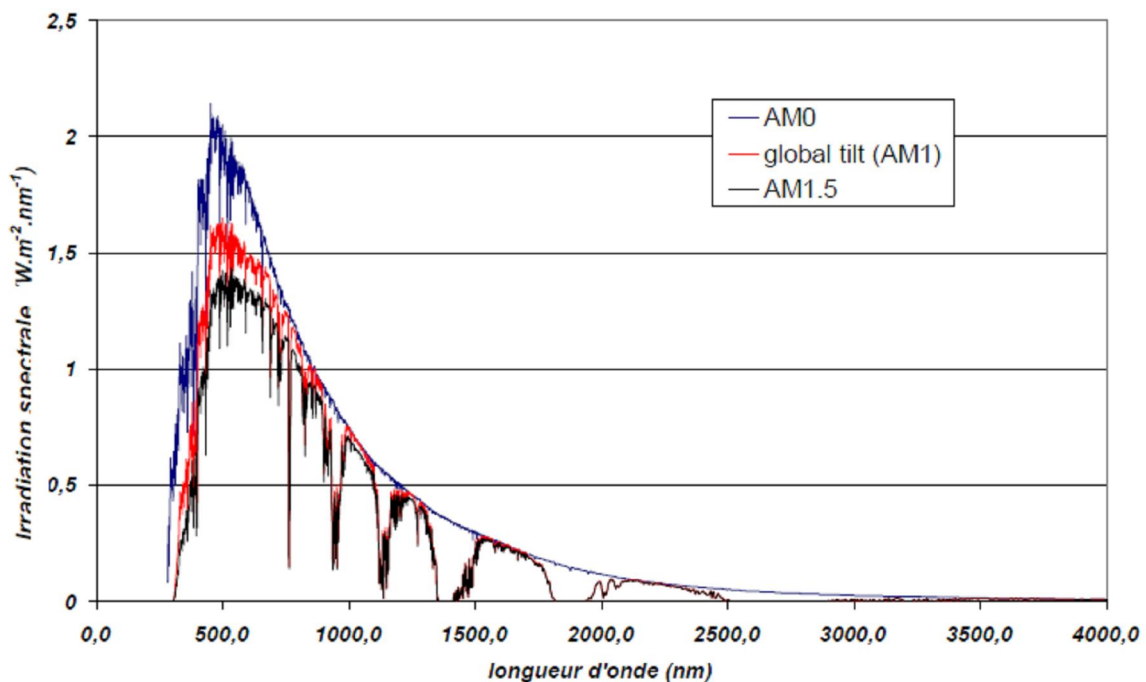
L'énergie solaire se crée profondément dans le noyau du Soleil. C'est là où la température (15 000 000 °C) et la pression (340 milliards de fois la pression terrestre au niveau de la mer) est si intense que des réactions nucléaires ont lieu. Ces réactions provoquent la fusion de quatre protons (noyaux d'hydrogène) pour former une particule alpha (noyau d'hélium). La particule alpha est environ 0,70 % moins massive que les quatre protons. La différence de masse est transformée en énergie et transportée vers la surface du Soleil, par un processus de convection, où elle est libérée sous forme de lumière et de chaleur. L'énergie générée dans le noyau met un million d'années pour atteindre la surface. Chaque seconde, 700 millions de tonnes d'hydrogène sont converties en hélium.

Dans le processus, 5 millions de tonnes d'énergie pure sont libérées. La chromosphère est située au-dessus de la photosphère. L'énergie solaire passe à travers cette région sur son chemin depuis le centre du Soleil

## I-2-2- Le rayonnement solaire :

Le flux d'énergie solaire est transmis sous forme de rayonnements électromagnétiques.

Les longueurs d'ondes du rayonnement solaire terrestre sont comprises entre  $0,2\mu\text{m}$  (ultraviolet) et  $4\mu\text{m}$  (infrarouge) avec un maximum d'énergie pour  $0,5\mu\text{m}$ . 97.5% de l'énergie solaire comprise entre  $0,2\mu\text{m}$  et  $2,5\mu\text{m}$ . De  $0,4\mu\text{m}$  à  $0,78\mu\text{m}$ , le spectre correspond au domaine du visible.



**-Fig 4-Référence ASTM 173-03 : Spectres extraterrestre (AM0), terrestre AM1 et AM1.5.-**

Les capteurs d'énergie solaire doivent donc être compatibles avec ces longueurs d'ondes pour pouvoir piéger les photons et les restituer sous forme de chaleur ou d'électrons

## I-2-3- Le photon :

Quantum d'énergie d'un rayonnement électromagnétique.  
Particule élémentaire sans masse ni charge électrique associée à un tel rayonnement (lumière visible, infrarouge, ultraviolet, gamma ou X suivant son énergie) .

Il a une énergie de valeur :  $E = h \cdot \nu$   
 $h = 6,62 \cdot 10^{-34}$  j/s (constante de Planck) et la fréquence de radiation de ce photon.

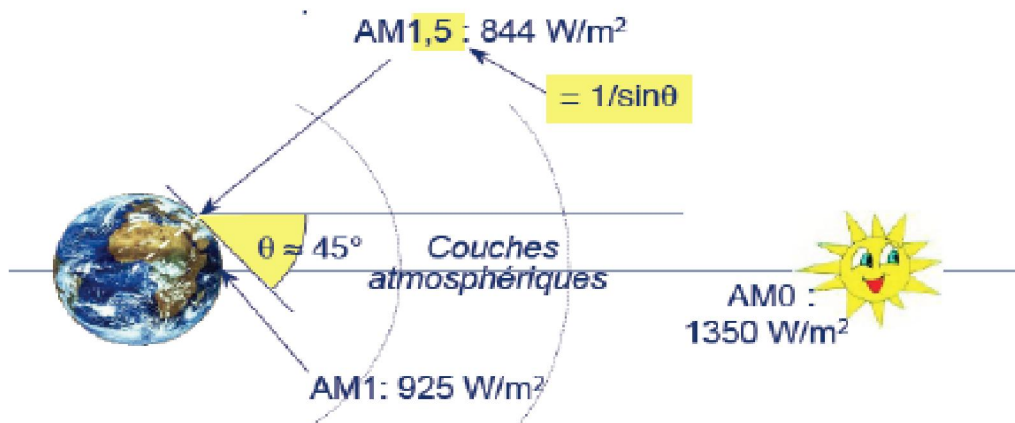
## I-2-4- Le nombre d'air masse :

L'intensité lumineuse issue du soleil normalement incidente sur la surface de la Terre est appelée la constante solaire. Cette constante est approximativement d'une valeur de  $1,4 \text{ kW/m}^2$  au-dessus de la couche atmosphérique et est réduite sur Terre à  $1 \text{ kW/m}^2$  par réflexion et absorption des particules présentes dans la couche atmosphérique. Cette perte est appelée la « masse d'air » (AM).

De manière générale, l'indice  $m$  associée à la masse d'air (AM  $m$ ) est calculé comme

suit :  $m = 1 / \sin(\theta)$

$\theta$  : étant l'angle entre l'incidence des rayons lumineux et l'horizontale à la Terre.



- Fig.5-Description de nombre d'air masse-

La désignation AM0 correspond à une masse d'air nulle pour la lumière arrivant au-dessus de notre atmosphère à incidence normale. Le titre AM1 correspond lui à une même lumière arrivant à la surface terrestre. L'appellation AM1.5 désigne la masse d'air rencontrée pour la lumière arrivant à  $48.2^\circ$  sur la surface de la Terre, soit une lumière plus faible du fait que l'épaisseur de la couche atmosphérique traversée est plus grande.

## I-3- coordonnées géographiques :

### I-3-1- La latitude et longitude d'un lieu sur la surface de la terre :

Soit la terre avec son axe de rotation, ses pôles et son centre alors :  
Quelles sont les coordonnées de la ville V ?

On définit un plan de référence, le plan équatorial.

On mesure l'angle que fait la direction V avec ce plan.

Cet angle est mesuré dans le plan méridien passant par la ville V.

L'angle est la latitude de la ville.

Il se mesure de :

$0^\circ$  à  $+90^\circ$  vers le Nord

$0^\circ$  à  $-90^\circ$  vers le Sud

Pour l'autre coordonnée qui est la longitude, il faut définir un méridien de référence :

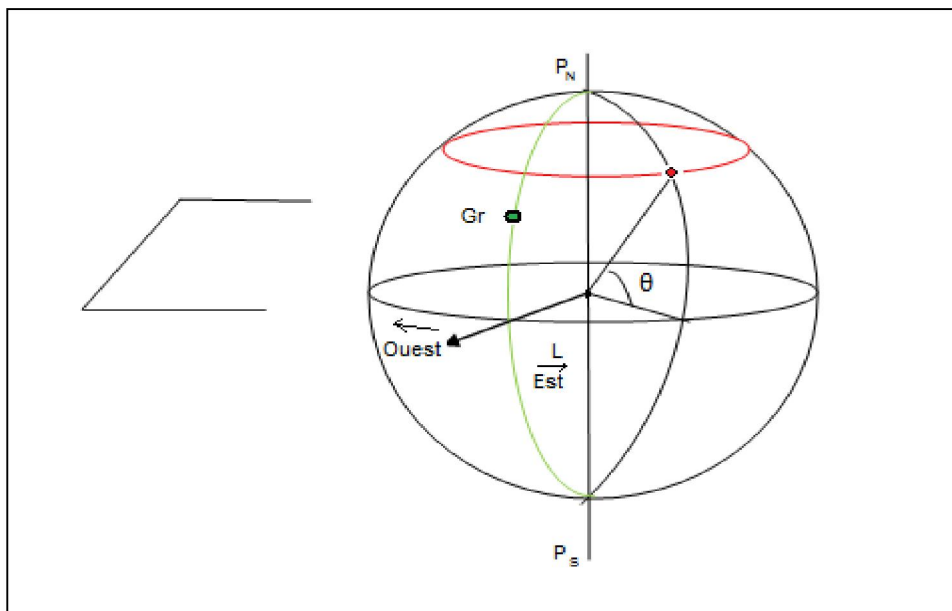
Méridien de Greenwich.

L'angle de L est la longitude de la ville.

Il se mesure de :

$0^\circ$  à  $+180^\circ$  vers l'Ouest

$0^\circ$  à  $-180^\circ$  vers l'Est



- Fig.6 Coordonnées géographiques d'un lieu-

### I-3-2-L'altitude :

L'altitude d'un lieu est la distance verticale (exprimée en mètre) de ce dernier par rapport au niveau de la mer, qui est pris comme niveau de référence.

## **Introduction :**

La cellule solaire est l'élément de base des panneaux solaires qui produisent de l'électricité. Une cellule solaire (ou bien une cellule photovoltaïque) est un composant électronique qui, exposé à la lumière, génère de l'électricité, cet effet est appelé l'effet photovoltaïque, qui a été découvert par le français Edmond Becquerel en 1839.

Ce n'est qu'en 1954 que les laboratoires BELL mettent au point une cellule au silicium capable de convertir directement en électricité l'énergie solaire avec un rendement de 6%.

En 1958, les cellules photovoltaïques trouvent une place dans l'industrie avec l'industrie spatiale américaine qui utilisera des cellules ayant un rendement de 9% pour alimenter ses satellites.

Cependant, au cours des années 80, la technologie photovoltaïque terrestre a progressé régulièrement par la mise en place de plusieurs centrales de quelques mégawatts, et même est devenue familière des consommateurs à travers de nombreux produits de faible puissance y faisant appel : montres, calculatrices, balises radio et météorologiques, pompes et réfrigérateurs solaires.

Mais la technologie photovoltaïque ne connaît son véritable essor qu'à la fin des années 90 avec l'avènement de la connexion au réseau, technologie qui permet d'injecter sur le réseau public d'électricité, l'énergie produite par un générateur photovoltaïque est convertie par un onduleur en courant alternatif.

La recherche est très active dans le domaine du solaire photovoltaïque. Les prix diminuent constamment et les rendements progressent.

En 20 ans, les rendements sont passés de 15% à 36% dans les laboratoires. Ce dernier chiffre serait celui atteint sur Terre par les cellules solaires utilisées par les robots martiens. Les rendements des systèmes disponibles commercialement sont quant à eux passés de 5% à plus de 20%.

## **II- 1- La cellule solaire (photopile) :**

Un panneau photovoltaïque produisant du courant continu (DC) que les batteries peuvent stocker et restituer sous cette forme, pour utiliser des appareils électriques destinataires fonctionnant avec du courant alternatif (AC) au sein d'un générateur photovoltaïque, il faut employer un convertisseur DC / AC (onduleur).

Les équipements destinataires sont les appareils électriques que l'on souhaite alimenter à toute heure du jour ou de la nuit avec le générateur photovoltaïque et qui, sauf impératif sérieux, doivent être soit adaptés à la technique photovoltaïque soit être très économes énergétiquement.

Le système photovoltaïque lui est l'ensemble des générateurs photovoltaïques (panneau solaire, batterie, régulateur de charge décharge, câblage) et des

équipements destinataires. Il est dimensionné de manière à assurer la continuité de la fourniture d'énergie avec des conditions météorologiques variables.

Les seules servitudes d'un générateur photovoltaïque sont de maintenir la demande énergétique au niveau de celle qui a servi à son dimensionnement et de ne pas lui connecter certains appareils énergétivores (lampes à incandescence, radiateur et cuisinière électrique...). La production de froid (réfrigérateur, congélateur) faisant appel à des appareils ultra économes en énergie et le chauffage, production d'eau chaude, cuisson étant assurés par d'autres moyens.

L'installation d'un générateur solaire photovoltaïque élémentaire est très simple à réaliser. Il suffit de fixer les panneaux solaires préalablement occultés sur leur châssis orienté au sud (si hémisphère nord), de relier le régulateur de charge et les équipements destinataires (éteints) à la batterie, de coupler les modules au régulateur et de les découvrir.

La fourniture d'énergie est alors immédiatement gérée par le régulateur et le système photovoltaïque est en ordre de fonctionnement.

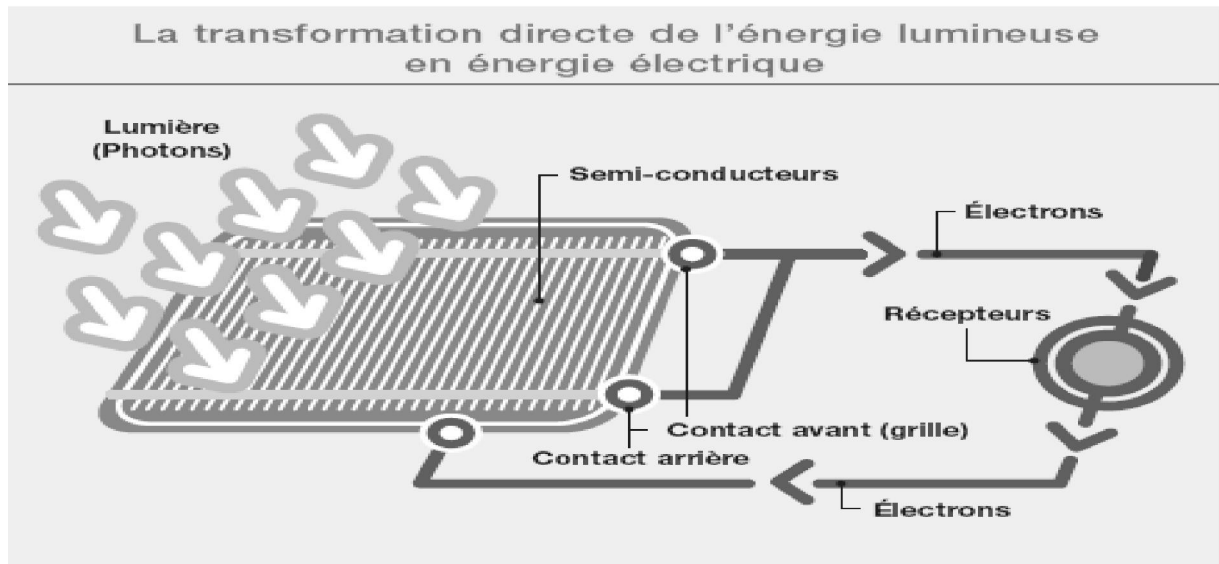
## **II-2- Effet photovoltaïque :**

L'effet photovoltaïque a été mis en évidence pour la première fois en 1839, **par Antoine Becquerel** et son fils. Leur expérience permet d'observer le comportement électrique d'électrodes en platine recouvertes avec du bromure d'Argent émergées dans un liquide, modifié par un éclairage. Il a été compris et présenté en 1887 par **Heinrich Rudolf Hertz** qui en publia les résultats dans la revue scientifique **Annalen der Physik**.

La cellule photovoltaïque est un dispositif électronique à semi-conducteur qui permet la conversion de l'énergie solaire (rayonnement) en énergie électrique continue.

- L'absorption des photons (dont l'énergie est supérieure au Gap).
- Conversion de l'énergie du photon en énergie électrique ce qui correspond à la création de paires  $e^-/trou$ .
- Collecte des particules générées par le dispositif.

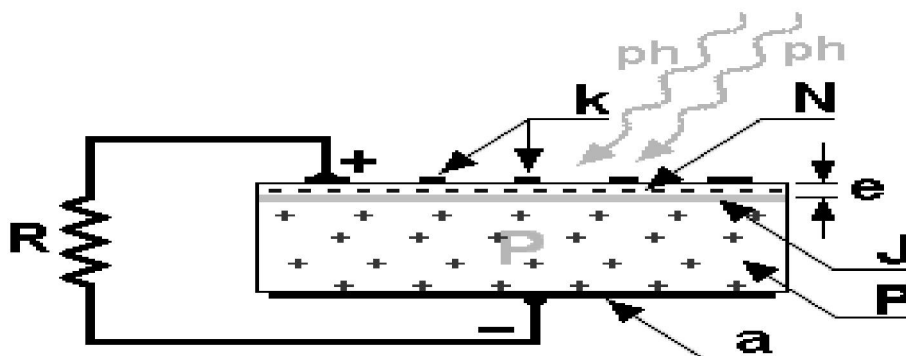
Le matériau constituant la cellule photovoltaïque doit donc posséder deux niveaux d'énergie et être assez bon conducteur pour permettre l'écoulement du courant/ d'où l'intérêt des semi-conducteurs pour l'industrie photovoltaïque.



**-Fig 7-La transformation de l'énergie lumineuse en énergie électrique-**

Un cristal semi-conducteur dopé P est recouvert d'une zone très mince dopée N et d'épaisseur  $e$  égale à quelques millièmes de mm. Entre les deux zones se trouve une jonction J. La zone N est couverte par une grille métallique qui sert de cathode **k** tandis qu'une plaque métallique **a** recouvre l'autre face du cristal et joue le rôle d'anode. L'épaisseur totale du cristal est de l'ordre du mm.

Un rayon lumineux qui frappe le dispositif peut pénétrer dans le cristal au travers de la grille et provoquer l'apparition d'une tension entre la cathode et l'anode.



**-Fig 8-Vue en coupe d'une cellule photovoltaïque-**

## **II-3- Cellule solaire sous éclairement et sous obscurité:**

Le courant délivré sur une charge par une cellule photovoltaïque éclairée s'écrit :

$$I(V) = I_{ph} - I_{obsc}(V)$$

Avec  $I_{ph}$  : densité de courant photogénéré et  $I_{obsc}$  : densité de courant d'obscurité.

Pour une cellule photovoltaïque idéale, l'équation précédente peut être écrite sous la forme suivante :

$$I(V) = I_{ph} - I_s (\exp(qV/kT) - 1)$$

Avec :  $I_s$  : courant de saturation de la diode,  $q$  : charge élémentaire,  $k$  : constante de Boltzman,  $T$  : température.

Ainsi, dans une cellule photovoltaïque, deux courants s'opposent : le courant d'éclairement et un courant de diode appelé courant d'obscurité qui résulte de la polarisation du composant. La caractéristique d'une cellule sous obscurité est identique à celle d'une diode. Sous éclairement, la caractéristique a l'allure présentée sur la fig.2

A partir de la caractéristique  $I(V)$  de la cellule photovoltaïque, on déduit les paramètres électriques propres à la cellule et notamment :

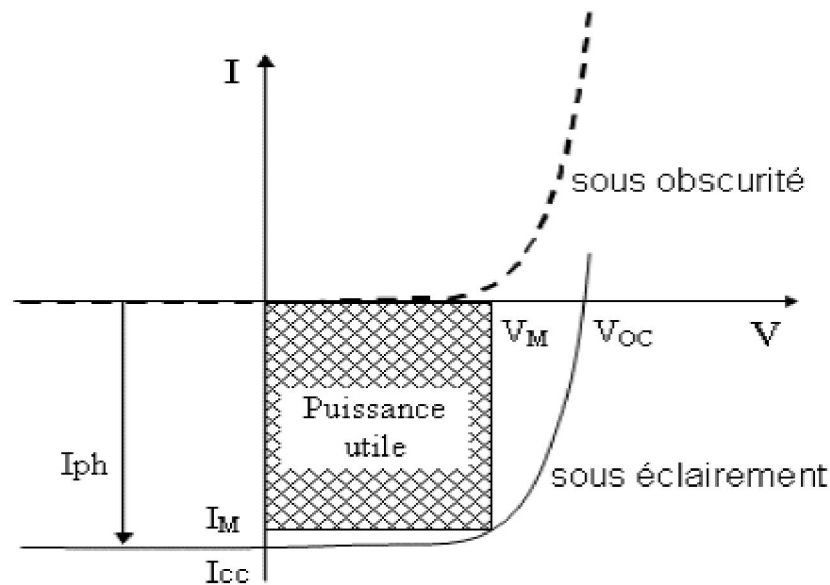
$I_{cc}$  : courant de court circuit (obtenu pour  $V=0$ )

$V_{co}$  : tension en circuit ouvert (obtenu pour  $I=0$ )

$I_m$  : courant à la puissance maximale de fonctionnement de la cellule PV

$\eta$  : rendement de conversion

FF : facteur de forme



**-Fig.9- Caractéristiques  $I=f(V)$  sous obscurité et sous éclairage d'une cellule PV-**

## II-4- Les différents types de cellules solaires :

Le silicium est actuellement le matériau le plus utilisé dans la fabrication de cellules photovoltaïques disponibles à un niveau industriel. D'autres matériaux sont utilisés : tellure de cadmium, arséniure de gallium, di-séléniure de cuivre et d'indium (CIS). Ces technologies sont encore très coûteuses mais elles laissent espérer des rendements bien supérieurs au silicium et une durée de vie plus grande. La production des cellules photovoltaïques nécessite de l'énergie, et on estime qu'une cellule photovoltaïque doit fonctionner pendant plus de dix ans pour produire l'énergie qui a été nécessaire à sa fabrication.

### Ø cellule en silicium amorphe :

Le silicium n'est pas cristallisé, il est déposé sur une feuille de verre. La cellule est gris très foncé.

C'est la cellule des calculatrices et des montres.

#### Ü **Avantages :**

- Fonctionnement avec un éclairage faible.
- Moins chères que les autres.

#### Ü **Inconvénients :**

- Rendement faible en plein soleil (environ 6%)
- Performances diminuent sensiblement avec le temps.

## Ø cellule en silicium monocristallin :

Lors du refroidissement, le silicium fondu se solidifie en ne formant qu'un seul cristal de grande dimension. On découpe ensuite le cristal en fines tranches qui donneront les cellules. Ces cellules sont en général d'un bleu uniforme.

### Ü **Avantage :**

- Très bon rendement (17.2%).

### Ü **Inconvénients :**

- Coût élevé,
- Rendement faible sous un faible éclairement.

## Ø cellule en silicium polycristallin :

Pendant le refroidissement du silicium, il se forme plusieurs cristaux. Ce genre de cellule est également bleu, mais pas uniforme, on distingue des motifs créés par les différents cristaux.

### Ü **Avantage :**

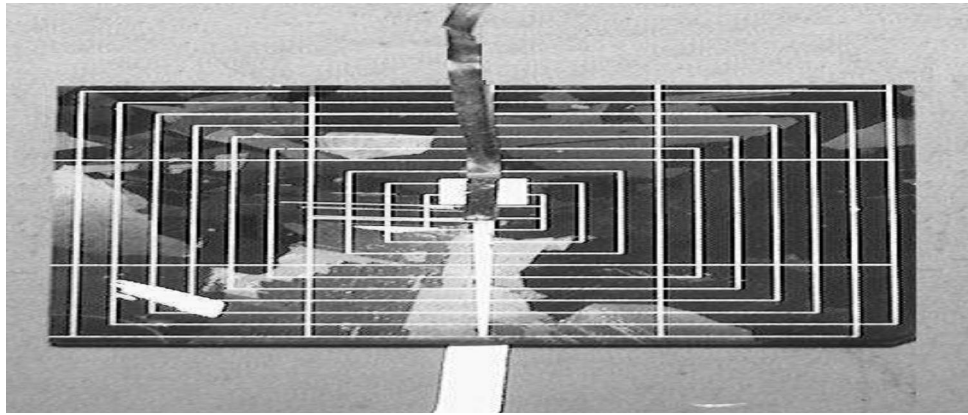
- Bon rendement (13%), mais cependant moins bon que pour le monocristallin.
- Moins cher que le monocristallin.

### Ü **Inconvénient :**

- Coût élevé,
- Rendement faible sous un faible éclairement.

Ce sont les cellules les plus utilisées pour la production électrique (meilleur rapport qualité-prix).

Les cellules utilisées dans ce projet proviennent de la société Photowatt. Il s'agit de cellules en silicium amorphe. La face négative supérieure est recouverte d'un réseau de peignes collecteurs . Elle est recouverte d'une couche anti-reflet en SIN (Nitrure de Silicium) afin d'augmenter le rendement photovoltaïque (jusqu'à 15%) en piégeant un maximum de lumière. La face arrière positive est en aluminium pour améliorer le captage de la lumière.



**-Fig.10-Cellule photovoltaïque-**

## Ø Cellule multi-jonction :

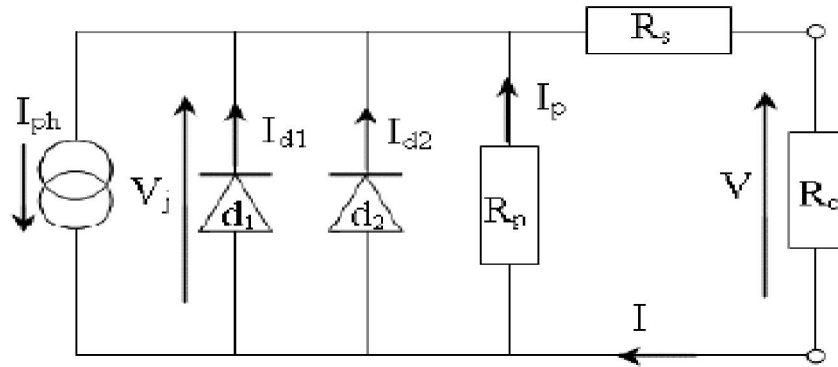
Des cellules ayant une grande efficacité ont été développées pour des applications spatiales. Les cellules multi-jonctions sont constituées de plusieurs couches minces qui utilisent l'épitanie par jet moléculaire.

Une cellule triple jonction, par exemple, est constituée des semi-conducteurs GaAs, Ge et GaInP<sub>2</sub>. Chaque type de semi-conducteur est caractérisé par une longueur d'onde maximale au delà de laquelle il est incapable de convertir le photon en énergie électrique. D'un autre côté, en deçà de cette longueur d'onde, le surplus d'énergie véhiculé par le photon est perdu. D'où l'intérêt de choisir des matériaux avec des longueurs aussi proches les unes des autres que possible (en multipliant leur nombre d'autant) de manière à ce qu'une majorité du spectre solaire soit absorbé, ce qui génère un maximum d'électricité à partir du flux solaire. L'usage de matériaux composés de boîtes quantiques permettra d'atteindre 65% dans le futur (avec un maximum théorique de 87%). Les dispositifs à multi jonctions GaAs sont les cellules les plus efficaces. Spectrolab a obtenu 40.7% d'efficacité (déc. 2006), un consortium (dirigé par des chercheurs de l'université du Delaware) a obtenu un rendement de 42.8% (sep. 2007).

## II-5- Paramètres des cellules photovoltaïques :

### II-5-1- caractéristique courant tension et schéma équivalent :

La figure suivante propose un modèle électrique de la cellule photovoltaïque prenant en compte les différents facteurs limitatifs. On y retrouve le générateur de courant  $I_{ph}$  correspondant au courant photogénéré ainsi que des résistances complémentaires,  $R_s$  et  $R_p$  et deux diodes  $D_1$  et  $D_2$ ,  $R_c$  est la résistance de charge.



**-Fig.11- schéma électrique équivalent d'une cellule PV-**

La résistance série  $R_s$  est due à la résistivité des différentes couches de la cellule émetteur, base et contacts métallique (en particulier leur interface avec le semiconducteur).

Ce terme doit idéalement être le plus faible possible pour limiter son influence sur le courant de la cellule. Ceci peut être réalisé en optimisant le contacte métal/semiconducteur, et en diminuant la résistivité du matériau utilisé. Cependant, un dopage très élevé entraîne une augmentation de la recombinaison des porteurs.

La résistance parallèle ou de court circuit  $R_p$  traduit quant à elle ,la présence d'un courant de fuite à travers l'émetteur , causé par un défaut. Ceci est le cas lorsque la diffusion des contacts métalliques à haute température perce l'émetteur .Elle peut aussi être due à un court circuit sur les bords de la cellule .Cette valeur devra être la plus élevée possible.

**II-5-1-1- Cas idéal :**

L'équation caractéristique d'une cellule solaire idéale est de la forme :

$$I = I_{cc} - I_D = I_{cc} - I_0 [ e^{qV/KT} - 1 ]$$

Avec:

- $I_{cc}$** : courant de court circuit
- $I_D$** : courant générer par la diode
- $I_0$** : courant de saturation
- $K$** : Constante de Boltzmann ( $K= 1,381.10^{-19}$  J/K )
- $q$**  : La charge de l'électron (  $q=1,6.10^{-19}$  c )

**T** : La température de la cellule

Le circuit électrique équivalent correspondant à une cellule solaire idéale est illustré dans la figure suivante :

**I, V** : courant et tension fournis par la cellule

**I<sub>D</sub>** : courant de diode donnée par l'équation suivante :

$$I_D = I_0 [ e^{qV/KT} - 1 ]$$

### **II-5-1-2- Cas réel :**

La cellule solaire réelle a le même comportement que la cellule idéale mais modifiée par certains paramètres tel que le facteur d'idéalité de la diode  $n$  qui est différent de un dans le cas d'une cellule réelle. De plus nous devons tenir compte des pertes d'énergie en introduisant une résistance série ( $R_S$ ) et une résistance shunt de fuite ( $R_{sh}$ ) au circuit équivalent.

On définira la fonction de chaque élément comme suit :

D : une diode pour symboliser que le courant ne circule que dans un seul sens .

$R_{sh}$  : une résistance shunt qui prend en compte les fuites inévitables de courant (pertes dues aux défauts et aux impuretés).

$R_S$  : est une résistance série qui est due aux différentes résistances électriques que le courant rencontre sur son parcours (résistance intrinsèque des couches, résistance des contacts).

$R_L$  : est l'impédance du récepteur qui impose le point de fonctionnement de la photopile en fonction de sa caractéristique  $I(V)$  sous l'éclairement considéré.

## **II-5-2- Paramètres des cellules photovoltaïques :**

### **II-5-2-1- Courant de court-circuit, $I_{cc}$ :**

Il s'agit du courant obtenu en court-circuitant les bornes de la cellule. Il croît, linéairement avec l'intensité d'illumination de la cellule et dépend de la surface éclairée, de la longueur d'onde du rayonnement, de la mobilité des porteurs et de la température.

### **II-5-2-2- Tension à circuit ouvert, $V_{oc}$ :**

Si on place une photopile sous une source lumineuse constante, sans aucun récepteur, on obtient une tension continue dite tension à circuit ouvert.

On la mesure à l'aide d'un voltmètre. Cette tension est de l'ordre de 0,5 à 0,7V pour les cellules élémentaire (elle varie avec la technologie et l'éclairement).

On obtient cette tension on annulant le courant.

$$I = 0 \Rightarrow I_s \left[ \exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right] - I_{ph} = 0 \Rightarrow V_{oc} = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{I_{ph}}{I_s} + 1\right)$$

### **II-5-2-3- Facteur de forme, FF :**

Le facteur de forme FF, même dans le cas d'une cellule idéale, ne peut dépasser 0.89, puisque les équations courant/tension sont régies par les équations de Boltzmann sous forme exponentielle :  $\exp(qV/kT)$ . Il ne pourra donc pas exister de courbe courant /tension rectangulaire .Ce paramètre dépend de la conception de la cellule de la qualité de la jonction p-n et du matériau, de la résistivité des contacts métalliques, etc....

$$\mathbf{FF = V_m * I_m / V_{co} * I_{cc}}$$

### **II-5-2-4- Le rendement :**

Le rendement d'une cellule dépend à la base du nombre de photons pénétrant. Cette quantité est limitée par le coefficient de réflexion R de la surface de la cellule ,qui pondère toutes les équations des courants photos générés par un coefficient(1-R). Afin de diminuer les réflexions ,la surface de la cellule est texturée et recouverte d'une couche anti reflet.

De manière analogue, le taux d'ombrage tient compte de la couverture partielle de la surface de la cellule par une partie opaque correspondant à la surface des contacts

Métalliques de la face avant, par contre, pour certaines structures de cellules, le taux d'ombrage est égal à zéro (par exemple pour les cellules à contacte arrières)

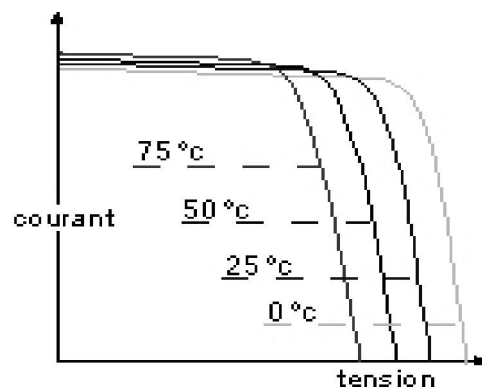
Il y a partie des photons qui, bien qu'ayant l'énergie nécessaire, traversent l'épaisseur de la cellule sans être absorbés. Ce terme devient important quand la cellule très fine (<100um), et peut être minimisé en utilisant une couche réfléchissante sur la surface arrière de la cellule.

Le rendement de collecte correspond au rapport entre le nombre de porteurs de charge effectivement collectés et le nombre total photogénérés. Ce terme tient donc compte des combinaisons de porteurs survenant dans le volume et en surface de la cellule, et il dépend directement de la durée de vie des porteurs minoritaires (le temps moyen entre la génération et la recombinaison d'un porteur minoritaire).

$$= P_{\max} / P_{\text{in}} = FF \times I_{\text{cc}} \times V_{\text{co}} / P_{\text{in}}$$

## II-6- Influence de la température :

Une élévation de la température (de jonction) des cellules solaires provoque un important accroissement de leur courant à l'obscurité et facilite une légère augmentation de la création de paires électron-trou. Le courant du panneau solaire étant égal à la soustraction du photo-courant et du courant de diode à l'obscurité, il y'a une légère augmentation du courant  $I_{\text{cc}}$  accompagnée d'une forte diminution de la tension  $V_{\text{co}}$  et donc un décalage du point  $P_{\text{max}}$  vers les puissances inférieures.



**-Fig12- Influence de la température -**

## II-7- Association des cellules photovoltaïques en série et en parallèle :

La cellule photovoltaïque élémentaire produit un courant continu dont la puissance dépend de la surface de la cellule et la tension à vide est d'environ 0.5 à 0.6 volts.

En effet, une cellule solaire de quelques dizaines de centimètres carrés délivre, au maximum, quelques watts sous une tension très faible par principe, puisqu'il s'agit d'une tension de jonction, donc une cellule solaire constitue un générateur électrique de très faible puissance au regard des besoins de la plupart des applications.

Les générateurs solaires sont, par conséquent, réalisés par association d'un grand nombre de cellules photovoltaïques élémentaires reliées entre elles en série ou en parallèles.

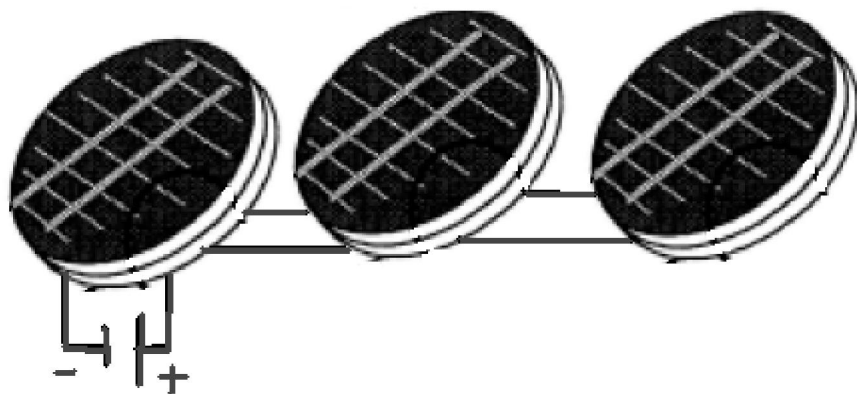
### **II-7-1- Association en parallèle :**

Le principe d'un montage en parallèle consiste à additionner les courants (I) et de garder le même voltage (V) système.

Par exemple pour deux panneaux solaires de 50W en système 12V (I = 4,16A) branchés en parallèle, le voltage sera toujours de 12V mais le courant passant sera de 8,32A (4,16x2).

Donc il faut brancher le fil de la phase positive sur toutes les fiches (+) des borniers au dos des panneaux solaires, et faire de même pour la phase négative .

La mise en parallèle des panneaux solaires somme les courants ( $I_{PV1}+I_{PV2}+I_{PV3}+...+I_n$ ) en conservant la tension de système (V).



**- Fig.13- Association des cellules solaires en parallèle-**

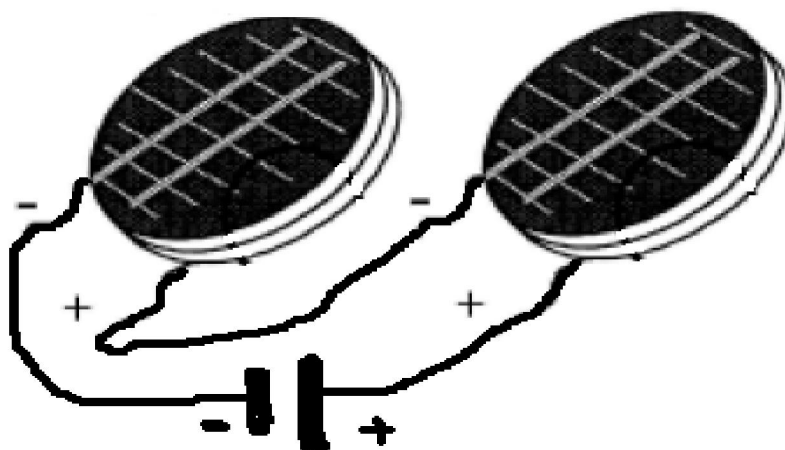
### **II-7-2- Association série :**

Le principe d'un montage en série consiste à additionner le voltage système (Vdc) et de garder le même courant (I).

Par exemple pour deux panneaux solaires de 50W en système 12V (I = 4,16A) branchés en série, le courant sera toujours de 4,16A mais le voltage système sera de 24Vdc (12Vdc x 2).

Pour un montage en série il faut toujours connecter ensemble les polarités (-) et (+) dans la chaîne .

La mise en série des panneaux solaires somme les tensions ( $V_{PV1}+V_{PV2}+V_{PV3}+...+V_n$ ) en conservant le courant de système (I).



**-Fig.14-Association des cellules solaires en série-**

### **II-8- Constitution d'un générateur photovoltaïque :**

L'association de plusieurs cellules PV en série ou en parallèle donne lieu à un générateur photovoltaïque (GPV).

La plupart des panneaux PV commerciaux sont constitués par des sous réseaux de cellules connectés en série. Chacun de ces sous réseaux est lui-même constitué d'un groupe de cellules PV connectés en série.

### **II-9- Protection d'un générateur photovoltaïque :**

Afin d'éviter des pannes destructrices liées à l'association des cellules et de leur fonctionnement en cas d'ombrage, et dans le but d'augmenter la durée de

vie des panneaux solaires ,deux types de protections sont utilisés dans les installations actuelles :

### **II-9-1- Protection lors de la connexion en parallèle de plusieurs GPV :**

Dans le cas de plusieurs chaines de cellules mises en parallèle sur une charge, le risque est que les chaines de cellules éclairées débitent dans des chaines ombrées ou que la batterie ne se décharge à travers le générateur. On dispose pour cela de diodes anti retour mises en série avec le GPV. Ces diodes sont indispensables quand la charge du module PV est une batterie. En fait, ces diodes évitent que la batterie ne débite sur le module PV pendant la nuit.

### **II-9-2- Protection du GPV constitué de la mise en série d'un grand nombre de cellules PV :**

La mise en série de photopiles implique que le courant traversant chaque cellule soit le même que celui que l'ensemble du GPV associé. Ainsi, quand un GPV ou une partie de ce GPV (par exemple, une cellule) est ombrée, cette partie sous irradiée du module peut se trouver polarisée en inverse et devenir réceptrice, dissipant alors la puissance qui ne peut pas être extraite. Cette dissipation a comme effet immédiat un échauffement de la zone sous irradiée. Cet échauffement local peut donner lieu à des « points chauds » qui peuvent endommager la zone affectée et dégrader définitivement les performances du module PV entier. Pour éviter ces effets indésirables, des diodes By-pass sont associées à un sous réseau de cellules.

## **II-10-Avantages et inconvénients des systèmes photovoltaïques:**

### **II-10-1-Avantages :**

La technologie photovoltaïque présente un grand nombre d'avantages.

- D'abord, une haute fiabilité - elle ne comporte pas de pièces mobiles qui la rend 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.

- Leurs coûts de fonctionnement sont très faibles vu les entretiens réduits et ils ne nécessitent ni combustible, ni transport, ni personnel hautement spécialisé.
- Enfin, 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.

### **II-10-2- Inconvénients :**

Le système photovoltaïque présente toutefois des 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 (la limite théorique pour une cellule au silicium cristallin est de 28%).
- Les générateurs photovoltaïques ne sont compétitifs par rapport aux générateurs Diesel que pour des faibles demandes d'énergie en région isolée.

Enfin, lorsque le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batterie) est nécessaire, le coût du générateur photovoltaïque est accru.

La fiabilité et les performances du système restent cependant équivalentes pour autant que la batterie et les composants de régulations associés soient judicieusement choisis.

### **II-11- La technologie du silicium cristallin (85% du marché) :**

Cette technologie se subdivise en deux sous filières : le silicium monocristallin et le silicium poly-cristallin (ou multi-cristallin). Elles sont différenciées par le procédé d'obtention du cristal.

Les modules sont constitués d'un groupement de cellules interconnectées. Les cellules sont noyées dans un bain de résine et encapsulées entre deux vitres en verre (modules bi-verre) ou entre une vitre et une feuille de tedlar (module verre/tedlar). Le tout est généralement inséré dans un cadre en aluminium, mais il existe des modules sans cadre pour les applications en intégration bâtiment.

## **II-12- Les caractéristiques des modules photovoltaïques :**

Les principales caractéristiques des modules PV sont : la puissance et la tension délivrée par ce dernier et sa surface.

### **II-12-1- La puissance :**

La puissance que peut fournir un module est fonction de sa surface et de l'insolation incidente. Elle s'exprime en Watt-crête (WC) et représente la puissance maximale de module pour l'insolation maximale de référence (1000 Watt par mètre (W/m)).

### **II-12-2- La tension :**

La tension délivrée par un module dépend du nombre de cellules connectées en séries.

Pour les modules de petite puissance (<75Wc), la tension d'usage est généralement comprise entre 12 et 15 Volts. Des modules de puissance plus importante sont obtenus par une augmentation du nombre de broches de cellules en parallèles (augmentation de la valeur du courant). La tension d'usage peut alors être de 24 Volts ou plus selon la configuration du système à alimenter.

### **II-12-3- La surface :**

La surface des modules est variable selon les fabricants et est généralement comprise entre 0,5 et 1 Mètre, elle peut atteindre 3 m pour des fabrications spéciales.

Plusieurs modules interconnectés constitueront un panneau. Plusieurs panneaux interconnectés constitueront un champ PV. L'assemblage des modules en série et/ou en parallèle permettra de fixer différentes tensions et puissances.

## **II-13- Les applications des systèmes photovoltaïques :**

En dehors des applications spatiales qui sont à l'origine du développement des techniques PV et des applications en électronique (alimentation de calculatrice, de montres, etc...), on trouve deux grandes familles d'applications :

- Les générateurs autonomes pour l'alimentation de sites isolés du réseau de distribution d'électricité (habitat, relais hertzien, pompage, balisage en mer, électrification rurale,.....)

- Les centrales PV connectées au réseau (en très fort développement dans les pays industrialisés).

## **II-14- Dimensionnement d'une installation photovoltaïque :**

### **Principes généraux :**

L'utilisation des systèmes solaires est soumise à certaines contraintes. Les plus importantes d'entre elles peut s'énoncer de la façon suivante :

-Il faut toujours respecter l'équilibre entre l'énergie produite par le générateur photovoltaïque et l'énergie consommée par l'utilisateur.

-L'équilibre qui conditionne le bon fonctionnement d'un système photovoltaïque doit être réalisé entre l'énergie produite et l'énergie consommée sur une période donnée (par jour en général).

### **Deux principes sont à respecter :**

-**premièrement** : toujours l'énergie produite (par jour) par le générateur photovoltaïque devra être supérieure ou égale aux besoins en énergie (par jour) de l'utilisateur.

Avant d'acquiescer un système solaire, il sera nécessaire de définir assez précisément les besoins en énergie de l'utilisateur afin de pouvoir dimensionner correctement le générateur photovoltaïque.

-**Deuxièmement** : l'énergie réellement consommée (par jour) par l'utilisateur devra rester toujours inférieure ou égale à l'énergie réellement produite (par jour) par le générateur photovoltaïque.

## **II-15- Mise en place d'un générateur photovoltaïque :**

Nous présentons simplement une série de notions à connaître pour conduire le projet au bon déroulement de toutes les étapes de l'installation.

Pour mettre en place un équipement photovoltaïque, méthode est la suivante :

### **II-15-1- Réception technique du matériel :**

La réception technique est une étape fondamentale, puisque c'est à partir d'elle que les fournisseurs et les entrepreneurs se trouvent engagés quant à la qualité et au bon fonctionnement du matériel livrés et par la suite du matériel à installer.

### **II-15-2- Emplacement, orientation et inclinaison des modules :**

Avant toute réalisation pratique, il est nécessaire de se préoccuper du positionnement des modules qui conditionnent le choix des supports ainsi de génie civil (réalisation de plots de fixation en béton). Les modules délivreront leurs puissances maximales que s'ils reçoivent le maximum de rayonnement (d'où le choix d'une orientation et d'une inclinaison à respecter).

**II-15-2-1- Emplacement des modules :**

Ils ne doivent également ne jamais avoir l'ombre portée, à aucun moment de la journée.

**II-15-2-2- Choix de l'orientation des modules :**

L'utilisation d'une boussole est recommandée pour éviter toute approximation.

Les panneaux doivent être orientés vers le sud géographique.

**II-15-2-3- Choix de l'inclinaison des modules :**

Pour que les modules produisent un maximum d'énergie, il faut que leur surface soit perpendiculaire aux rayons solaires.

Comme le soleil change d'inclinaison d'une saison à l'autre, on choisit généralement une valeur moyenne sur l'année qui est définie par la règle suivante : l'inclinaison est égale à la valeur de la latitude du site.

**II-15-3- Préparation des sites d'installation, génie civil :**

Il faut une bonne fixation des supports de module au sol afin que l'installation résiste à des vents violents. Les modules doivent être soulevés de sol (1 mètre) pour une meilleure aération.

**II-15-4- Arrimages des modules sur toiture :**

L'arrimage doit utiliser les poutrelles qui supportent la toiture. Il faut s'assurer de la qualité de la charpente.

**II-15-5- Local technique :**

L'électronique de contrôle (régulateur, onduleur) et la batterie doivent être rangés dans des locaux techniques bien ventilés. Le matériel électronique devra cependant toujours être placé à l'ombre.

**II-15-6- Maintenance et entretien :**

La saleté sur le verre réduit l'incidence de la lumière sur les cellules solaires et diminue ainsi la capacité du panneau solaire. Lors de forte saleté sur le verre, il est recommandé de nettoyer le verre. Pour éviter des dommages et des griffes sur le verre, il faut utiliser beaucoup d'eau et une brosse douce. N'utilisez pas de produits agressifs.

Vérifiez à intervalles réguliers les connexions électriques contre d'éventuels dommages ou corrosion et pour s'assurer d'un branchement de câble correct.

**II-15-7- Mise en place des batteries :**

Les batteries sont des éléments présentant un danger (toxicité, dégagement gazeux, risque d'explosion). Pour les placer, il faut agir avec une attention particulière, pour qu'elles soient bénéfiques pour leur durée de vie.

-Les accumulateurs doivent être loin des intempéries et des personnes et il faut une bonne aération pour éviter la concentration de gaz (hydrogène).

-La disposition des accumulateurs doit permettre une inspection facile des niveaux.

-Il faut respecter l'horizontalité de telle façon que les plaques soient uniformément recouvertes de l'électrolyte.

-Il faut réduire les longueurs de câbles électriques en rapprochant les accumulateurs.

-Il faut recouvrir les bornes des accumulateurs avec un isolant.

## **Introduction :**

Le seul inconvénient des panneaux photovoltaïques, est qu'ils ne produisent de l'énergie que le jour. Or on a souvent besoin d'électricité la nuit (notamment pour s'éclairer). Pour bénéficier de l'électricité la nuit ou durant les jours nuageux, il faut donc installer des accumulateurs (batteries) qui vont nous permettre de stocker cette énergie sous forme chimique.

### **Historique :**

L'histoire des accumulateurs au plomb commence en 1859 avec la fabrication du premier accumulateur rechargeable par Gaston Planté. Il comporte deux feuilles de plomb roulées en spirale, séparées par une toile de lin et plongées dans un bac contenant une solution d'acide sulfurique. Ces électrodes, constituées initialement de plomb pur devaient être formées par balayages de potentiels successifs.

En 1880, Camille Faure met au point une technique facilitant la formation de l'accumulateur au plomb : une pâte à base d'oxydes de plomb et d'acide sulfurique est appliquée directement sur les lames de plomb qui sont maintenues en place en enroulant le tout dans un feutre.

En 1881, le luxembourgeois Henri Tudor fonda la société éponyme et industrialise les accumulateurs de Faure en introduisant des plaques de plomb coulé, enduites d'une pâte active. Beaucoup plus robuste, l'accumulateur ouvert tel que nous le connaissons est né.

Depuis, les progrès techniques n'ont pas cessé de progresser (propriétés des alliages, additifs des matières actives, composition des pâtes, etc.).

## **III-1- Définition :**

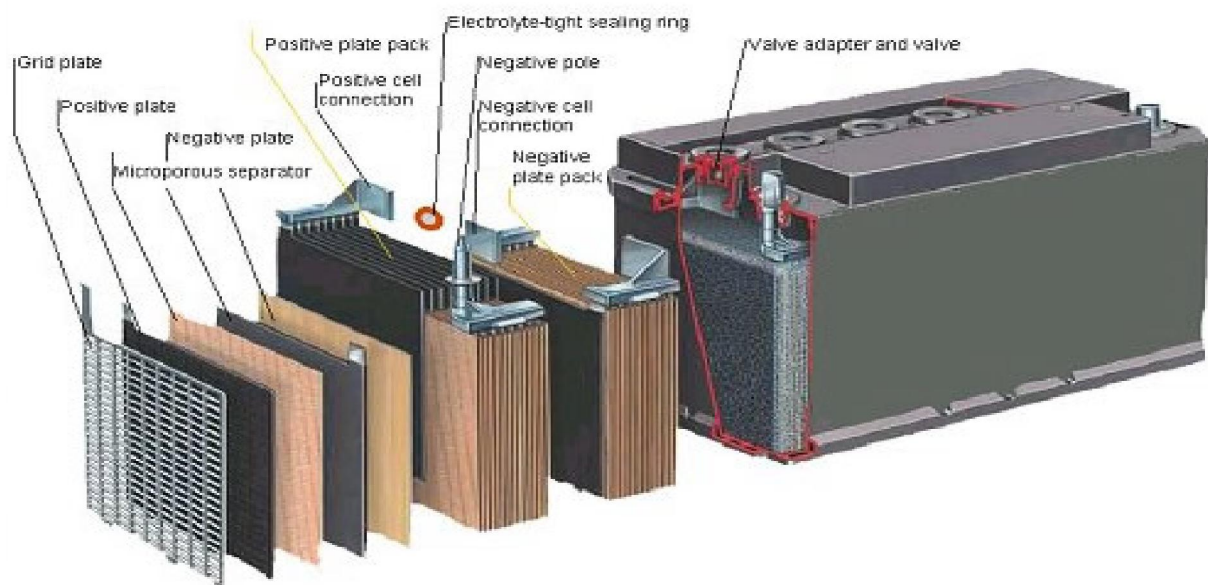
Un accumulateur électrochimique est un système capable de convertir de l'énergie électrique en énergie chimique et réciproquement. On appelle respectivement ces opérations charge et décharge.

## **III-2- Différents types d'accumulateurs :**

De nombreux types d'accumulateurs électrochimiques existent, toutefois les accumulateurs les plus utilisés dans les systèmes photovoltaïques sont les accumulateurs au Plomb (Pb) et les accumulateurs au Cadmium-Nickel (Cd-Ni).

**III-2-1- Les accumulateurs au plomb :****III-2-1-1- Description :**

Une batterie au plomb est constituée d'un ensemble d'accumulateurs. La tension nominale d'un accumulateur étant d'environ 2.1 V, une batterie de 12 V est constituée de 6 accumulateurs montés en série et reliés par des connexions en plomb soudées. Ces accumulateurs sont logés dans un bac, le plus souvent en plastique (polypropylène, ABS...), qui est fermé par un couvercle scellé.

**-Fig15- La batterie au Plomb-**

Chaque accumulateur est composé d'un ensemble de couples d'électrodes positives et négatives montées en parallèle, au milieu de chaque couple est placé un séparateur.

**Electrodes positives :**

Les électrodes positives sont des grilles, en alliage binaire ou ternaire de plomb (Pb-Sb, Pb-Sn, Pb-Ca, Pb-Sb-As...) dont les alvéoles sont remplies d'une pâte poreuse de peroxyde de plomb PbO<sub>2</sub> (matériau actif aux électrodes positives).

Les éléments d'alliage permettent d'améliorer les propriétés mécaniques des grilles et ont une influence sur les performances des batteries.

**Electrodes négatives :**

Les électrodes négatives comparables aux grilles positives, sont remplies de plomb métalliques très poreux (matériau actif aux électrodes négatives) : on parle d'éponge de plomb métalliques.

Les électrodes sont souvent appelées « plaques » en raison de leur forme.

**Séparateurs :**

Afin d'éviter le contact entre les électrodes positives et négatives, et donc des courts-circuits, les plaques sont isolées entre elles par un séparateur. Ces séparateurs sont généralement des feuilles rectangulaires, intercalées entre les plaques positives et les plaques négatives, et possèdent des qualités remarquables :

- isolant électrique parfait
- très grande perméabilité aux ions porteurs de charges électriques
- barrière pour les particules de matières
- porosité élevée
- excellente tenue à l'acide sulfurique

Les séparateurs sont le plus souvent constitués par un feutre de fibres cellulosiques protégés par une résine ou encore par du chlorure de polyvinyle fritté ou des feutres en fibre de verre.

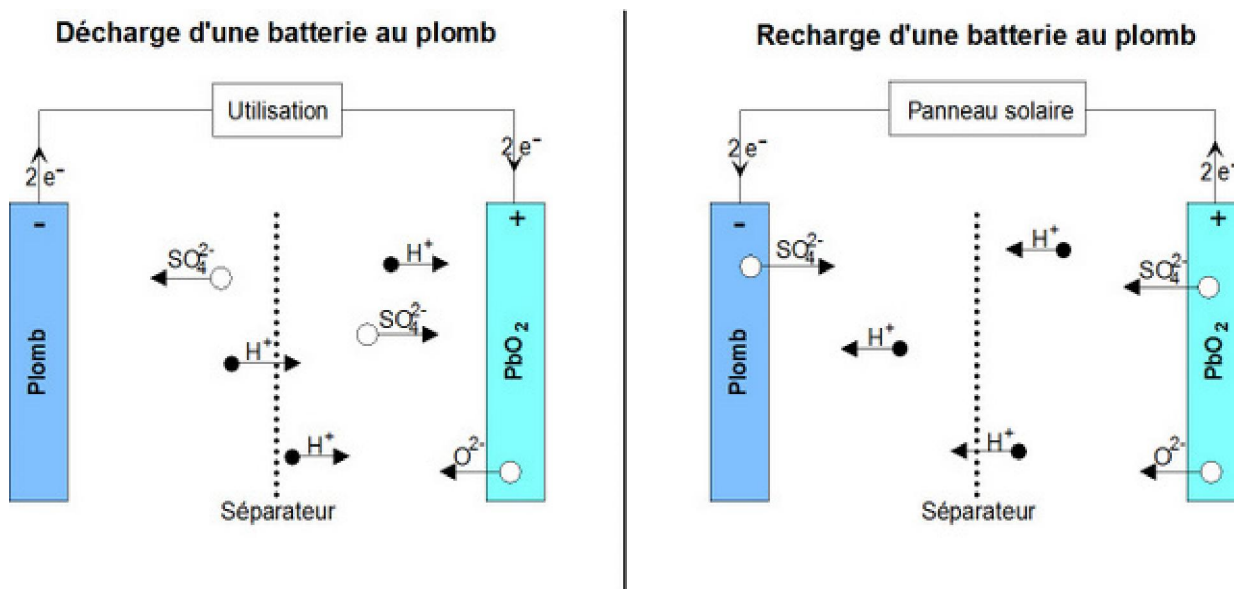
**Electrolyte :**

L'électrolyte est une solution diluée d'acide sulfurique, sous forme liquide, de gel ou absorbée dans des feutres en fibre de verre.

**Expandeurs :**

Les premiers accumulateurs au plomb industriels ont utilisé des séparateurs en bois. Quand on a mis des séparateurs en plastique ou en fibre de verre, les performances des batteries se sont effondrées. Avant que l'on comprenne que le bois était chimiquement utile pour maintenir la porosité de la matière active. Le bois libère des macromolécules organiques en milieu sulfurique. Ces composés appelés ligno-sulfonates sont utilisés sous le nom d'expandeurs dans les batteries modernes afin de maintenir leur performance dans le temps.

**III-2-1-2- Principe de fonctionnement :**



**A la décharge**, les deux polarités se sulfatent, l'électrolyte est consommé (les ions  $SO_4^{2-}$  vont sur les électrodes). L'oxygène libéré par l'électrode positive s'unit aux ions  $H^+$  en solution pour former de l'eau. Si la décharge est totale, l'électrolyte ne sera plus composé que d'eau distillée.

**A la recharge**, les deux polarités se désulfatent, l'électrolyte est régénéré (mise en solution d'ions  $SO_4^{2-}$ ). La plaque positive est peroxydée (formation de  $PbO_2$ ) et des ions sont libérés (augmentation de la concentration  $H^+$  de l'électrolyte).

**III-2-1-5- Caractéristiques de la batterie au plomb :**

**III-2-1-5-1-Densité d'énergie et rendement :**

Sous une tension moyenne de 2V, la densité théorique d'énergie est de 168 Wh/Kg. En pratique, les meilleures batteries plomb/acide ne dépassent pas 45 à 50 Wh/Kg. Ceci est dû à l'utilisation de matériaux électro chimiquement inertes (enceinte, grille...) et à une utilisation partielle des matériaux actifs ( 35 à 55%).

Le rendement énergétique des batteries au plomb est de 70 – 75% : 25% de l'énergie électrique est dissipée, essentiellement sous forme de chaleur, lors des réactions électrochimiques de charge, décharge et autodécharge.

**III-2-1-5-2- Décharge :**

**a) Relation entre la profondeur de décharge et la durée de vie des batterie :**

La profondeur de décharge est la quantité d'énergie qui a été déchargée de la batterie. Elle est donnée en pourcentage de sa capacité. Une profondeur de décharge de 80% indique une décharge profonde (la capacité d'une batterie est la quantité totale d'électricité qu'une batterie peut fournir après avoir été

complètement chargée. Elle s'exprime en Ampère/Heure (Ah) ).

Une batterie ne doit pas subir de décharges profondes car sa durée de vie diminue rapidement avec la profondeur moyenne de décharge. En effet, quand une batterie est fortement déchargée, des phénomènes « nocifs » comme la sulfatation, le gel et la stratification de l'électrolyte se produisent plus rapidement que lorsque la profondeur de décharge est plus faible. Ces phénomènes seront abordés plus loin.

**b) Variation de la capacité en fonction du courant de décharge :**

Pendant la décharge, la tension  $E$  aux bornes de la batterie est :

$$E = U - r I$$

$U$  : la force électromotrice à circuit ouvert, soit 2.10 V

$r$  : la résistance interne de l'accumulateur et  $I$ , le courant de décharge.

Au cours de la décharge,  $r$  augmente par suite de la diminution de la concentration de l'électrolyte dans les pores des électrodes. On a donc une chute progressive de la tension  $E$ , chute d'autant plus rapide que  $I$  est élevé : la capacité d'une batterie diminue d'autant plus que la décharge est rapide.

Par conséquent, le courant de décharge ne doit pas être trop fort. Une batterie ne devrait pas être déchargée en moins de dix heures.

**NB** : Remarquons que la tension de 1,8V correspond à des profondeurs de décharge très différentes selon que la décharge est lente ou rapide : pour une même tension, la batterie est en fait beaucoup plus déchargée avec une décharge lente.

**III-2-1-5-3 Autodécharge :**

Une batterie se décharge lentement même si on ne s'en sert pas : c'est l'autodécharge.

Le taux d'autodécharge dépend principalement du type d'alliage qui est utilisé pour les grilles : le taux de décharge est particulièrement élevé pour les alliages Pb-Sb où il atteint 5% par mois pour des batteries neuves à 25°C.

Le taux d'autodécharge augmente rapidement avec la température et quand la batterie vieillit : il peut atteindre 1% par jour pour une batterie Pb-Sb en fin de vie.

**III-2-1-5-4 Charge :**

La vitesse de charge d'une batterie est rapide en début de charge puis se ralentit.

Quand l'état de charge dépasse 80 à 90%, une régulation de tension et/ou d'intensité s'opère afin de limiter la vitesse de charge. En effet, l'excès d'énergie qui serait fourni à la batterie serait dissipé sous forme de chaleur et dans

l'électrolyse de l'eau contenue dans l'électrolyte.

D'une manière générale, une batterie ne doit pas être rechargée trop rapidement avec une intensité ou une tension trop forte. Généralement, l'intensité de charge ne doit pas dépasser 1/10 de la valeur du courant de décharge en 10 heures (C10).

#### **III-2-1-5-5- Dégazage :**

Au cours de la charge, quand la batterie approche son état de charge maximale, des bulles d'hydrogènes et d'oxygène sont observées respectivement aux électrodes négatives et positives.

Ces gaz proviennent de l'électrolyse de l'eau contenue dans l'électrolyte.

Réaction à l'électrode négative:  $2\text{H}^+ + 2\text{e}^- > \text{H}_2$

Réaction à l'électrode positive:  $2\text{H}_2\text{O} - 2\text{e}^- > 1/2\text{O}_2 + 2\text{H}^+$

Réaction globale :  $2\text{H}_2\text{O} > 1/2\text{O}_2 + \text{H}_2$

Ce dégazage dépend de plusieurs paramètres :

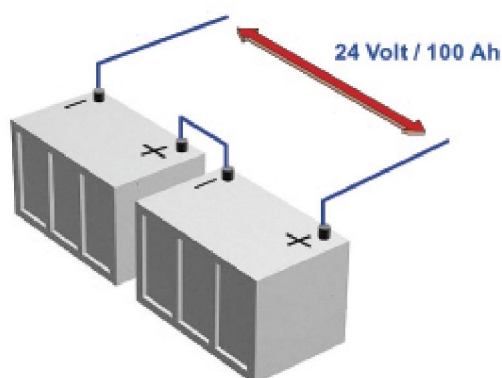
- la tension maximale aux bornes de l'accumulateur, permise par la régulation. Les contrôleurs de charge doivent couper ou limiter le courant afin d'éviter un dégazage excessif.
- la température. Plus la température augmente, plus le dégazage se produit pour de faibles voltages.
- la vitesse de décharge. Les dégazages commencent pour des plus faibles états de charge quand la vitesse de charge augmente.

#### **-Charge d'égalisation :**

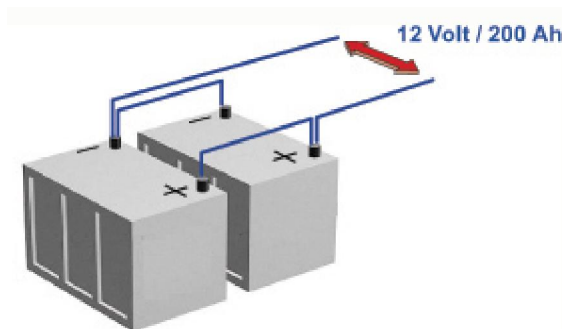
Une charge d'égalisation a pour objet de charger pleinement chaque accumulateur afin d'éviter des déséquilibres entre les différents accumulateurs qui composent les batteries. Elle consiste à charger les batteries avec un faible courant, mais sous une tension supérieure à la généralement tension appliquée en fin de charge

**III-2-1-5-6 Association des batteries série/parallèle :**

On associe les batteries en série pour obtenir des tensions multiples de 12 Volts (24V, 48V) et en parallèle pour augmenter la capacité



- association en série -



-association en parallèle -

**III-2-1-5-7- Influence de la température sur la durée de vie des batteries :**

La température a des effets importants sur la durée de vie des batteries au plomb.

Quand la température augmente de 10°C, la vitesse des réactions électrochimiques double : la durée de vie moyenne des batteries diminue d'un facteur 2 à chaque augmentation de 10°C car la corrosion est accélérée.

Quand la température baisse, la durée de vie des batteries augmente, mais leur capacité diminue.

**III-2-2- Accumulateur cadmium-nickel :**

C'est un accumulateur alcalin dont l'électrolyte est de l'hydroxyde de potassium. L'accumulateur Cadmium-Nickel est très commun, assez bon marché. On le désigne souvent en associant les symboles chimiques de ses deux composants principaux (Nickel : Ni et Cadmium : Cd), ce qui donne Cd-Ni, Ni-Cd, Nicad... On l'utilise dans toutes les applications rustiques comme celui de l'outillage électroportatif, dans les domaines où les risques de renversement sont élevés (aviation, modélisme, éclairage...) et où les capacités nécessaires sont limitées. F.é.m. de 1,2 volts.

**III-3-La sécurité et le 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 de l'air, et en présence d'une flamme ou étincelle, ce gaz provoque des explosions violentes. Il est donc impératif de ventiler le local pour éviter l'accumulation d'hydrogène. Pour les régions montagneuses, il est nécessaire de prendre en compte le problème du gel dans le choix de type de batterie.

### **Introduction :**

Les batteries sont très sensibles à la surcharge et à la décharge profonde qui l'endommage, ce qui fait que dans tous systèmes photovoltaïques utilisant des accumulateurs, un dispositif électronique est indispensable au bon fonctionnement de ces accumulateurs. Ce mécanisme est le régulateur de charge et décharge.

### **IV-1- Définition :**

Le régulateur de charge/décharge de batterie est un dispositif électronique entièrement automatique auquel sont reliés le panneau photovoltaïque, la batterie, ainsi que les équipements destinataires de l'électricité solaire.

Sa fonction principale est de contrôler l'état de la batterie. Il autorise la charge complète de celle-ci en éliminant tout risque de surcharge et interrompt l'alimentation des destinataires si l'état de charge de la batterie devient inférieur au seuil de déclenchement de la sécurité anti-décharge profonde. Prolongeant ainsi la durée de vie de la batterie qui reste le seul composant fragile du système photovoltaïque.

### **IV-2- Différents types de régulateurs :**

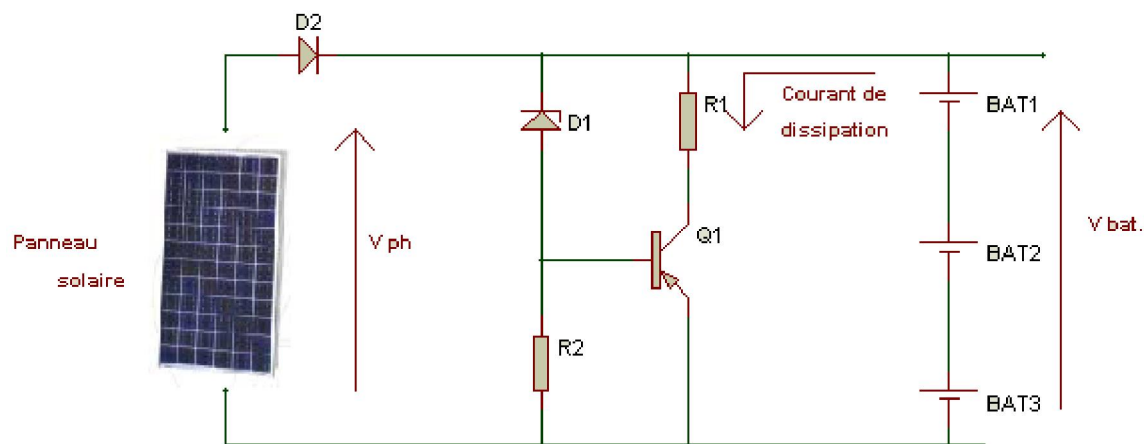
Les panneaux photovoltaïques ont une particularité : ils peuvent être court-circuités et peuvent voir leur circuit s'ouvrir sans dommage. Cette caractéristique a donné naissance à deux méthodes principales de contrôle de la charge et décharge de la batterie : le régulateur série et le régulateur shunt. Dès que les critères de fin de charge de la batterie commencent à être atteints (tension de la batterie ou son état de charge), le courant du panneau photovoltaïque est réduit de façon progressive jusqu'à le court-circuiter (shunt) ou en ouvrant le circuit électronique (série).

#### **IV-2-1- Régulation parallèle :**

##### **IV-2-1-1- Régulation parallèle contrôlée par une diode Zener :**

Le circuit de débordement est connecté en parallèle sur le panneau pour dissiper l'énergie en excès comme il est illustré dans le schéma qui suit.

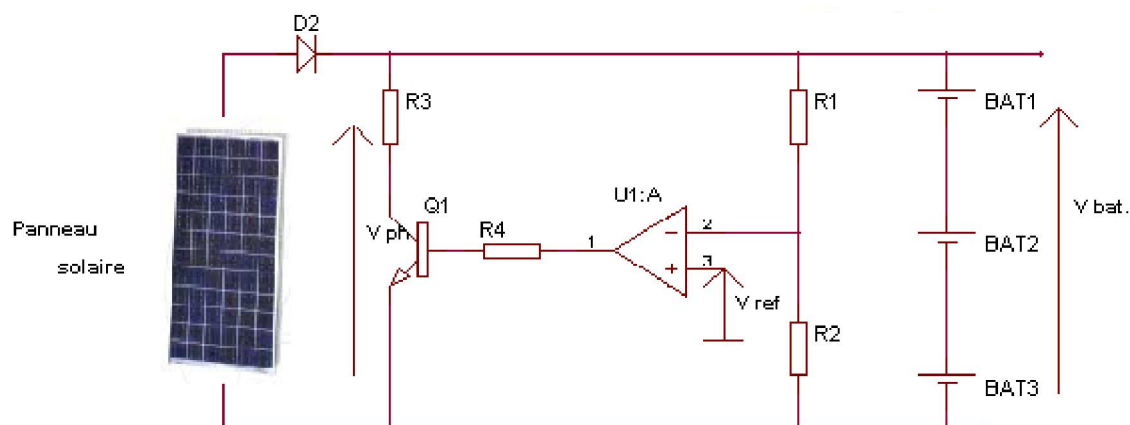
Dès que la diode Zener montée en parallèle est polarisée par la tension de fin de charge, elle déclenche la base du transistor. Le courant dérivé peut être utilement envoyé vers une autre utilisation ou vers un stockage auxiliaire.



**-Fig.16-Régulateur parallèle contrôlé par une diode Zener-**

### **IV-2-1-2- Régulation parallèle contrôlée par une tension de référence ajustable :**

Dans ce type de régulateur, la tension de fin de charge est ajustable par la tension de référence ( $V_{ref}$ ) appliquée à l'entrée d'un amplificateur opérationnel.



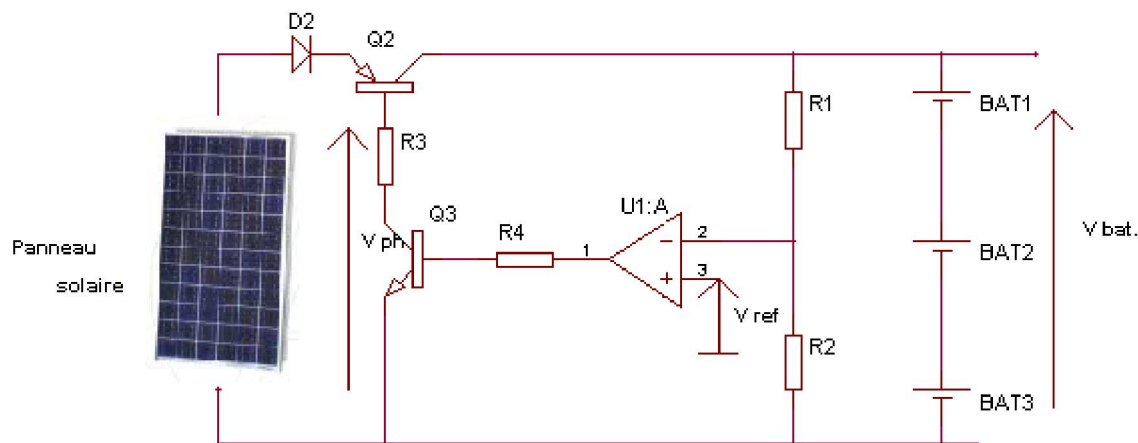
**-Fig.17-Régulateur parallèle contrôlé par une tension de référence ajustable-**

### **IV-2-2- Régulation série :**

Le régulateur série est soit un transistor en série dans le circuit de charge dont la base est actionnée par une tension de référence, soit un relais électromécanique actionné par le courant du module.

**IV-2-2-1- Régulateur série à base de transistor :**

Le transistor série se comporte comme une résistance dont la valeur augmente au fur et à mesure qu'augmente l'état de charge de la batterie.

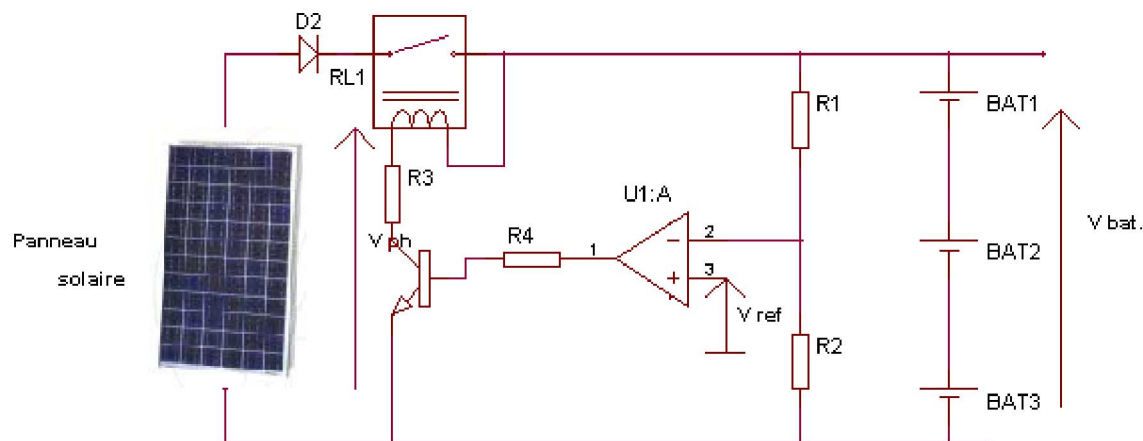


**- Fig18 Régulateur série à base de transistor-**

**IV-2-2-2- Régulateur série à relais mécaniques avec hystérésis ajustable :**

Afin d'éviter que le système entre en oscillation (battement de relais), un comparateur à double seuil d'entrée est nécessaire.

L'hystérésis ajustable permet d'attendre que la tension de consigne soit redescendue à  $V_{ref} - H$  pour réenclencher la charge à travers le relais.



**- Fig19 Régulateur série à relais mécaniques avec hystérésis ajustable-**

## **IV-3- Le régulateur photovoltaïque à base du PIC16F876A :**

### **IV-3-1- Les seuils de charge et de décharge de la batterie :**

Pour le bon fonctionnement de l'accumulateur, on a désigné quatre seuils de surveillance. Deux pour la charge et deux pour le cas de la décharge.

#### **a) Les seuils pour le cas de la charge :**

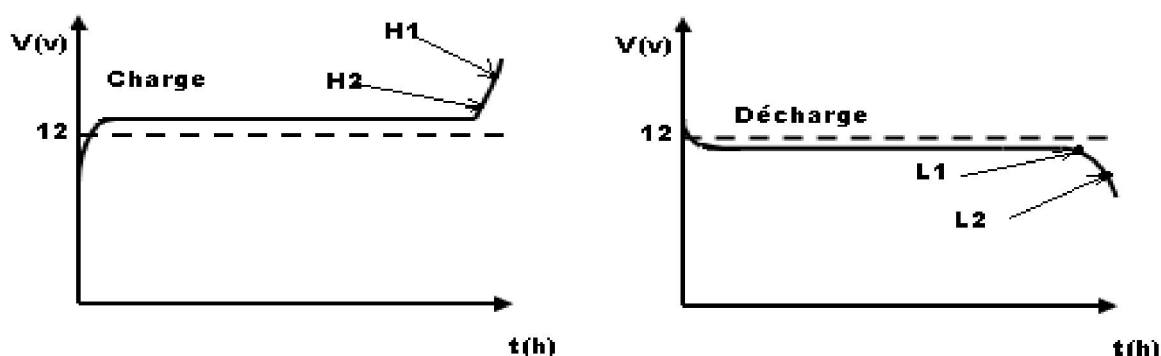
Ces seuils sont :

- **H1** (high1) : signifiant le premier seuil haut (**14,1V**), on doit éviter à la batterie d'atteindre ce seuil sinon elle va subir une surcharge qui peut l'endommager.
- **H2** (high2) : c'est le deuxième seuil haut (**12,9**), depuis lequel la batterie commencera la charge rapide avant d'atteindre le seuil critique qui **H1**.

#### **b) les seuils dans le cas de la décharge :**

Ces seuils sont :

- **L1** (low1) : signifiant le premier seuil bas (**11,9V**). A partir de cette valeur la batterie entamera la décharge rapide.
- **L2** (low2) : le deuxième seuil bas (**11,3V**) qui est à éviter afin d'empêcher une décharge profonde à la batterie.

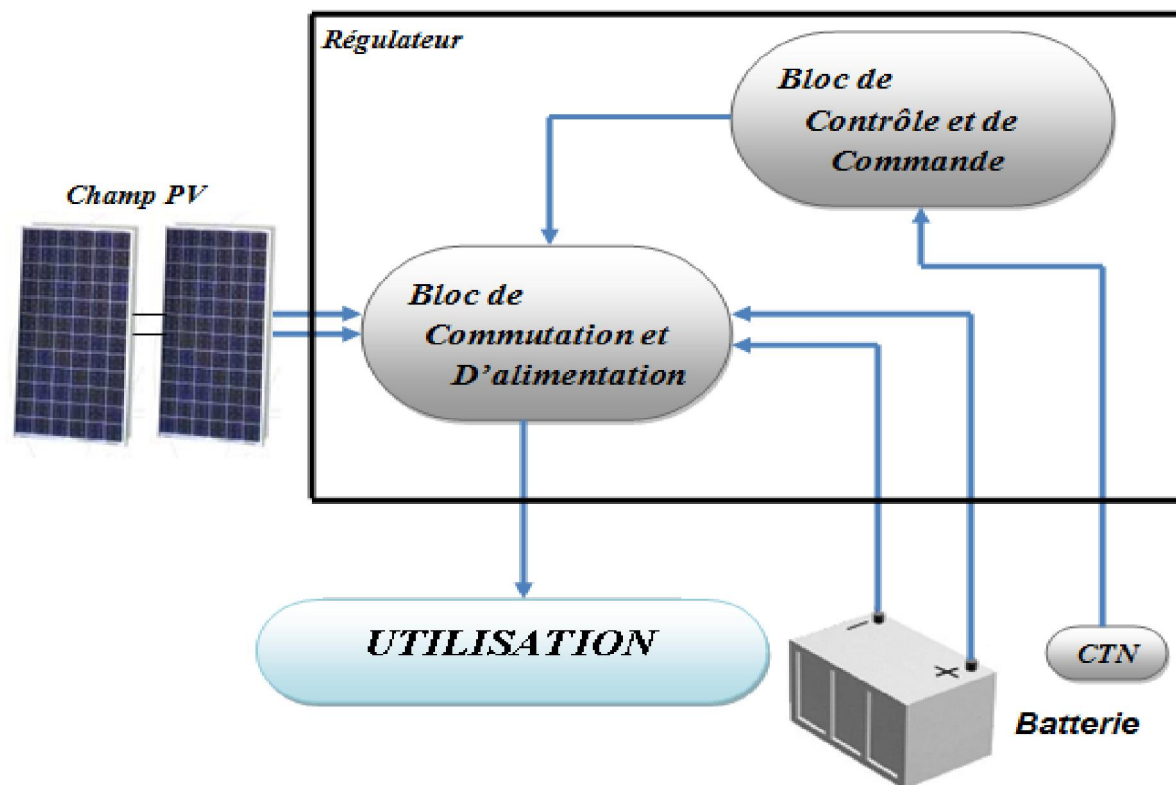


**-Fig.20- Les seuils de la charge et de la décharge de la batterie-**

### **IV-3-2- Etude du régulateur photovoltaïque à base du PIC16F876A :**

Dans ce qui suit, on a subdivisé le schéma synoptique de notre régulateur en trois blocs essentiels afin de faciliter la compréhension du fonctionnement de notre système.

La figure qui suit représente le schéma synoptique du régulateur.



**-Fig 21- Schéma synoptique du régulateur à base du PIC 16F876-**

### **IV-3-1-2-1- Etude des différents blocs :**

#### **a) Bloc de contrôle et de commande :**

C'est le cerveau de notre régulateur photovoltaïque, il est composé ;

1- D'un microcontrôleur (PIC 16F876A), il est le maître qui gère et surveille notre accumulateur suivant les seuils de la surcharge et de la décharge profonde, il travaille à une fréquence générée par un Quartz qui est de 8 Mhz.

2- D'un afficheur LCD (2 lignes 16 caractères) qui nous permet de visualiser à l'aide des boutons poussoirs:

- La tension aux bornes de la batterie
- Le mode: mode charge ou en mode décharge de la batterie.
- Le courant délivré par la batterie s'il y a utilisation.
- La puissance délivrée par la batterie (puissance consommée).
- La tension aux bornes du panneau photovoltaïque.

## ***CHAPITRE IV : Régulateur de charge / décharge à base du PIC16F876A***

3-De trois LEDs de couleur différentes dont:

- La LED jaune indique, la charge complète de la batterie.
- La LED verte indique, le fonctionnement normal de la batterie.
- La LED rouge indique, une décharge critique de la batterie.

Et l'allumage des trois LEDs, indique une surchauffe de la batterie.

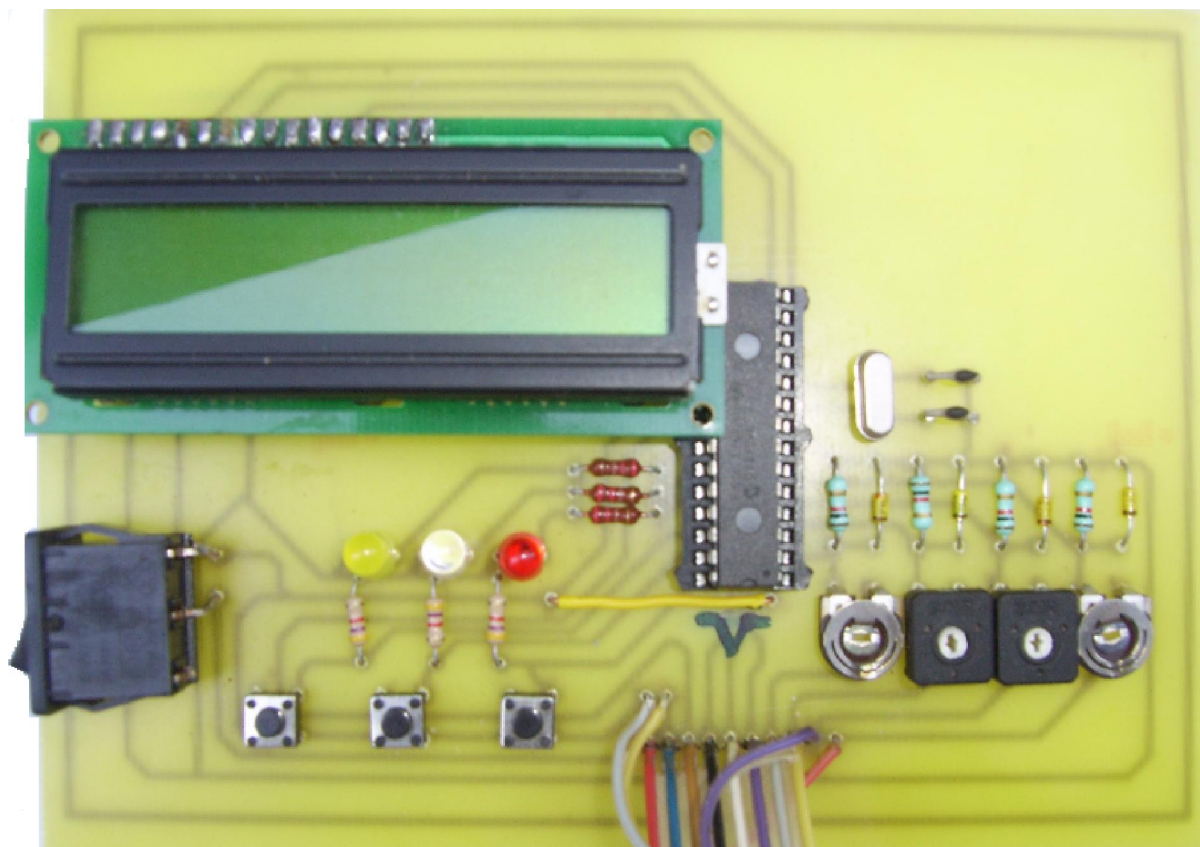
4- De quatre diodes Zener comme protection pour les canaux du convertisseur analogique numérique (l'ADC du PIC 16F876A).

5-De quatre ponts de résistances, dont quatre potentiomètres de 10 K , l'ajustement de ces derniers nous permet d'obtenir un rapport de un sixième de la tension arrivant sur l'ADC.

6- D'un potentiomètre de 5 K pour ajuster le contraste de l'afficheur LCD.

7- D'un bouton On/Off.

8- De deux nappes qui relient le Bloc de commande au Bloc de commutation, et la CTN au Bloc de commande.



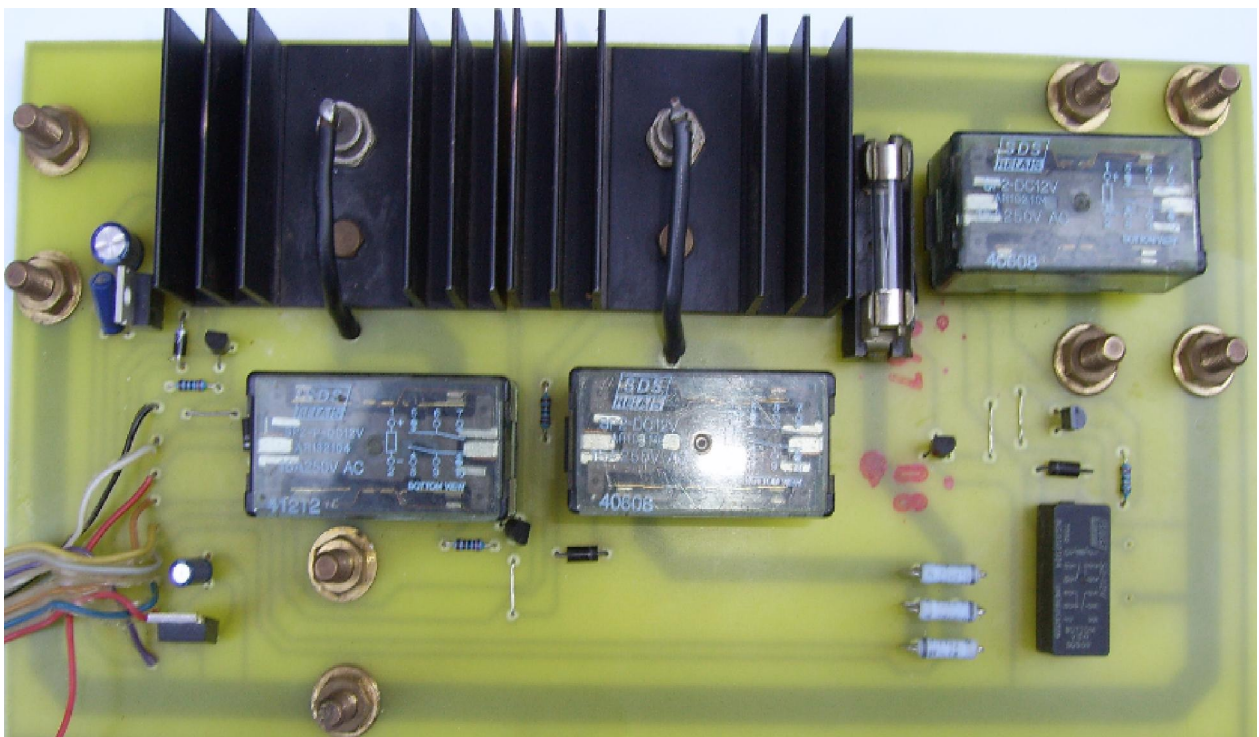
**-Fig.22- Bloc de contrôle-**



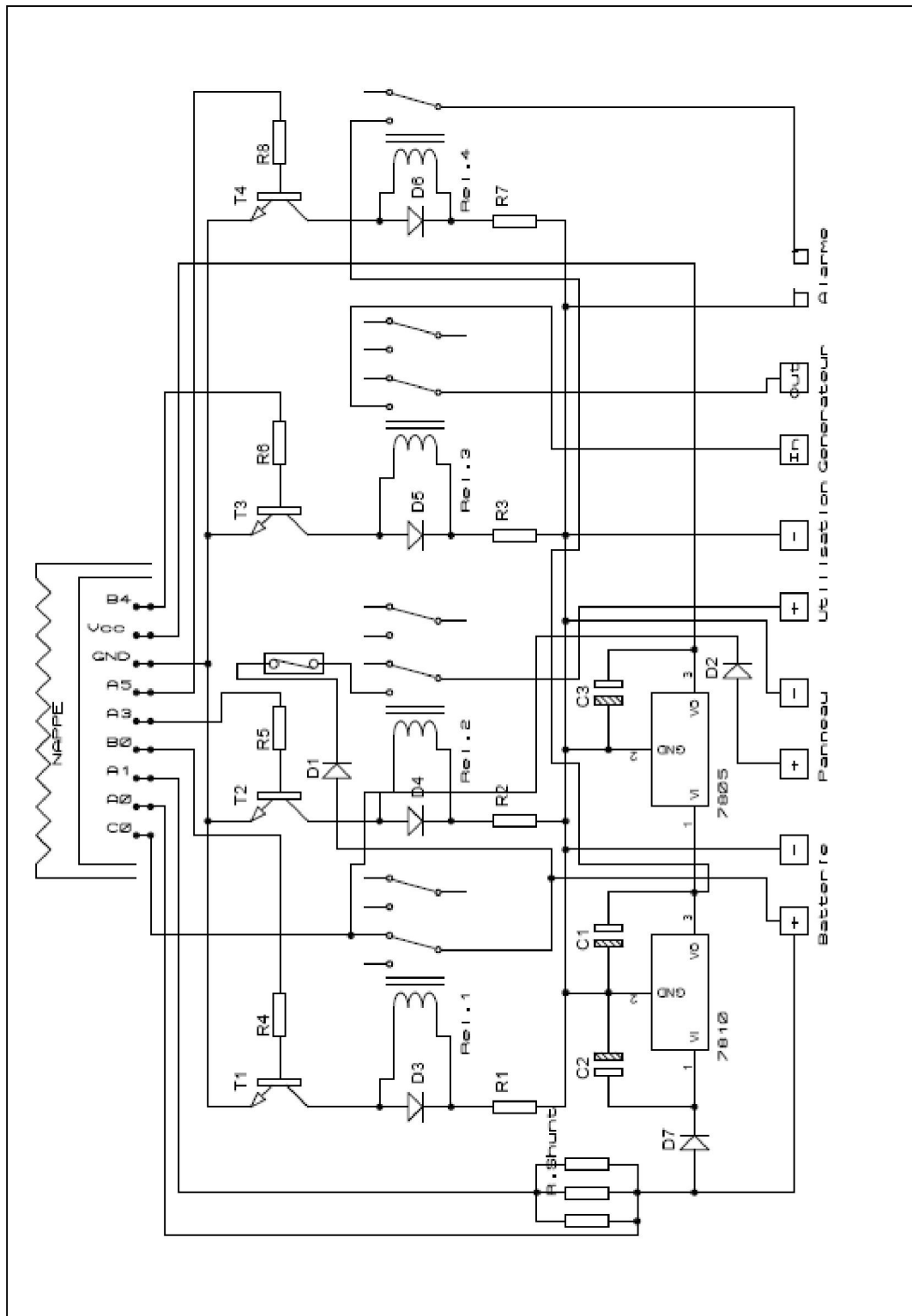
**b) Bloc de commutation :**

Il représente la partie de puissance de notre régulateur, et il contient ;

- 1-Quatre relais, et des diodes de roue libre pour la commande de ;
  - Panneau photovoltaïque.
  - La batterie.
  - Groupe électrogène
  - L'alarme.
- 2-Quatre transistors avec résistance sur chaque base de ces derniers; pour la commande des relais.
- 3-Deux diodes de puissance d'anti retour accompagnées de deux radiateurs dissipatifs.
- 4-Deux régulateurs de tension ;
  - Le LM7810 pour alimenter les relais, et le LM7805 pour alimenter le bloc de commande et la sonde de température.
- 5-Trois résistances de shunt de 0,27  $\Omega$  montés en parallèle à la sortie de la batterie qui nous donnent un shunt de 0,1  $\Omega$ .
- 6-Un fusible de 8A pour la protection.



**-Fig.24- Bloc de commutation-**

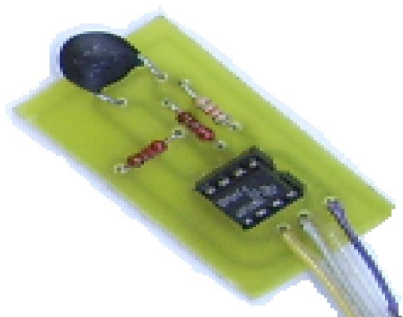


**-Fig.25-Schéma électrique de bloc de commutation-**

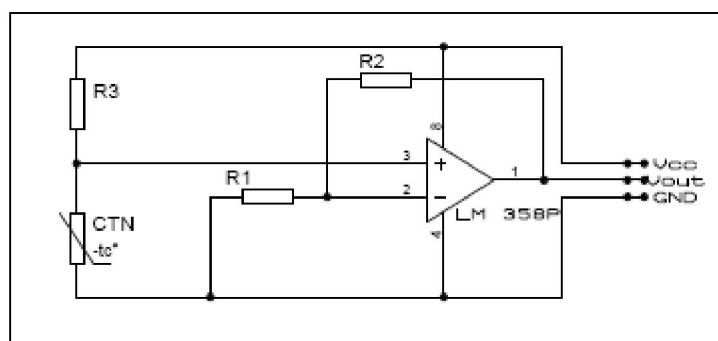
### **C) La sonde de température :**

Pour le contrôle de la température on a utilisé ;

-Une CTN (Capteur de Température à coefficient Négatif) qui délivre une tension  $V$  de faible valeur qui varie avec la température ce qui nécessite une amplification, et pour ça on a utilisé l'amplificateur LM 358P avec un gain égal à  $(R_2/R_1) + 1$ , cette tension ainsi amplifiée est envoyée vers le bloc de contrôle.



**-Fig.26- La sonde de température-**



**-Fig.27 -Schéma électrique de la sonde de température-**

#### **IV-3-1-2-2- Principe de fonctionnement :**

La tension d'entrée du régulateur est fournie par le générateur photovoltaïque (panneau solaire) et qui est de **21.6V** en valeur nominale.

-pendant chaque intervalle (environ 6 secondes), le PIC prendra la température de la batterie et aussi sa tension afin de faire la comparaison avec la valeur précédente pour déterminer le sens de la variation de la tension de la batterie positif pour la charge et négatif pour la décharge, état antérieur en cas d'égalité.

## **CHAPITRE IV : Régulateur de charge / décharge à base du PIC16F876A**

La surveillance de la batterie s'effectuera comme suit :

\* D'abord l'acquisition des valeurs analogiques :

- La mesure de la tension de la batterie va être réduite par le pont de résistances R4/pot2 avec un rapport de  $1/6^{\text{ème}}$ . La valeur obtenue est amenée vers la pince RA0 du PIC c'est-à-dire, le premier canal du convertisseur analogique numérique. C'est la tension avant la résistance shunt.

- La mesure de la tension de la batterie après la résistance de shunt va être réduite par le pont de résistances R5/pot3 avec un rapport de  $1/6^{\text{ème}}$ . La valeur obtenue est amenée vers la pince RA1 du PIC c'est-à-dire, le deuxième canal du convertisseur analogique numérique.

- La mesure de la tension du panneau photovoltaïque va être réduite par le pont de résistances R7/pot5 avec un rapport de  $1/6^{\text{ème}}$ . La valeur obtenue est amenée vers la pince RA3 du PIC c'est-à-dire, le premier canal de l'ADC de ce dernier.

- La mesure de la température s'effectue à l'aide d'une sonde qui se compose d'une CTN et d'un amplificateur le LM358P, la tension obtenue est réduite par un pont de résistances R6/pot4 avec un rapport de  $1/6^{\text{ème}}$ . La valeur obtenue est amenée vers la pince RA2 du PIC, c'est-à-dire le troisième canal de l'ADC.

Il s'agit de relever deux tensions clefs, la première correspond à une température de  $70^{\circ}\text{C}$ , c'est pour indiquer la surchauffe de la batterie, la seconde correspond à  $50^{\circ}\text{C}$ , elle indique le retour à la normale et la fin de la surchauffe.

Le capteur le mieux indiqué pour cette relève de température de la batterie est le capteur de température à contacte, mais il est cher et indisponible dans les magasins de vente de composants électroniques.

### **• Protection anti-surchauffe :**

Après la mesure des différentes valeurs analogiques et leurs conversions, le PIC va d'abord contrôler la température qui est un paramètre essentiel de notre régulateur solaire donc il va procéder comme suit :

#### **a) La température $\geq 70^{\circ}\text{C}$ (Surchauffe):**

- Déconnecter l'utilisation et le panneau qui sont généralement la cause de cette surchauffe, en actionnant les relais Rel1 et Rel2.
- Connexion du générateur de secours en actionnant le relais Rel3.
- Allumage simultané des trois LEDs indiquant l'état de surchauffe.

**b) La température  $\leq 70^{\circ}\text{C}$  :**

- Si l'état de surchauffe a déjà été atteint le PIC va attendre que la température descende au dessous de  $50^{\circ}\text{C}$  pour revenir au mode de fonctionnement normal.

- Si l'état de surchauffe n'a pas été atteint, donc le fonctionnement sera normal.

• **Protection contre la surcharge et la décharge profonde:**

**a) Tension de la batterie supérieure ou égale 14.1V :**

- Déconnexion du panneau photovoltaïque en actionnant le relais Rel1  
Et allumage de la LED jaune indiquant la charge totale de la batterie.

Le panneau une fois déconnecté ne sera connecté qu'à la tension de la batterie inférieure ou égale à 11.9V.

**b) Tension de la batterie supérieure ou égale  $\geq 13.9\text{V}$  :**

- Allumage de la LED jaune indiquant la charge totale de la batterie.

**c) Tension de la batterie supérieure à 12V et inférieure à 13.9 :**

- Allumage de la LED verte indiquant que la batterie est en fonctionnement normal.

- Le relais Rel2 est actionné c'est-à-dire que l'utilisation est branchée.

- Le relais Rel1 reste comme il est, si c'est en mode charge il reste connecté sinon il est déconnecté.

- Le relais Rel3 du générateur de secours est coupé.

**d) Tension de la batterie inférieure ou égale à 12V :**

- Allumage de la LED rouge indiquant que la batterie est déchargée.

**e) Tension de la batterie inférieure ou égale à 11.9V :**

- Allumage de la LED rouge indiquant que la batterie est déchargée.

- Le relais Rel3 du générateur de secours est enclenché.

- Le relais Rel1 du panneau solaire est enclenché.

- Le relais Rel2 de l'utilisation est coupé.

Le panneau ainsi connecté ne sera déconnecté qu'à la valeur de tension de la batterie supérieure ou égale à 14.1V.

**f) Tension de la batterie inférieure ou égale à 11.3V :**

- Le relais Rel4 de l'alarme est enclenché, signalant qu'il y'a un problème soit au niveau des connexions (les files) soit le panneau ou la batterie est hors service ou endommagée.

C'est un seuil critique qui nécessite une vérification de la part de l'utilisateur, dans le cas de fonctionnement normal ce seuil n'est jamais atteint.

Ce régulateur solaire nous permet en plus des signalisations visuelles (LEDs) l'affichage sur écran LCD de différents menus qui sont :

- Menu mode Charge ou Décharge avec affichage de la tension de la batterie.
- Menu courant qui indique le courant délivré par la batterie.
- Menu puissance qui indique la puissance fournie par la batterie ou la puissance consommée par l'utilisation.
- Menu panneau qui indique la tension du panneau, ce menu peut s'avérer utile lors de l'installation du panneau pour repérer la meilleure position de ce dernier par rapport à l'ensoleillement, et aussi de détecter une panne au niveau du panneau.

Ces menus sont accessibles grâce à trois boutons poussoirs :

- Bouton menu permet d'accéder aux autres menus et aussi de revenir au menu mode.
- Deux boutons Droit et gauche qui permettent de naviguer entre les différents menus à savoir le menu courant, puissance et panneau.

Il faudra noter que la protection anti-surchauffe est prioritaire par rapport à la protection contre la surcharge et la décharge profonde ceci afin d'éviter tout dommage au niveau de la batterie et tout risque quand à son explosion.

### **IV-4- Brève présentation du PIC16F876A :**

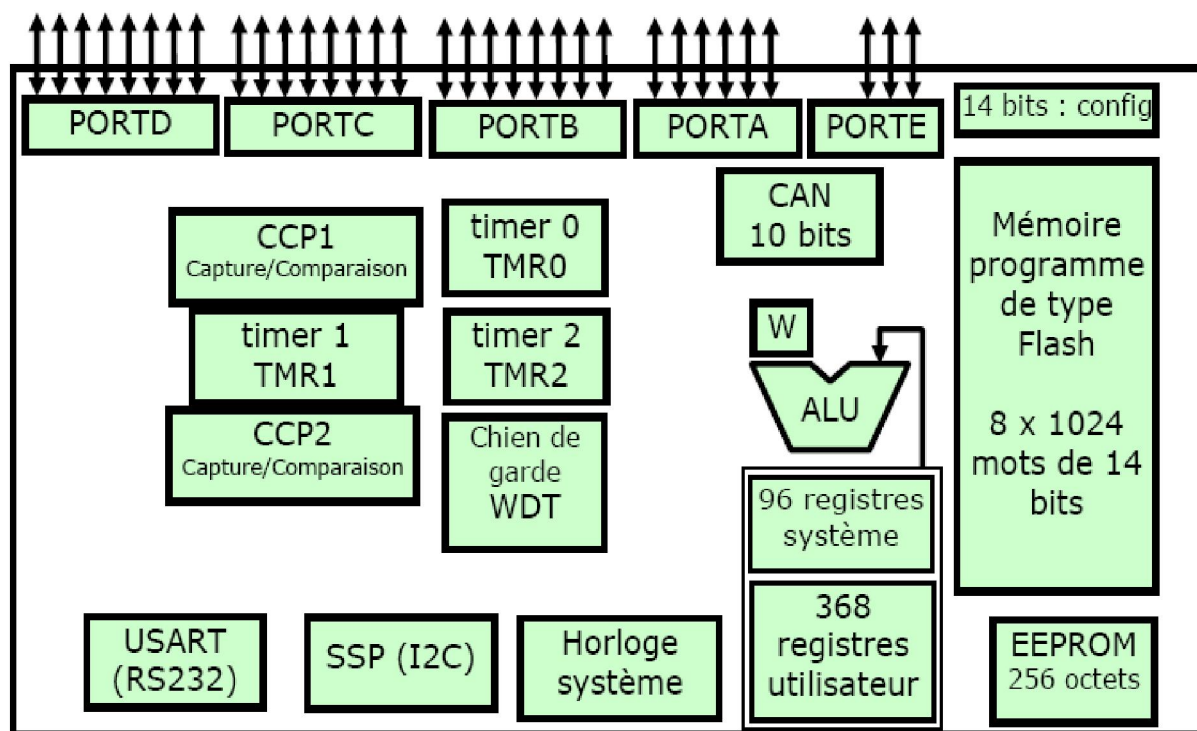
Les PICs sont des microcontrôleurs à architecture RISC (Reduce Instructions Construction Set), ou encore composant à jeu d'instructions réduit. L'avantage est que plus on réduit le nombre d'instructions, plus leur décodage sera rapide ce qui augmente la vitesse de fonctionnement du microcontrôleur.

La famille des PICs est subdivisée en 3 grandes familles : La famille **Base-Line**, qui utilise des mots d'instructions de 12 bits, la famille **Mid-Range**, qui utilise des mots de 14 bits (et dont fait partie le 16F876A), et la famille **High-End**, qui utilise des mots de 16 bits.

**a) Les caractéristiques principales du PIC 16F876A sont :**

- Ø Une mémoire programme de type EEPROM flash de 8K mots de 14 bits,
- Ø Une RAM donnée de 368 octets,
- Ø Une mémoire EEPROM de 256 octets,
- Ø Trois ports d'entrée sortie, A (6 bits), B (8 bits), C (8 bits),
- Ø Convertisseur Analogiques numériques 10 bits à 5 canaux,
- Ø USART, Port série universel, mode asynchrone (RS232) et mode synchrone
- Ø SSP, Port série synchrone supportant I2C
- Ø Trois TIMERS avec leurs Prescalers, TMR0, TMR1, TMR2
- Ø Deux modules de comparaison et Capture CCP1 et CCP2
- Ø Un chien de garde,
- Ø 13 sources d'interruption,
- Ø Générateur d'horloge, à quartz (jusqu' à 20 MHz) ou à Oscillateur RC
- Ø Protection de code,
- Ø Fonctionnement en mode sleep pour réduction de la consommation,
- Ø Programmation par mode ICSP (*In Circuit Serial Programming*) 12V ou 5V,
- Ø Possibilité aux applications utilisateur d'accéder à la mémoire programme,
- Ø Tension de fonctionnement de 2 à 5V,
- Ø Jeux de 35 instructions

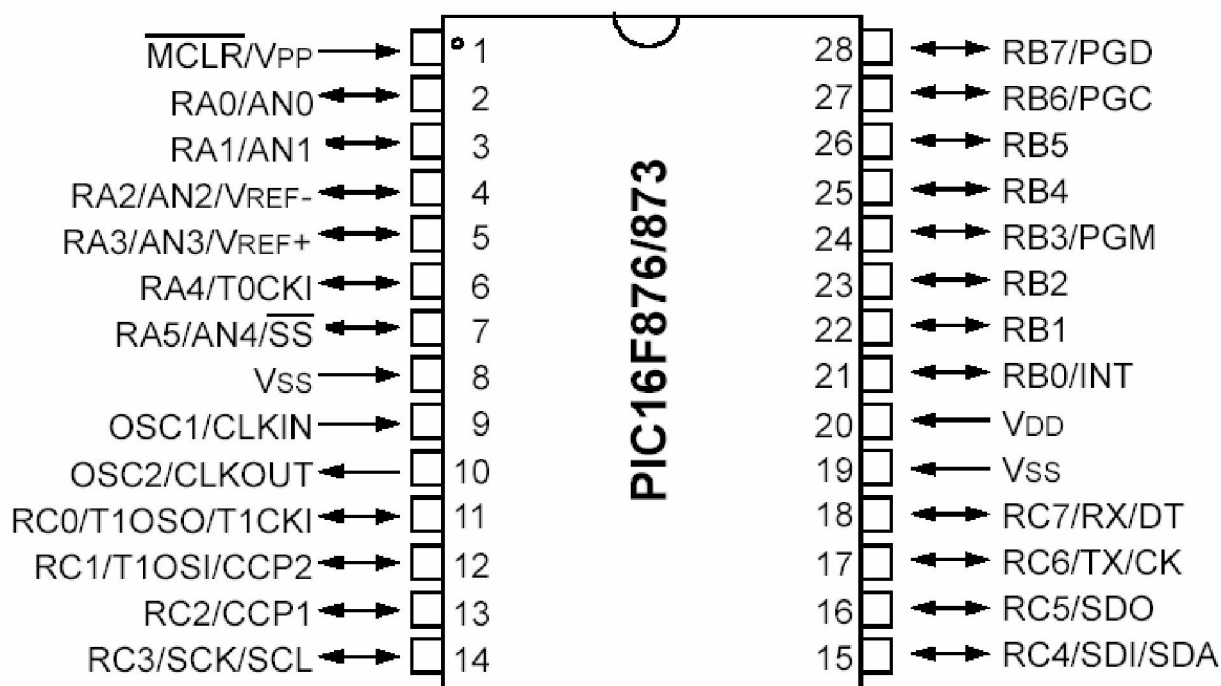
La figure suivante nous montre la structure interne du PIC 16F876A :



**-Fig.28- la structure interne du PIC 16F876A -**

### IV-4-1- Aspect externe du PIC16F876A :

Le boîtier d'un PIC 16F876 est composé de 28 broches réparties équitablement de chaque côté comme le montre le schéma suivant:



**-Fig.29- Le brochage de PIC 16F876A-**

Le PIC16F876A est équipé de 22 lignes d'entrées/sorties réparties en trois ports parallèles bidirectionnels :

- 6 lignes sur le port A : RA0 à RA5
- 8 lignes sur le port B : RB0 à RB7
- 8 lignes sur le port C : RC0 à RC7

### IV-4-2- La mémoire programme (Flash) :

Le PIC16F876A possède une mémoire de 8 x 1024 (8 K.O) mots de 14 bits qui sert à stocker le programme, mais elle est accessible par programme et peut donc être utilisée comme une extension de la mémoire EEPROM de données. Elle est non volatile (flash) et reprogrammable à souhait. Chaque position de 14 bits contient une instruction.

L'emplacement du programme peut se situer à n'importe quel endroit de la mémoire. Cependant il faut savoir que suite à un RESET ou lors de la mise sous tension, le PIC commence l'exécution à l'adresse 0000H. De plus, lorsqu'il y a une interruption, le PIC va à l'adresse 0004H. Il est donc nécessaire de bien organiser le programme si celui-ci utilise des interruptions.

### **IV-4-3- La mémoire RAM – Registre :**

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

Ø 96 positions sont réservées au SFR (Special Function Registers) qui sont les registres de configuration du PIC.

Ø Les 416 positions restantes constituent les registres GPR (General Purpose Registers) ou RAM utilisateur. Sur le 16F876 et 16F877, 3 blocs de 16 octets chacun ne sont pas implantés physiquement d'où une capacité de RAM utilisateur de 368 GPR.

### **IV-4-4- L'UAL et le registre W:**

L'UAL est une Unité Arithmétique et logique de 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 passent par lui. On peut avoir :

- Une instruction sur un seul opérande qui est en général un registre situé dans la RAM.

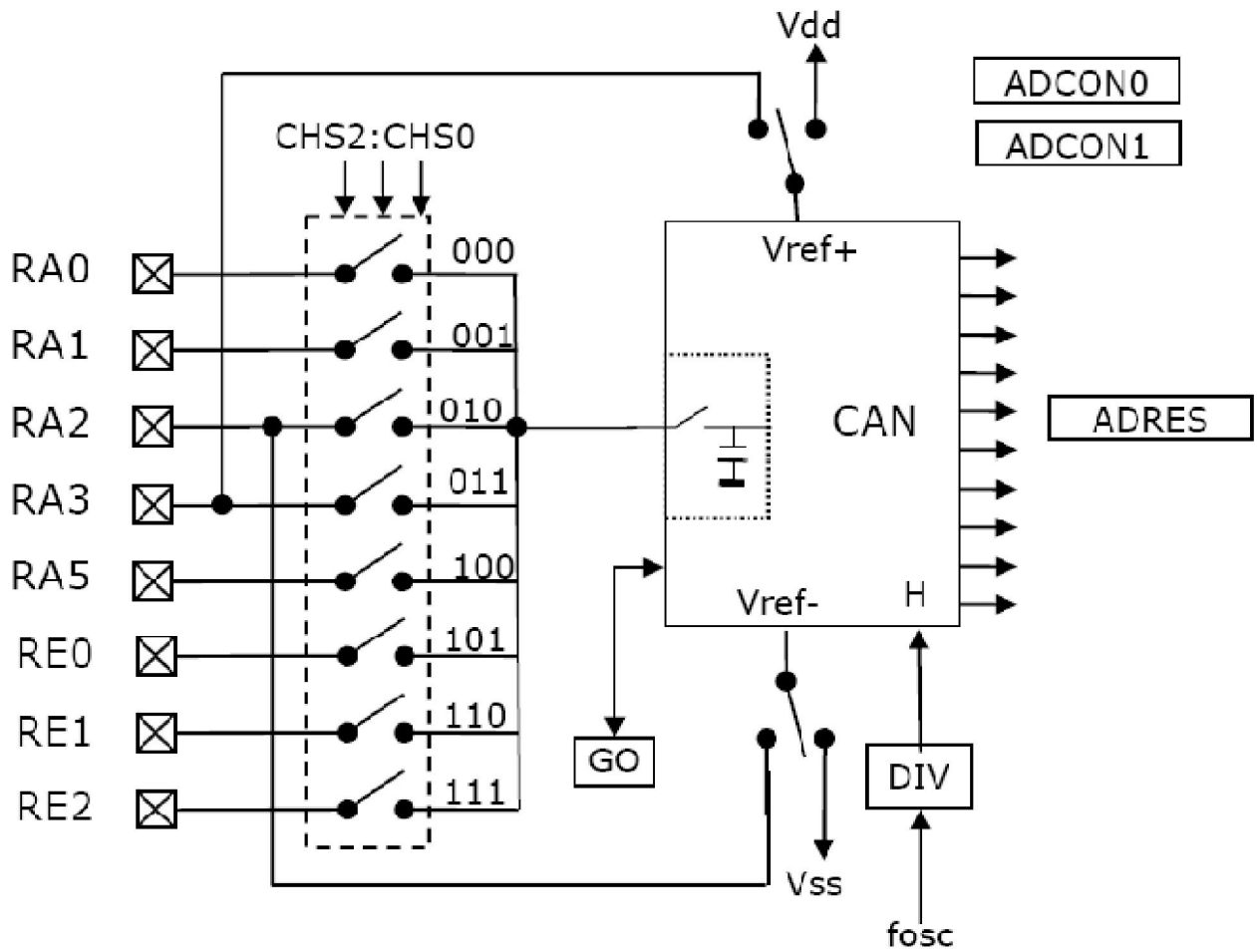
- Une instruction sur 2 opérandes. Dans ce cas, l'une des deux opérandes est toujours l'accumulateur W, l'autre peut être soit un registre soit une constante.

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

### **IV-4-5- Le convertisseur Analogique Numérique (L'ADC) :**

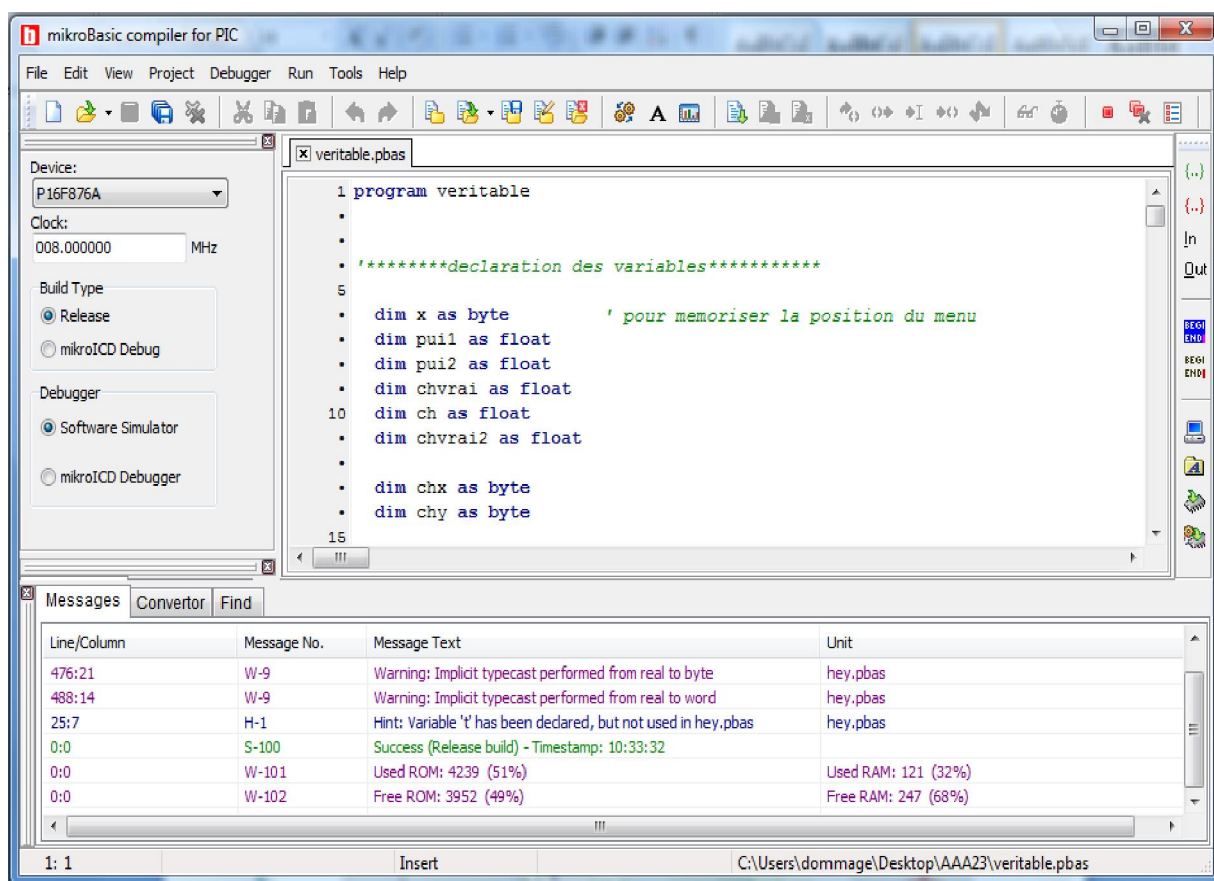
Ce module est constitué d'un convertisseur Analogique Numérique de 10 bits dont l'entrée analogique peut être connectée sur l'une des 5 entrées analogiques externes. On dit qu'on a un CAN à 5 canaux. Les entrées analogiques doivent être configurées en entrée à l'aide des registres TRISA et/ou TRISE. L'échantillonneur bloqueur est intégré, il est constitué d'un interrupteur d'échantillonnage et d'une capacité de blocage de 120 pF.

Les tensions de références permettant de fixer la dynamique du convertisseur. Elles peuvent être choisies parmi Vdd, Vss, Vr+ ou Vr-

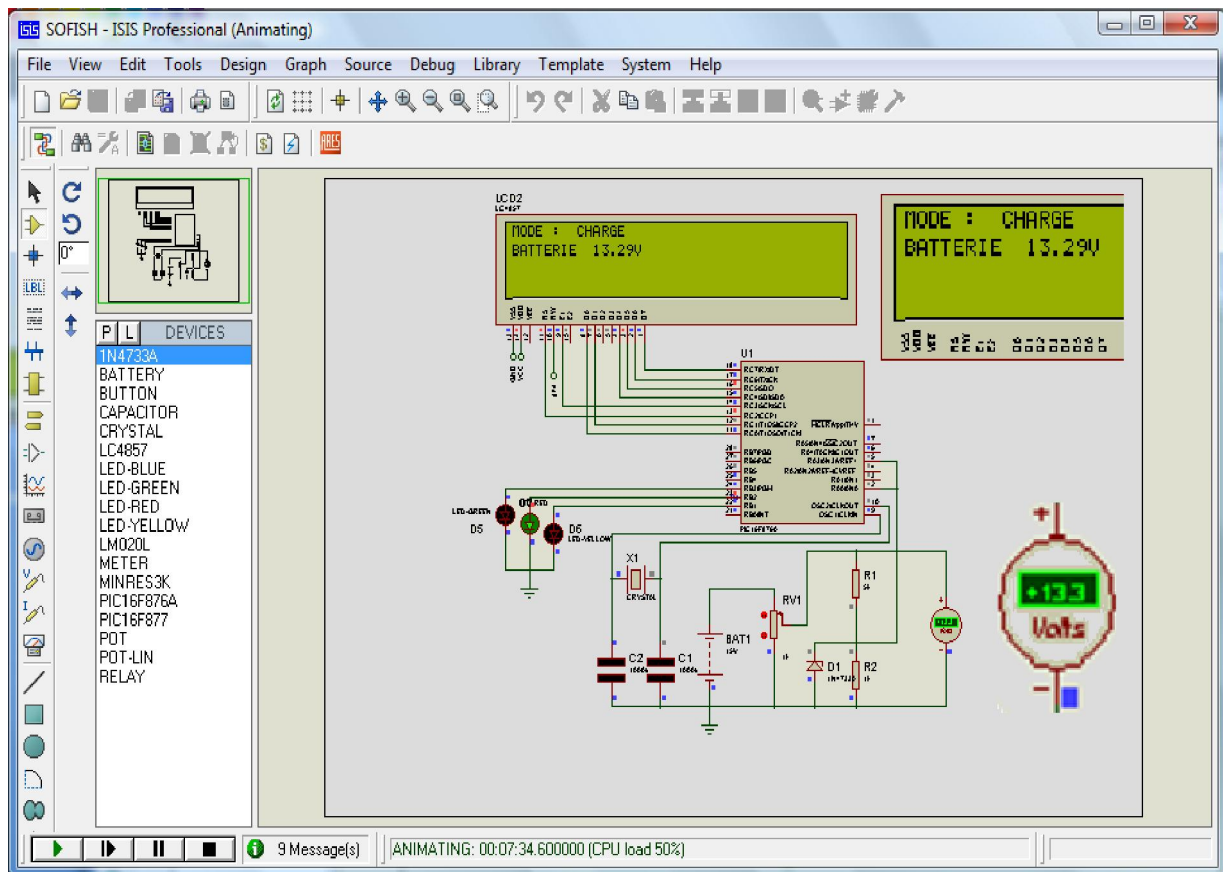


## IV-7- Programme du PIC16F876A :

Le programme du microcontrôleur du régulateur photovoltaïque, a été écrit et compilé sous logiciel « **Micro Basic** », on récupère par la suite le fichier hexadécimal « **.Hex** » et à l'aide de logiciel de simulation « **ISIS Pro.7.4** », on introduit ce dernier dans le pic 16F876A et on lance la simulation avec tout le circuit qui va avec.

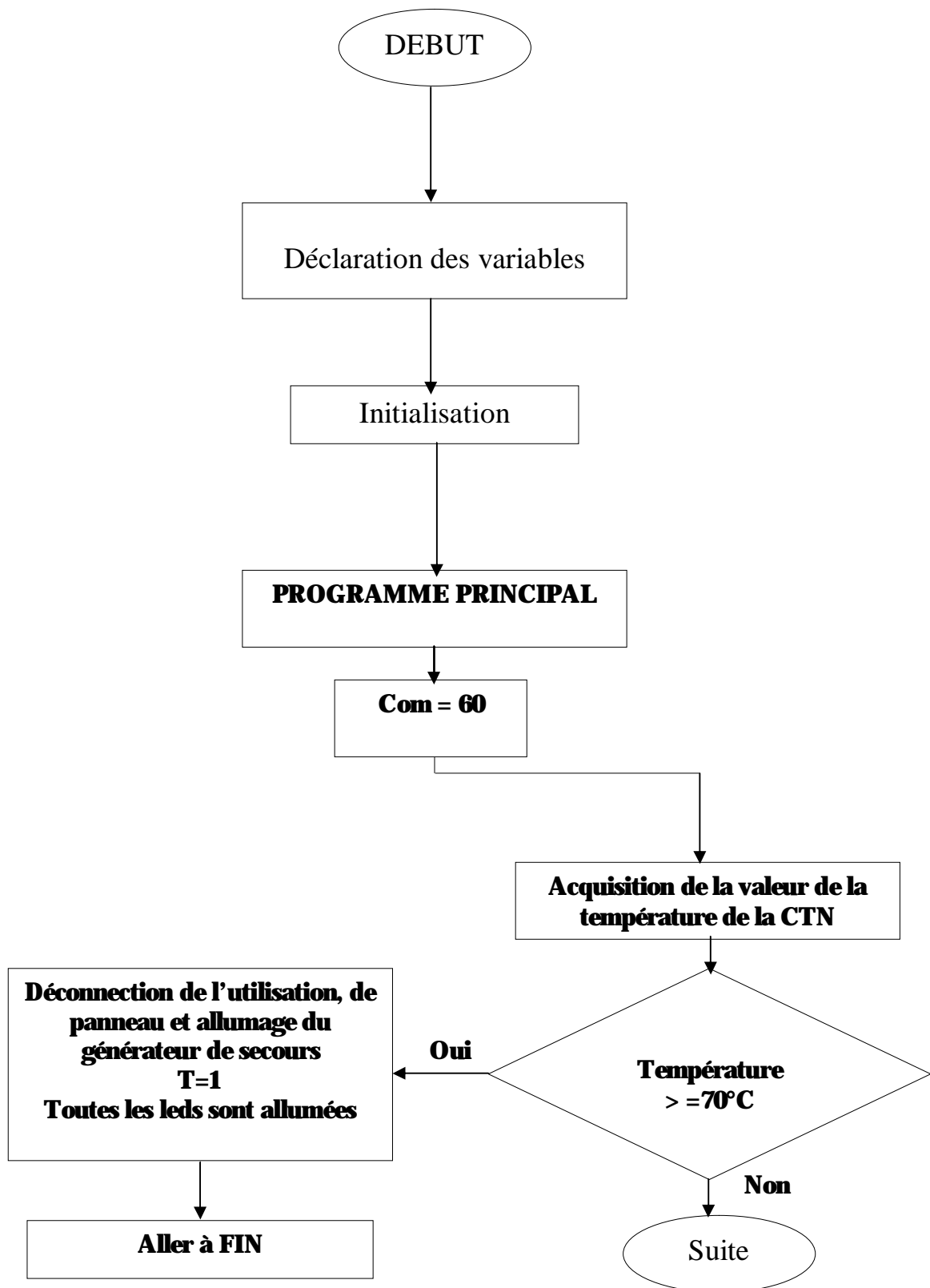


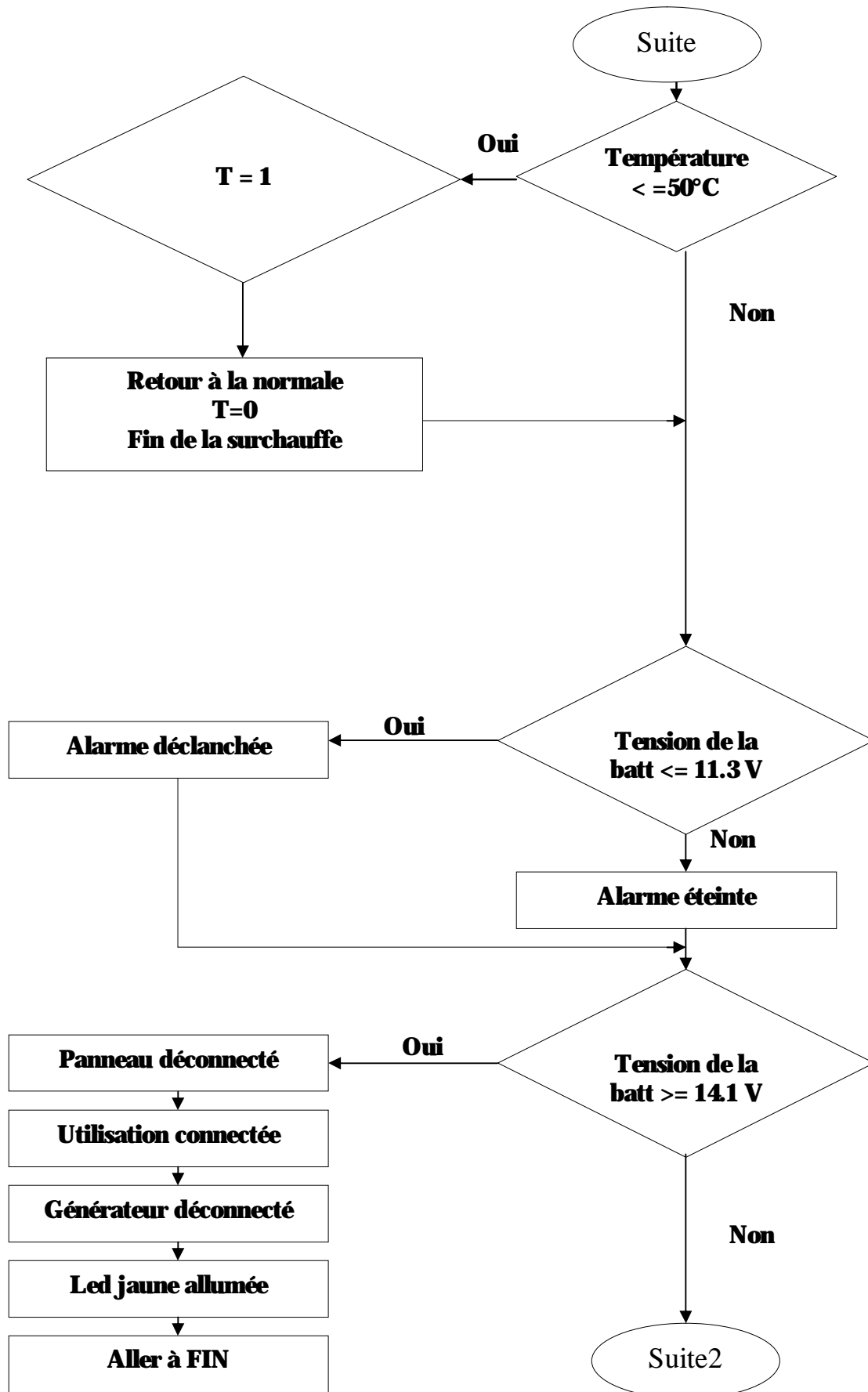
**-Fig.30-Compilation du programme sous logiciel Micro Basic-**

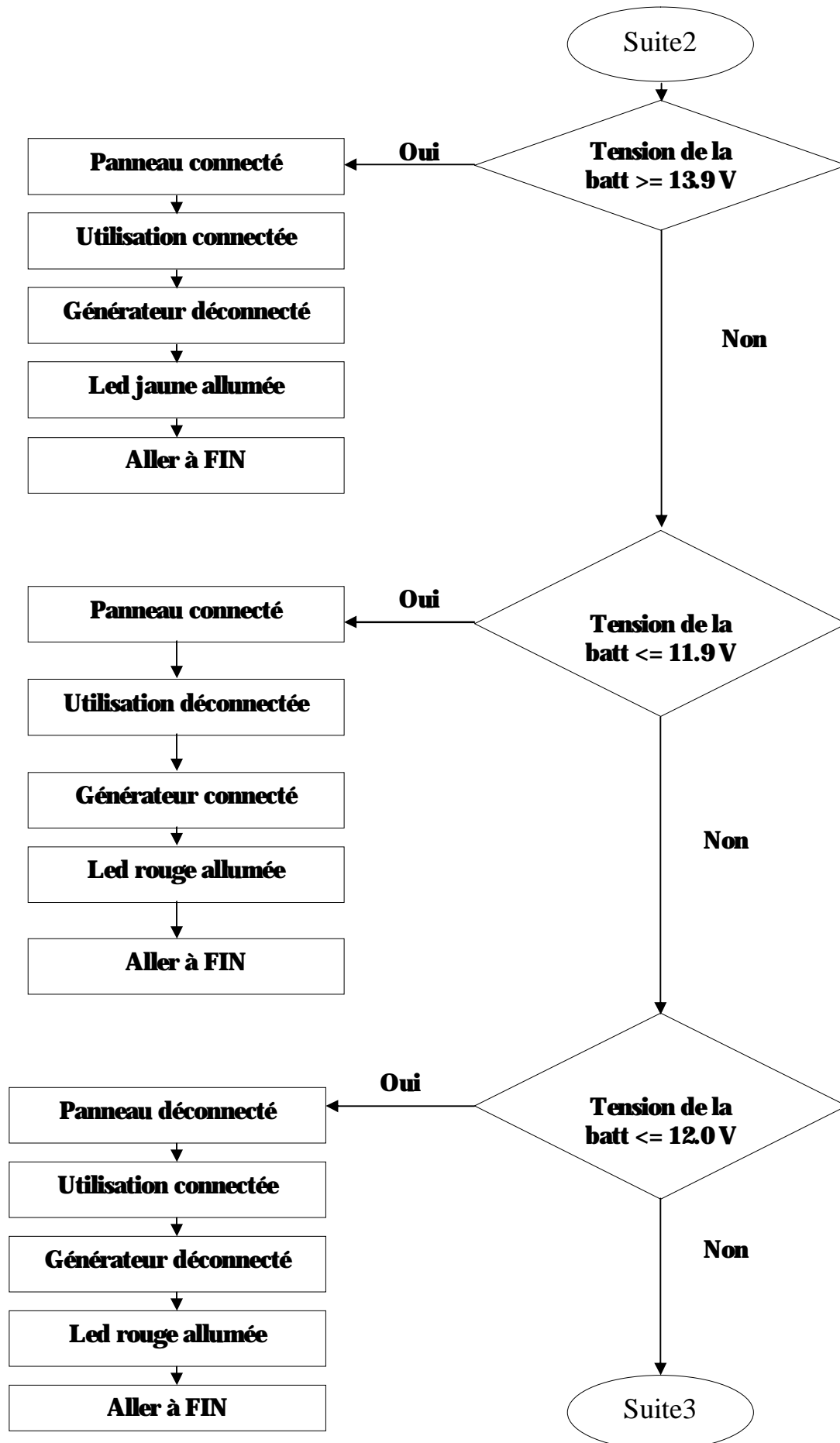


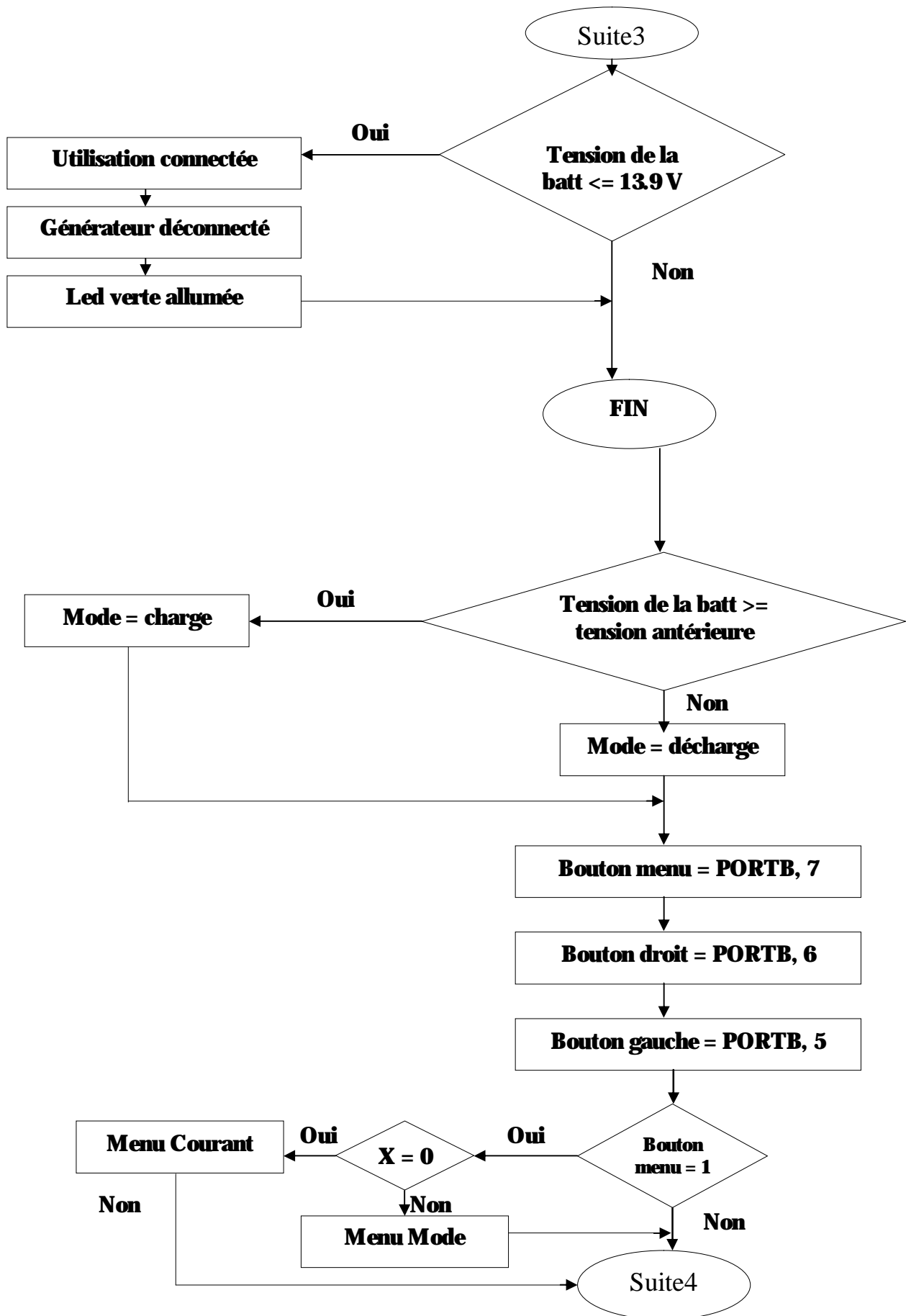
**-Fig31-Simulation du programme sous logiciel ISIS Professionnel-**

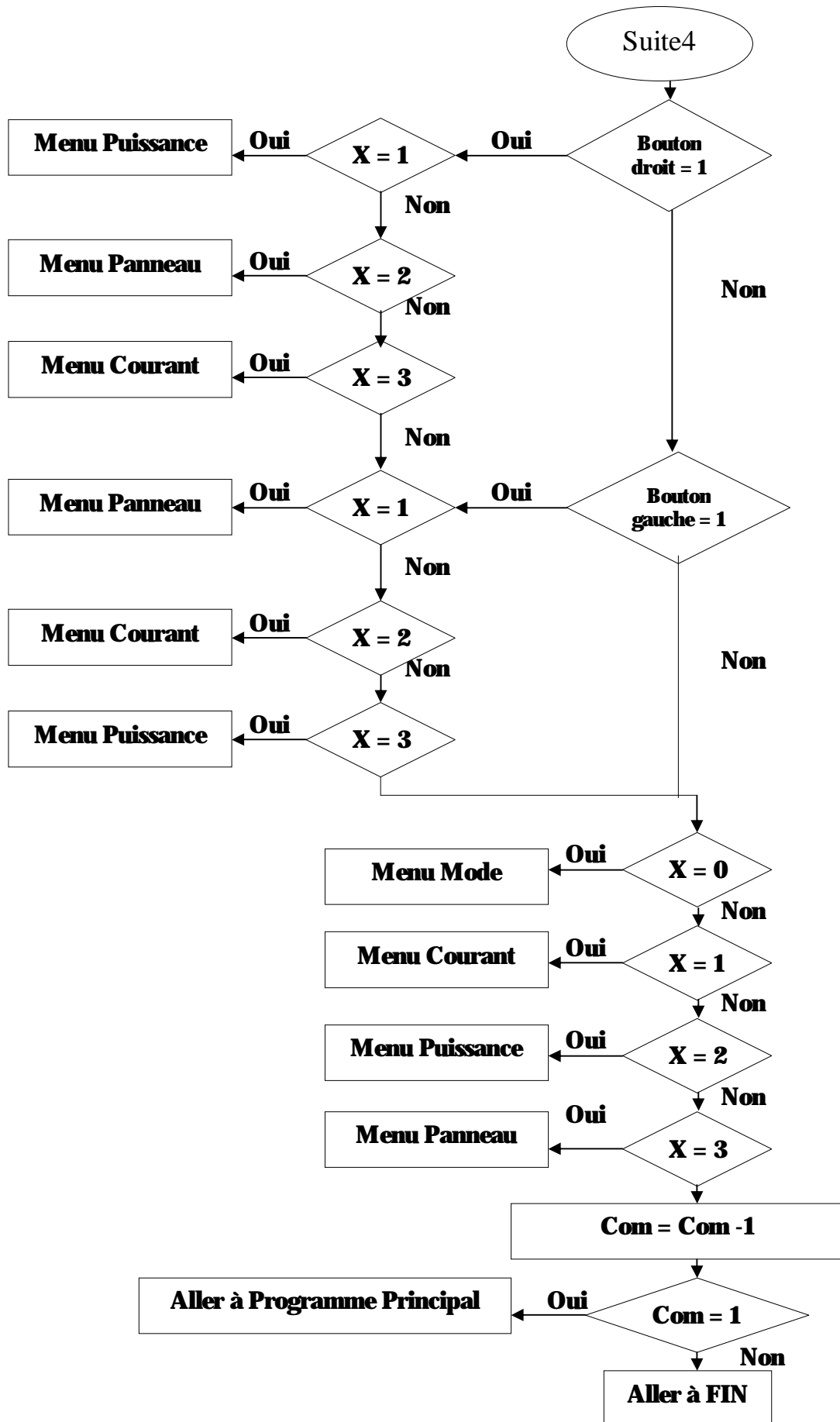
Les organigrammes :

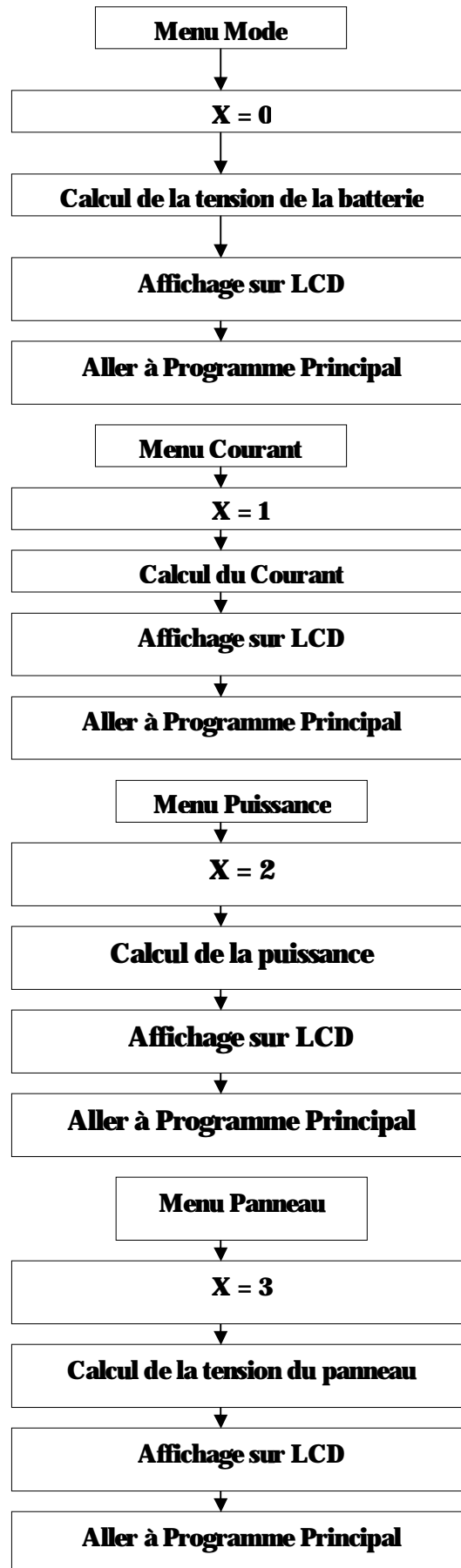












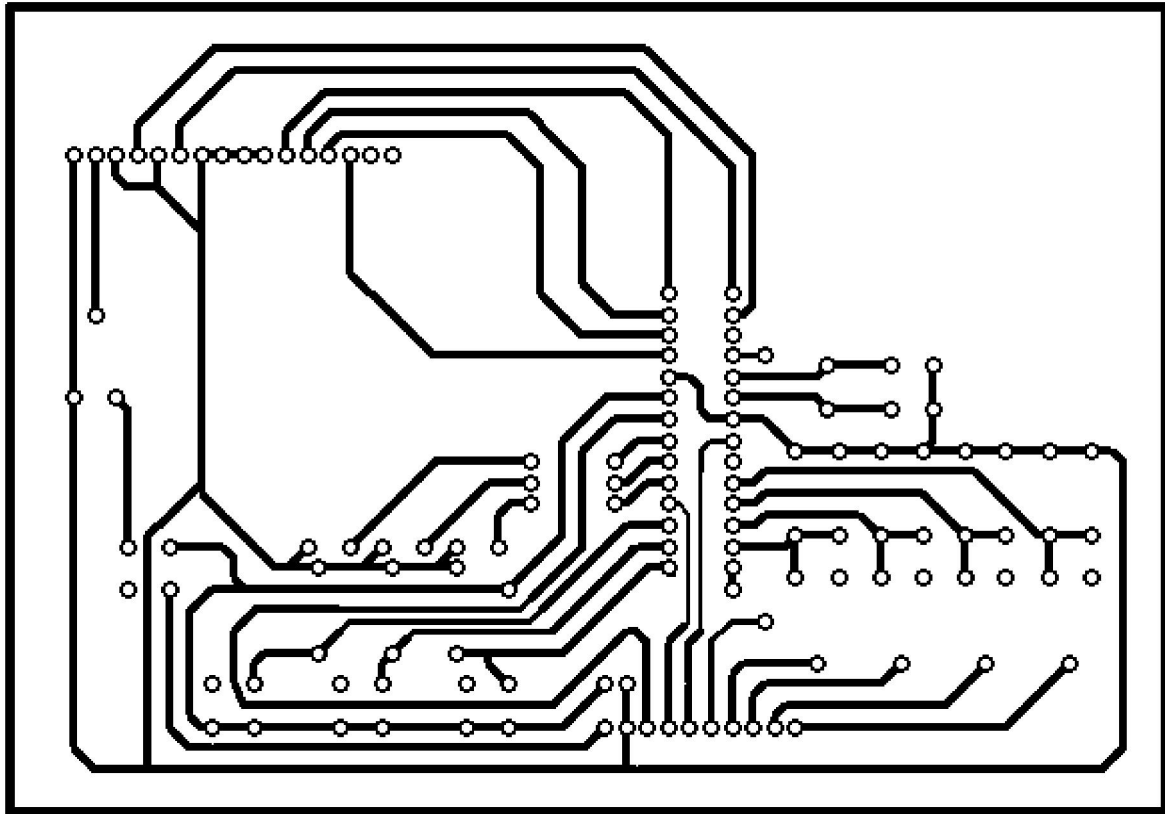
**Introduction :**

Pour la réalisation pratique on est passé par deux étapes essentielles :

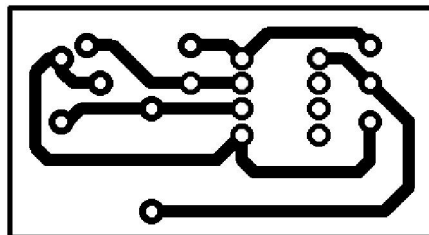
- Ø La première, c'est la réalisation des circuits imprimés et l'implantation des composants.
- Ø La deuxième, consiste la programmation du PIC 16F876A.

**V-1- La réalisation du circuit imprimé et l'implantation des composants :****V-1-1- Les circuits imprimés :****V-1-1-1- Le typon :**

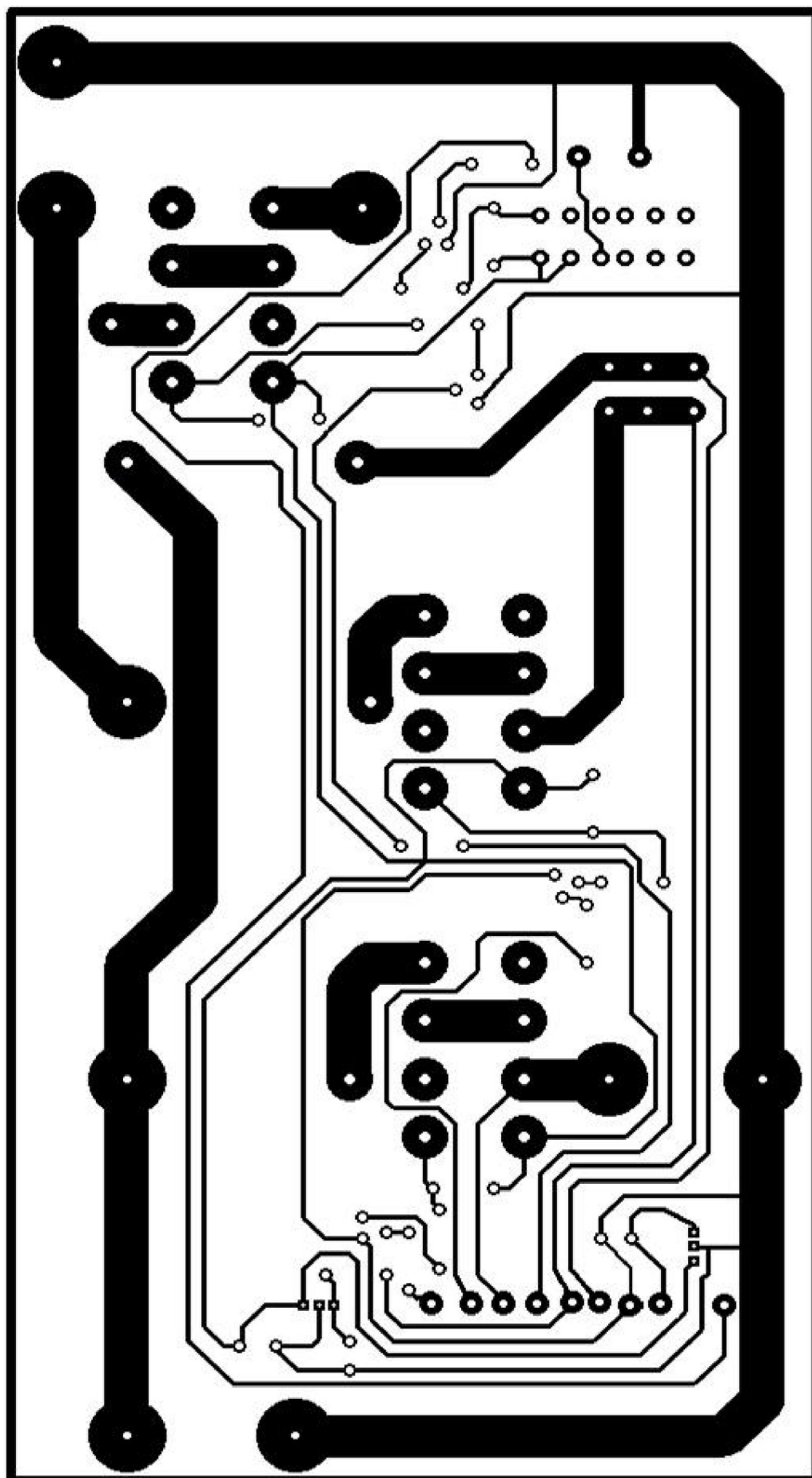
Le logiciel qu'on a utilisé afin d'aboutir aux typons du régulateur photovoltaïque (figures ci-dessous) est le logiciel « **ARESS 7.4** » son utilisation d'une manière générale n'est pas difficile et on a effectué le routage manuellement. Une fois terminé on est passé à l'impression des typons, il faut utiliser une imprimante laser de bonne qualité afin d'avoir des pistes opaques impénétrables par les UV, ce dernier est imprimé sur le papier calque.



**-Fig31 -Circuit imprimé de bloc de contrôle et de commande-**



**-Fig32 -Circuit imprimé de la CTN-**



*-Circuit imprimé de bloc de commutation et d'alimentation(Bloc de puissance)-*

**V-1-1-2- L'insolation :**

C'est une phase importante du processus de la réalisation d'un circuit imprimé.

Il faudrait bien vérifier les points suivants :

- Ø Le bon plaquage du typon sur la face sensible de la plaque.
- Ø Le sens du typon (Face Cuivré ou non).
- Ø La durée de l'insolation.

**V-1-1-3- La gravure :**

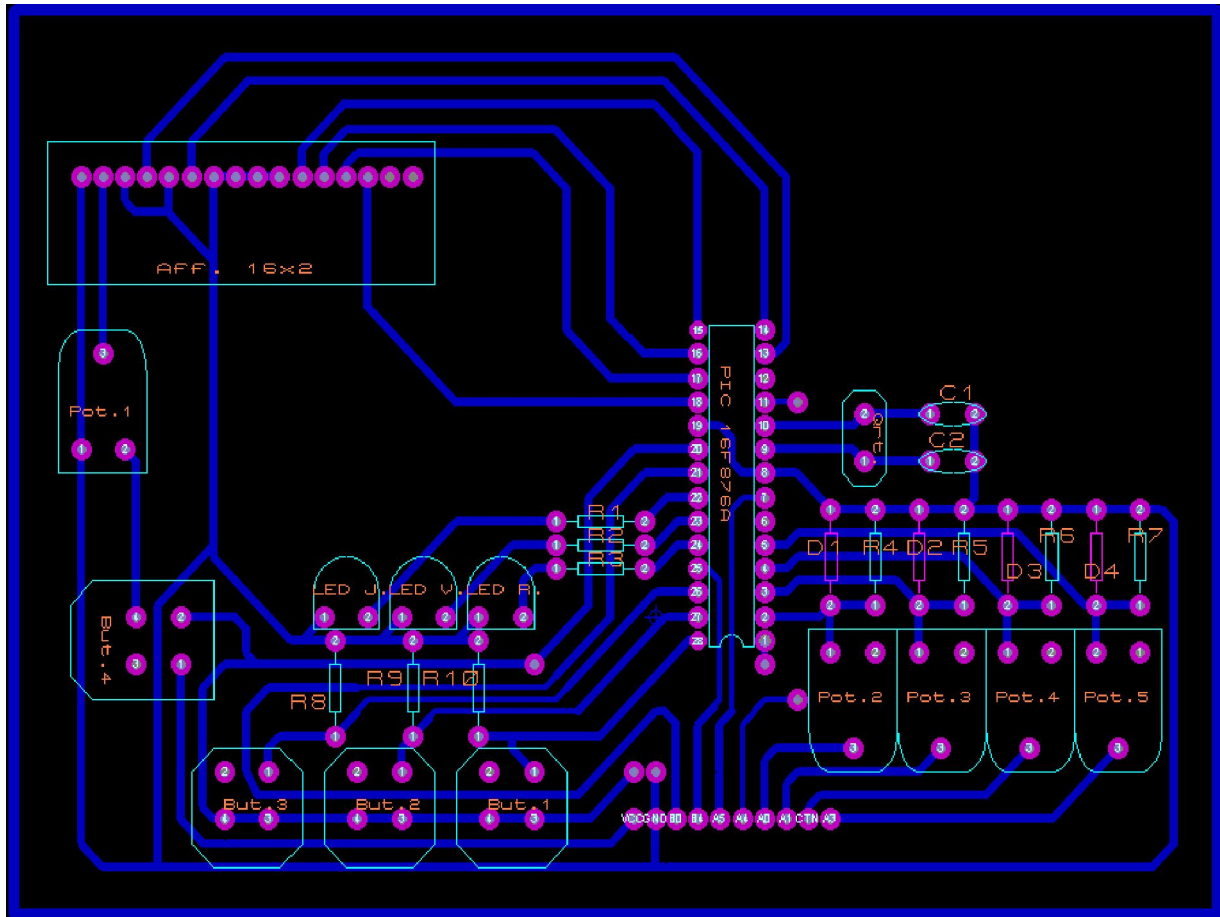
Cette étape consiste à plonger la plaque obtenue après insolation dans le révélateur pour éliminer la résine brûlée par les UV et après lavage de la plaque avec de l'eau, on la plonge dans un bain de perchlorure de fer afin d'éliminer le cuivre non protégé par la résine. Après avoir terminer on la rince à grande eau.

**V-1-1-4- Le perçage :**

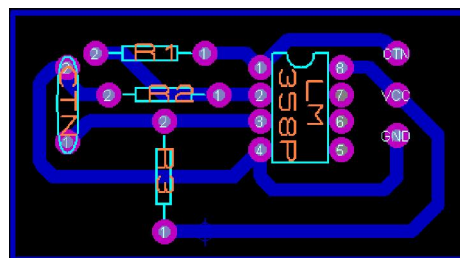
On fixe la plaque sur une planche en bois afin d'éviter tous mouvements de cette dernière pendant le perçage, et pour chaque diamètre des trous on choisit le foret qui convient.

**V-1-2- L'implantation des composants :**

Les figures ci-dessous illustrent l'implantation des composants qui sont réellement sur le circuit imprimé.

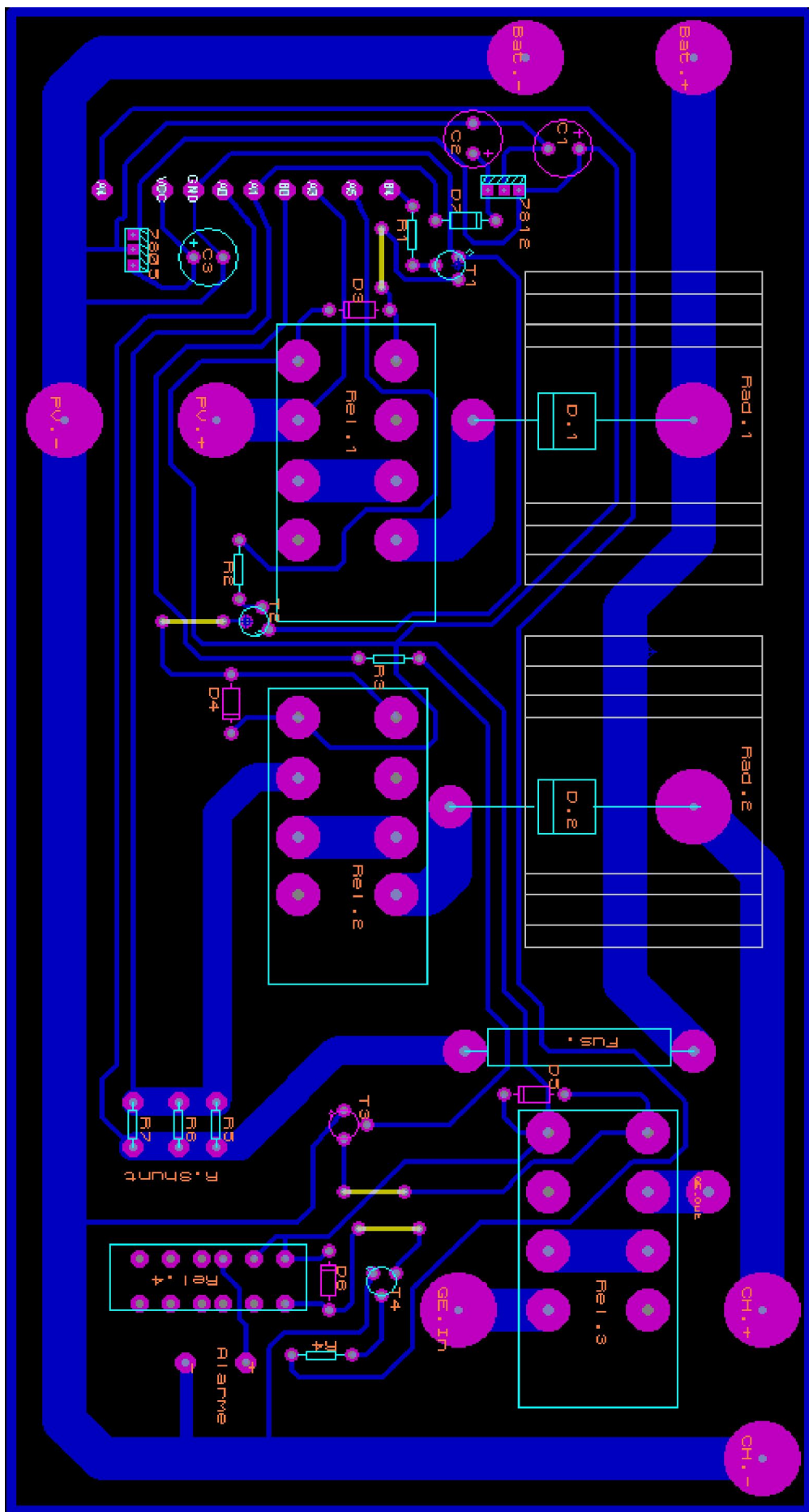


-Fig.34-Implantation des composants sur la plaque de commande-



-Fig.35-Implantation des composants sur la plaque de la CTN-

-Implantation des composants sur la plaque de commutation-



**V-2- La programmation du PIC16F876A :**

Pour programmer notre PIC, on a utilisé deux logiciels et un programmeur universel.

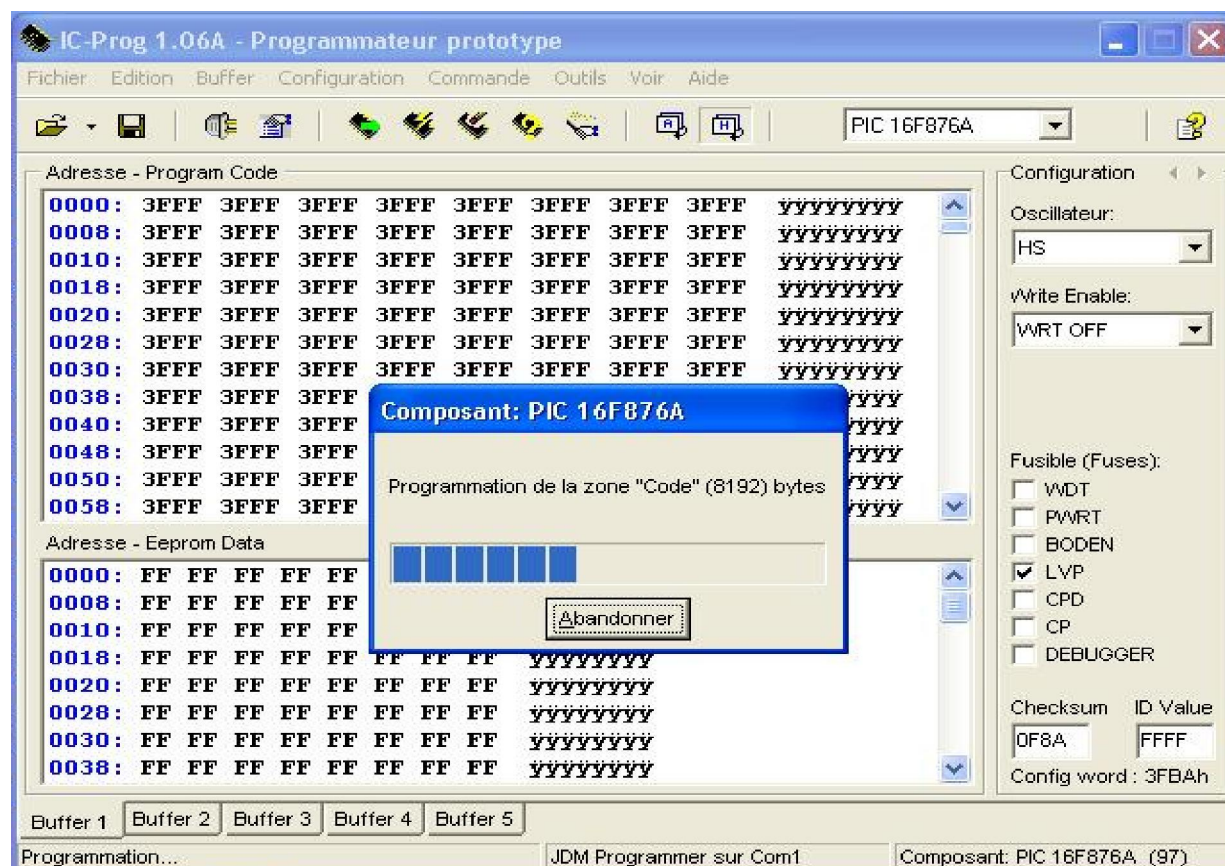
**V-2-1-Micro Basic:**

Le Micro Basic est un outil informatique conçu spécialement pour la programmation des PICs. La compilation d'un programme dans ce même logiciel génère un fichier avec l'extension « **.Hex** » ce dernier est injecté dans le PIC à l'aide de logiciel **IC Prog** et le programmeur.

**V-2-2- IC Prog:**

Pour le flashage du PIC on suit les étapes suivantes :

- 1-On place le PIC16F876A sur le support de programmeur universel.
- 2-On branche le programmeur à l'unité centrale de micro-ordinateur et le mettre sous tension.
- 3-On lance le logiciel IC Prog.
- 4-On choisit le PIC (dans notre cas c'est le 16F876A).
- 5-La configuration des paramètres de PIC sur le logiciel.



**-Fig36 -Programmation du PIC sous IC Prog-**

# La nomenclature des composants



# Nomenclature des composants

## 1)La nomenclature des composants de bloc de commande :

### a- Circuit intégré :

ü Pic 16F876A

### b- Quartz :

ü 8 Mhz

### c- Condensateurs :

ü C1,C2 : 15 pF

### d- Afficheur LCD :

ü LCD 2 x 16 caractères Ref. :2337

### e- Résistances:

ü R1,R2,R3 : 220

ü R4,R5,R6,R7 : 1 K

ü R8,R9,R10 :4,7 K

### f- Potentiomètres :

ü Pot.1 : 5 K

ü Pot.2,Pot.3,Pot.4 : 10K

### g- Diodes :

ü D1,D2,D3,D4 : diodes Zener 5.1 V

ü LED rouge

ü LED verte

ü LED jaune

### h- Boutons :

ü Trois boutons poussoirs

ü Un bouton On/Off

## 2)La nomenclature des composants de bloc de contrôle :

### a)Transistors :

ü T1,T2,T3,T4 : BC 548 (NPN)

**b)Relais :**

ü Rel.1,Rel.2 : 40608/ 15A/250V AC

ü Rel.3 : 41212/ 16A/250V AC

ü Rel.4 : 50509/10V

**c)Résistances :**

ü R1,R2,R3,R4 : 2.2 K

ü R5,R6,R7 : 0.27

**d)Diodes :**

ü D1,D2 : BYW31

ü D3,D4,D5,D6,D7 : N4001

**e)Régulateurs :**

ü Rég. 7805

ü Rég.7810

**f)Condensateurs :**

ü C1 : 100 $\mu$ F/50V

ü C2,C3 :10 $\mu$ F/50V

**g)Fusible :** 10A

**h)Radiateurs :**

ü Rad.1,Rad2 : radiateurs dissipatifs.

# Annexes



Annexe 1 : Le transistor BC548 (NPN).

Annexe 2 : La NTC 5D-9



## Annexe 1 : Le transistor BC548 (NPN) :

### Absolute Maximum Ratings\*

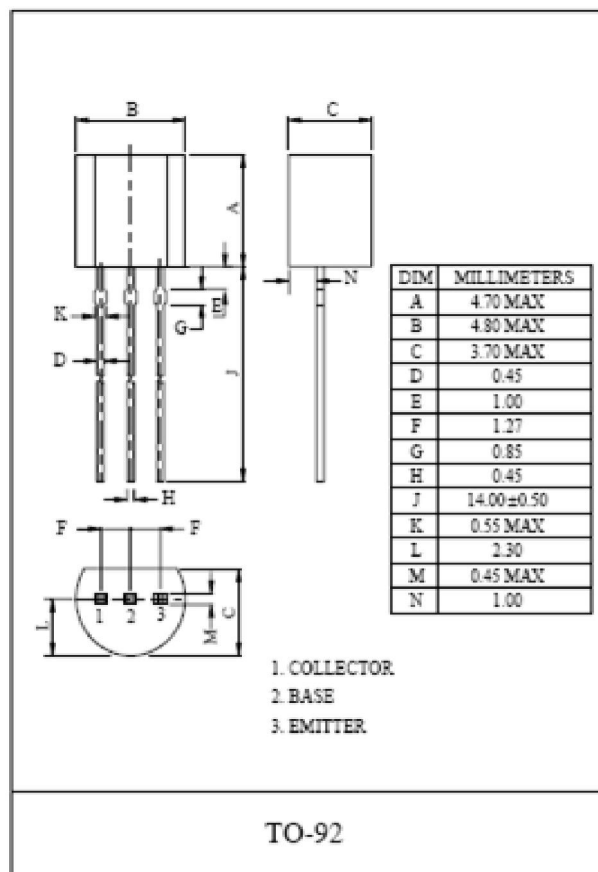
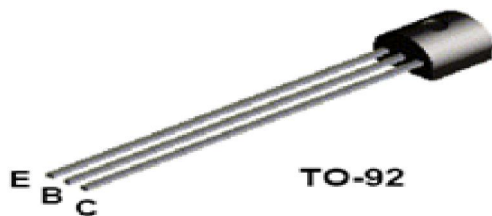
TA = 25°C unless otherwise noted

Symbol	Parameter	Value	Units
$V_{CEO}$	Collector-Emitter Voltage	30	V
$V_{CES}$	Collector-Base Voltage	30	V
$V_{EBO}$	Emitter-Base Voltage	5.0	V
$I_C$	Collector Current - Continuous	500	mA
$T_J, T_{stg}$	Operating and Storage Junction Temperature Range	-55 to +150	°C

### Thermal Characteristics

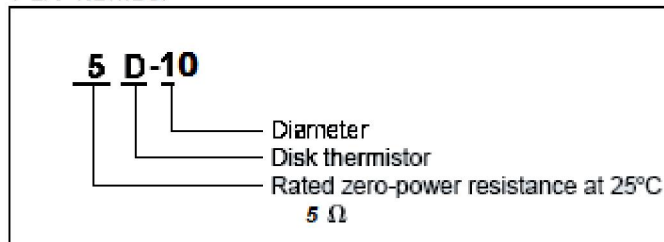
TA = 25°C unless otherwise noted

Symbol	Characteristic	Max	Units
		BC548 / A / B / C	
$P_D$	Total Device Dissipation Derate above 25°C	625	mW
		5.0	mW/°C
$R_{\theta JC}$	Thermal Resistance, Junction to Case	83.3	°C/W
$R_{\theta JA}$	Thermal Resistance, Junction to Ambient	200	°C/W

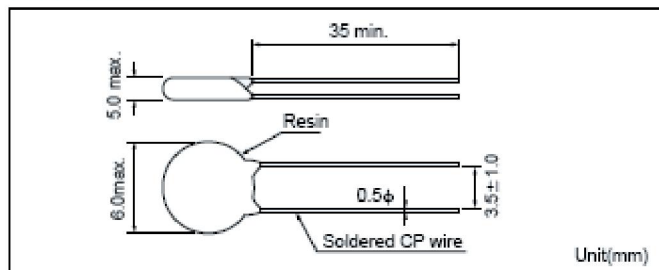


## Annexe 2 : La NTC 5D-9 :

Part number



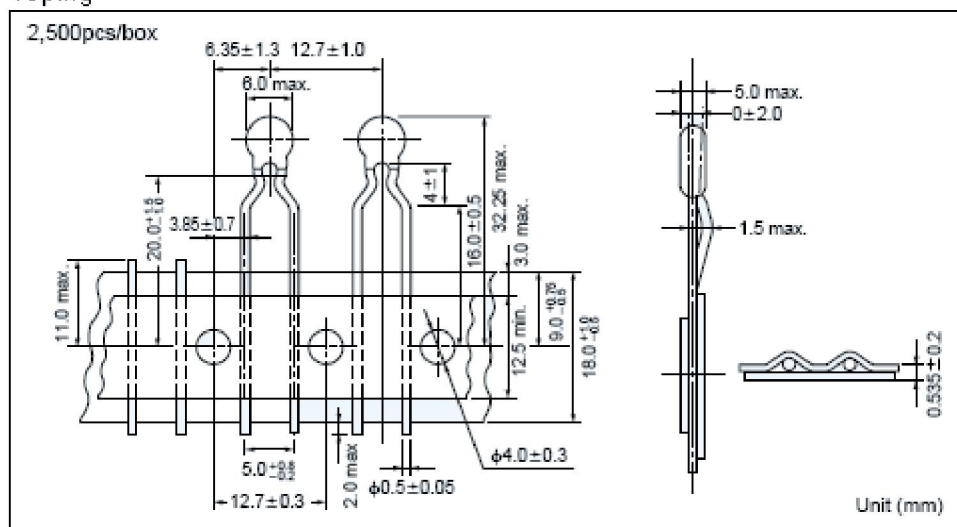
Dimensions



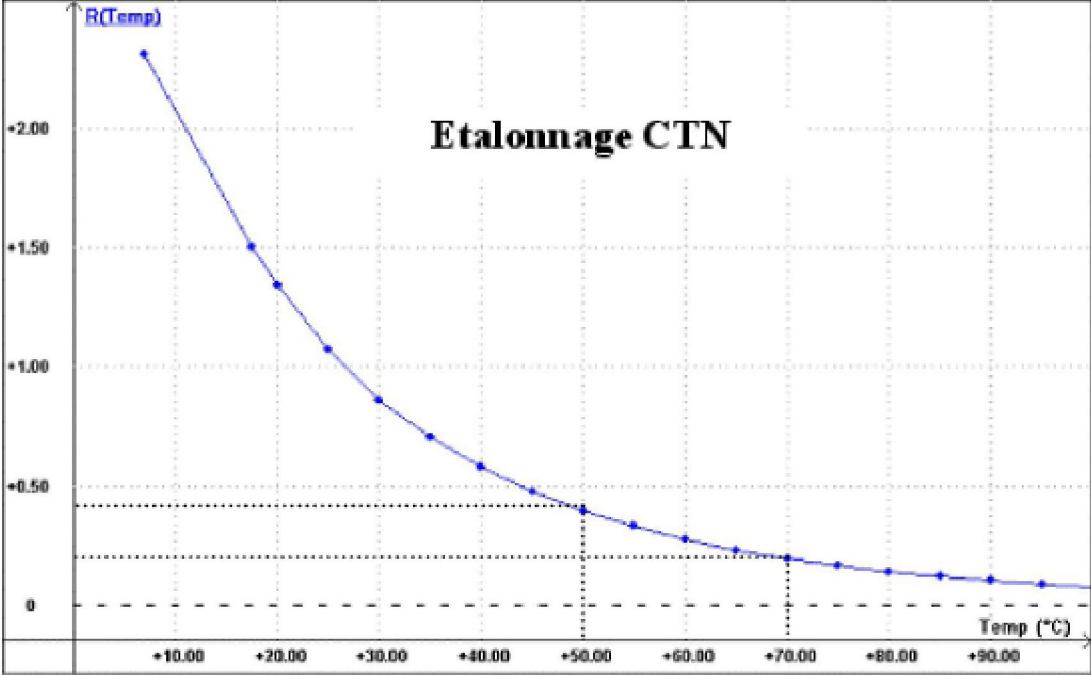
Specifications

Part No.	R25* <sup>1</sup>	B value* <sup>2</sup>	Dissipation factor (mW/°C)	Thermal time constant(s)* <sup>3</sup>	Rated power at 25°C(mW)	Operating temp. range(°C)
5D-10	5.0Ω±15%	3250K±5%	3.5	13	297	-40~+110

Taping



**-Etalonnage de la CTN :**



# **Bibliographie**

## **Ouvrage :**

*« Photopiles solaires de la physique de la conversion photovoltaïque aux filières, matériaux et procédés », Alain RICAUD, presses polytechnique et universitaires romandes, LAUSANNE, 1997.*

*« Programmation des PIC », PARIS, L'USINE NOUVELLE, DUNOD, CHRISTIAN TAVERNIER, 2005.*

*« Progresser avec Microcontrôleurs PIC », PARIS, GERARD SAMBLANCAT, 2006.*

*« Mémotech Electronique (Circuits & Composants) », PARIS, CASTEILLA, J.C. CHAUVEAU, G. CHAVALIER, B. CHEVALIER, 2003.*

*« Apprendre la Programmation des PIC », 3<sup>ème</sup> Edition, PARIS, DUNOD, PASCAL MAYEUX, 2005.*

## **Thèses :**

### ***1-Mémoire de magister :***

*« Application de l'énergie photovoltaïque au pompage hydraulique sur les sites de TLEMCEN et de BOUZAREAH »*

*Spécialité : Physique énergétique et matériaux.*

*Présenté par : Mr MAOUEDJ Rachid.*

*Université : Abou Beker BELKAID faculté des sciences, département de physique.*

*Année : Décembre 2005*

## ***2-Thèse de Doctorat :***

*« Conception et réalisation de modules photovoltaïques électroniques »*

*Spécialité : Conception des circuits microélectroniques et microsystèmes.*

*Présentée par : Mr Angel Cid Paster.*

*Institut national des sciences appliquées de TOULOUSE.*

*Année : 26 septembre 2006*

## ***3-Thèse Doctorat :***

*« L'hydrogène électrolytique comme moyen de stockage d'électricité pour système photovoltaïque isolé »*

*Spécialité : Energétique.*

*Présenté par : Mr Julien LABBE.*

*Ecole des mines de Paris .*

*Année : 21 décembre 2006*

## ***4-Thèse Doctorat :***

*« Les cellules photovoltaïques à base de matériaux organiques discotiques »*

*Spécialité : matériaux, technologie et composants pour l'électronique »*

*Présentée par : Mr Mimoun OUKACHMIH.*

*Université Paul Sabatier*

*Année : 30 juin 2003*

## ***5-Thèse d'ingénieur d'état en électronique :***

*« Etude et dimensionnement d'un système photovoltaïque autonome pour relais téléphonique RBS2206 (Mobilis) », Université Mouloud MAMMERI de Tizi Ouzou, 2005.*

*« Conception & Réalisation d'un Générateur de Signaux Chaotiques à Base de Microcontrôleur PIC16F876 », Département électronique, FGEI, UMMTO, 2006.*

**Sites web :**

[www.wikipedia.org](http://www.wikipedia.org)

[www.cder.dz](http://www.cder.dz)

<http://www.educyedia.be/electronics/digitalconvertors.htm>

[www.microchip.com](http://www.microchip.com)

<http://p.may.chez-alice.fr/index.html>

<http://abcelectronique.com>

<http://forums.futura-sciences.com>

<http://www.planete-sciences.org/forums/>

<http://www.electroforum.info/f/>

<http://www.edaboard.com/>

<http://abcelectronique.com/bigonoff>