

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE  
SCIENTIFIQUE  
UNIVERSITE DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE D'ORAN  
-MOHAMED BOUDIAF-

FACULTE DES SCIENCES  
DEPARTEMENT DE PHYSIQUE

Mémoire présenté pour l'obtention du

## **Diplôme MAGISTER**

Spécialité : Physique

Option : Rayonnement et Matière

Présentée par :

**Mr MAZARI Hichem**

### THEME

**Mise au point d'un dispositif autonome de poursuite du soleil  
- SUN TRACKER -**

**Soutenu le : 28 / 06 / 2012**

**Devant le jury :**

<b>Qualité</b>	<b>Nom et Prénom</b>	<b>Grade</b>	<b>Université</b>
<b>Président</b>	Mr.BELASRI Ahmed	Professeur	USTOMB
<b>Rapporteur</b>	Mr.BENABADJI Nouredine	MCA	USTOMB
<b>Co-Rapporteur</b>	Mr ABDELAOUI Mostapha	MCB	UNIV-ADRAR
<b>Examineur</b>	Mr.HASSINI Abdelatif	MCA	UNIV-ES-SENIA
<b>Invité</b>	Mr. BOUADI Abed	MAA	USTOMB

2011 / 2012

**J**e dédie ce modeste travail à ma fille Meriem,

Mes parents,

Mes sœurs,

Mes grands-pères,

Mes trois MIMAs (Allah yerhamhoum),

Tous ceux qui me sont chers,

Et surtout ma Femme.

## **REMERCIEMENT**

Je remercie *ALLAH* le tout puissant de m'avoir donné le courage, la volonté et la patience de mener à terme ce présent travail.

Le travail élaboré dans ce mémoire à été élaboré au niveau du laboratoire d'Analyse et Application du Rayonnement (**LAAR**) dirigé par le Professeur Monsieur **A. H. BELBACHIR** à qui je tiens à exprimer ma gratitude pour la confiance qu'il m'a accordé en m'intégrant au sein de son laboratoire.

Je tiens à exprimer mes plus profonds remerciements à Monsieur **N. BENABADJI** qui a assuré la direction et la réalisation de ce projet ; son encadrement et ses conseils avisés m'ont été très bénéfiques.

Je remercie très sincèrement le Professeur Monsieur **A. BELASRI** d'avoir accepté de présider le jury, Monsieur **M. BDELAOUI** d'avoir suivi mon mémoire de près malgré la distance, Monsieur **A. HASSINI** et Monsieur **A. BOUADI** d'avoir consacré de leur temps pour examiner le mémoire.

Enfin, mes pensées vont aux membres de ma famille qui m'ont soutenu et encouragé tout au long de mon parcours, qu'ils trouvent l'expression de ma profonde reconnaissance.

Merci aussi à tous ceux qui ont participé de près ou de loin (un encouragement, un conseil, un sourire et un soutien moral ou financier).

### AVANT PROPOS

Les énergies renouvelables sont des énergies qui se renouvèlent assez rapidement pour être considérées comme inépuisable à l'échelle humaine du temps. Face aux prévisions d'épuisement inévitable des ressources mondiales en énergie fossile (pétrole, gaz, charbon...), en énergie d'origine thermonucléaire (uranium, plutonium...), face aux multiples crises pétrolières, économiques, aux changements climatiques dus à l'effet de serre, la science s'est tout naturellement intéressée aux ressources dites " renouvelables " et notamment vers la plus ancienne, le soleil, qui déverse chaque jour l'équivalent de 100 000 milliards de TEP (tonnes équivalent pétrole). Cette valeur est à comparer aux 9,58 milliards de TEP que représente la consommation annuelle mondiale en énergie primaire (1998).

Considéré dans l'Antiquité comme un dieu, le soleil est aujourd'hui réduit au statut d'énergie, une énergie qu'il nous faut la capter, la transformer, la stocker... Capter cette énergie et la transformer directement en électricité par effet photovoltaïque, provient de la conversion de la lumière du soleil en électricité au sein de matériaux semi-conducteurs comme le silicium ou ceux qui sont recouvert d'une mince couche métallique. Ces matériaux photosensibles ont la propriété de libérer leurs électrons sous l'influence d'une énergie extérieure. C'est l'effet photovoltaïque. L'énergie est apportée par les photons, (composants de la lumière) qui heurtent les électrons et les libèrent, induisant un courant électrique. Ce courant continu de micro puissance peut être transformé en courant alternatif.

Dans ce contexte, notre motivation dans ce travail développé en chapitres est d'optimiser l'énergie fournie par les panneaux photovoltaïques dans le but de maximiser la quantité d'éclairement absorbé par les panneaux photovoltaïques en suivant le mouvement du soleil pendant la journée et cela toute l'année. Notre rapport est organisé de la manière suivante :

- Le premier chapitre concerne l'état de l'art des généralités sur les systèmes photovoltaïques.
- Le second chapitre porte les généralités sur les cellules solaires.
- Le troisième chapitre porte sur le rayonnement solaire et l'orientation choisie.
- Le quatrième chapitre décrit le montage KITLAAR45.

## AVANT PROPOS

## Liste des Figures

## CHAPITRE I

Introduction	1
I.1. Le Défi Energétique	1
I.1.1 Besoins énergétiques mondiaux, un enjeu majeur	1
I.1.2 Des énergies polluantes et non-renouvelables	2
I.1.3 Les énergies renouvelables un rôle à jouer	6
I.2. Définition générale	8
I.2.1 Coordonnées terrestres	8
I-2-1-A/ Longitude	8
I-2-1-B /La latitude	8
I-2-1-C/ L'altitude	8
I.2.2 Rappels de quelques éléments de géométrie	9
I-2-2-A/ les coordonnées horaires	9
I-2-2-B/ les coordonnées horizontales	9
I-2-2-C/ La déclinaison du Soleil	9
I.2.3 Le soleil	10
I.2.4 Le rayonnement solaire	13
Conclusion	18

## CHAPITRE II

II.1 Introduction	1
II. 2 Cellule solaire	1
II. 2. 1 Structure et principe de fonctionnement	1
II. 2. 2 Influence de la température et du rayonnement	4
II. 2. 2. 1 Influence de la température	4
II. 2. 2. 2 Influence du rayonnement	5
II. 3 Le panneau solaire	6
II. 3. 1 Cellules en série	6
II. 3. 2 Cellules en parallèles	7
II. 4 Le générateur photovoltaïque	7
II. 5 Modèle électrique du générateur photovoltaïque	8
II. 5. 1 Schéma électrique équivalent	8
II. 5. 2 Caractéristiques courant – tension	8
II. 5. 3 Caractéristiques puissance – tension	10
II. 6 Ensemble panneau – batterie	10

II. 6. 1 Caractéristiques électriques (I(V) et P(V))	10
II. 6. 2 Liaison directe	11
II. 6. 3 Liaison à travers un étage d'adaptation Générateur PV-Charge	12
Conclusion	13

## CHAPITRE III

III-1 Introduction	1
III-2 Mouvement Terre - Soleil	1
III-2-1-a Mouvement de rotation	1
III-2-1-b Mouvement de translation	1
III-2-2 Mouvement apparent du soleil	2
III-3 Repérage d'un site sur la surface terrestre	2
III-4 Les coordonnées du soleil	3
III-4-a Coordonnées équatoriales	4
III-4-a-1 La déclinaison du soleil $\delta$	4
III-4-a-2 L'angle horaire du soleil H	6
III-4-b Coordonnées horizontales	6
III-4-b-1 La hauteur du soleil h	6
III-4-b-2 L'azimut du soleil a	7
III-5 L'orientation du panneau solaire	7
III-6 Différents types d'orientation	8
Conclusion	9

## CHAPITRE IV

IV.1 Introduction	1
IV.2 Description HARDWARE	2
IV.2.1 Le microcontrôleur 8-bit (PIC16F628A)	2
IV.2.2 Le module afficheur LCD 2x16 caractères	4
IV.2.3 Le clavier de 3 boutons poussoirs	5
IV.2.4 La mémoire EEPROM externe 24LC64	5
IV.2.5 L'étage tampon pilote du moteur positionneur	8
IV.2.6 La section alimentation	8
IV.3 Description FIRMWARE	10
IV-3-1 Le fichier principal SUNTRK10.ASM	10
IV.3.2 Le fichier secondaire UTILF628.INC	13
IV.3.3 Le fichier secondaire IF8B16B.INC	13
IV.3.4 Le fichier secondaire LCD2x16b.INC	14
IV-3-5 Le fichier secondaire 3BTNSLCD.INC	15

<b>IV.3.6 Le fichier secondaire UPD_AZEL.INC</b>	<b>16</b>
<b>IV.3.7 Le fichier secondaire DiSeqC12.INC</b>	<b>16</b>
<b>IV.3.8 Le fichier secondaire RW1Byte3.INC</b>	<b>17</b>
<b>IV.3.9 Le fichier secondaire F628i2c.INC</b>	<b>17</b>
<b>Conclusion</b>	<b>18</b>

**CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES****ANNEXE**

# **LISTE DES FIGURES**

---

## **CHAPITRE I**

Fig.I.1 : Evolution de la consommation d'énergie mondiale entre 1973 et 2007 en MTEP, et répartition par source.

Fig.I.2 : Température globale moyenne de 1850 à nos jours.

Fig.I.3 : Evolution du taux de dioxyde de carbone dans l'atmosphère terrestre.

Fig.I.4 : Exemples de fermes solaires - Calvià , Mallorca, Spain (image de gauche) Et Lucainena de las Torres, Andalusia, Spain (image de droite).

Fig.I.5 : coordonnées terrestre.

Fig.I.6 : le mouvement de la terre autour de soleil.

Fig.I.7: les coordonnées horaires et horizontales.

Fig.I.8 : spectre solaire.

Fig.I.9 : la photosphère.

Fig.I.10: Rayonnement global.

Fig.I.11: Répartition de l'énergie solaire dans le monde.

Fig.I.12: le rayonnement solaire et le nombre d'air masse.

Fig.I.13 : Représentation graphique des spectres AM0, AM1, 5.

## **CHAPITRE II**

Fig.II.1 : Structure d'une cellule photovoltaïque.

Fig.II.2 : caractéristique I(V) sous obscurité et sous éclairement d'une cellule photovoltaïque.

Fig.II.3 : Effet de la température sur la caractéristique I-V.

Fig.II.4: Evolution du courant de court-circuit et de la tension du circuit ouvert avec la température.

Fig.II.5 : Evolutions de la caractéristique courant- tension avec l'énergie reçue.

Fig.II.6 : Cellules placées en série.

Fig.II.7 : Evaluation de la caractéristique courant- tension avec le nombre de cellules en série.

Fig.II.8 : Cellules placés en parallèle.

Fig.II.9 : Evaluation de la caractéristique I(V) avec le nombre de cellules en parallèle.

Fig.II.10 : Notion de cellule, panneau et générateur photovoltaïque.

Fig.II.11 : Schéma électrique équivalent d'un générateur photovoltaïque.

Fig.II.12 : Caractéristiques I(V) d'une cellule et d'une association de 3 branches en parallèle ayant chacune 2 cellules en série.

Fig.II.13 : Caractéristique courant- tension et puissance-tension du générateur photovoltaïque.

Fig.II.14 : Caractéristique I(V) et P(V) établissant le principe du point de puissance maximale (MPP).

Fig.II.15 : Schéma électrique d'une liaison directe générateur PV –charge



## **LISTE DES FIGURES**

---

Fig.II.16 : Etage d'adaptation d'un générateur PV- charge.

### **CHAPITRE III**

Fig.III.1 : Repérage d'un site sur la surface terrestre.

Fig.III.2 : La direction du soleil (S) repéré en coordonnées équatoriales et en coordonnées horizontales en un lieu donné de latitude  $\varphi$ .

Fig.III.3 : Déclinaison du soleil en fonction du numéro du jour de l'année N.

### **CHAPITRE IV**

Fig.IV.1 : Aperçu du dispositif réalisé

Fig.IV.2 : Aperçu du positionneur utilisé (moteur compatible DiSEqC v1.2).

Fig.IV.3 : Synoptique du montage réalisé.

Fig.IV.4 : Circuit du PIC16F628A, avec son quartz RTCC de 32768 Hz.

Fig.IV.5 : module afficheur LCD en mode 8-bit classique.

Fig.IV.6 : module afficheur LCD en mode 4-bit classique.

Fig.IV.7 : Clavier de 3 mini-boutons poussoirs.

Fig.IV.8 : Circuiterie pour la mémoire EEPROM externe.

Fig.IV.9 : Représentation des dates-clés durant une année.

Fig.IV.10 : Stockage des 16 tableaux dans la mémoire externe 24LC64.

Fig.IV.11 : Exemple de codage pour la table date-clé du 13 Janvier.

Fig.IV.12 : Circuit tampon pour le pilotage du positionneur numérique.

Fig.IV.13 : Section alimentation.

Fig.IV.14 : Typon du circuit imprimé et implantation des composants.

Fig.IV.15 : Organigramme du programme principal.

Fig.IV.16 : Traitement de l'interruption périodique TMR1.

## INTRODUCTION :

Comme pour toutes les applications de l'énergie solaire, une bonne connaissance du gisement solaire est nécessaire à l'étude des systèmes photovoltaïques, surtout dans une optique de développement des marchés et des technologies. Par gisement solaire, on entend ici les différentes caractéristiques du rayonnement solaire, susceptibles d'influencer les performances d'un système en un lieu donné. Dans un premier temps, on rappellera quelques données de base concernant les différentes énergies qui existent, ainsi que leur spécification. En suite, on fait une définition générale concernant coordonnées terrestres et quelques éléments de géométrie, on termine par une brève description des différents types de rayonnement.

Les applications photovoltaïques requièrent des présentations spécifiques des données de rayonnement, qui peuvent être différentes selon le niveau de détail des études envisagées, mais aussi selon le système projeté (selon qu'il est, par exemple, autonome ou relié au réseau). [1].

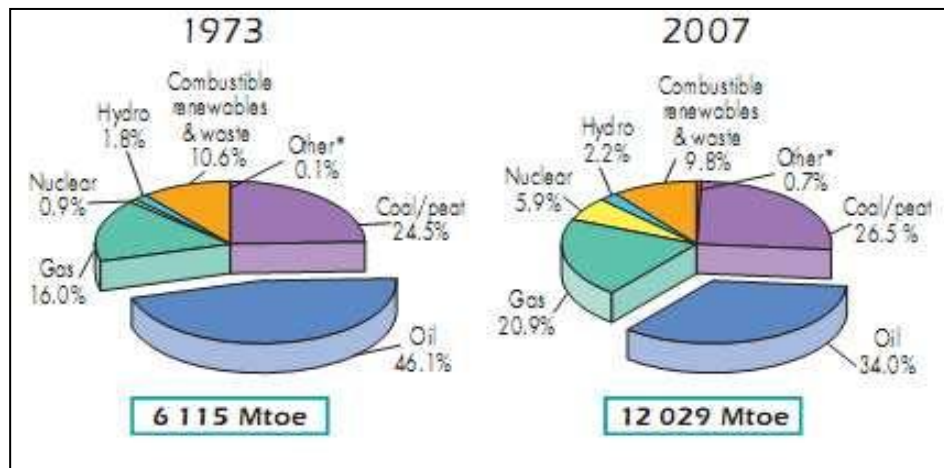
### I.1. Le Défi Energétique :

#### I.1.1 Besoins énergétiques mondiaux, un enjeu majeur :

Le scénario de référence proposé par l'agence **IEA** (*International Energy Agency*) montre qu'un accroissement de 40% des besoins en énergie surviendra entre aujourd'hui et 2030, si aucune politique gouvernementale forte n'est mise en place. Plus d'un tiers de cette croissance de demande serait alors soutenu par l'usage du charbon.

La période de 1973 à nos jours a connu un doublement de la consommation d'énergie dans le monde, passant de 6115 à 12029 MTEP (voir Figure I.1), alors que la consommation dans l'**OCDE** (Organisation de Coopération et de Développement Economique) n'a augmenté que de 50%, passant de 3724 à 5433 MTEP. Cette différence de croissance tient au développement exponentiel des économies des pays émergents, petits consommateurs d'énergie aujourd'hui, mais grands consommateurs de demain du fait de leur forte croissance et de leur industrialisation.

A ces disparités de croissance de la demande énergétique s'ajoutent des disparités dans le mix énergétique. On désigne par mix énergétique la répartition par source de la production d'énergie dans un pays. Les pays émergents ont en effet largement plus recours aux énergies fossiles que les pays de l'**OCDE**, qui ont misé pour certains d'entre eux sur l'énergie nucléaire, et commencent à se tourner vers les énergies renouvelables.



**Figure I-1 :** Evolution de la consommation d'énergie mondiale entre 1973 et 2007 en MTEP, et répartition par source

La croissance de la demande en énergie demandera des réponses fortes de la part des états. Produire 73% d'énergie en plus qu'aujourd'hui d'ici à 2030 demandera des investissements énormes que le monde sera amené à fournir. Mais la question se pose plutôt en terme de mix énergétique : vers quelles sources d'énergie les états se tourneront-ils afin de répondre à la hausse de la demande ? A ces questions s'ajoutent des facteurs géopolitiques complexes : choix politiques (énergie nucléaire, encouragement de telle ou telle source d'énergie via des subventions...) mais aussi situation géographique (accès à l'énergie géothermique, hydroélectrique, gisement éolien important...) et enfin des choix stratégiques (indépendance énergétique).

### I.1.2 Des énergies polluantes et non-renouvelables :

L'Homme sait depuis des millénaires tirer de la Terre toutes sortes de matériaux, dont certains lui ont servi et lui servent encore à produire de l'énergie. Par essence non-renouvelables, ces ressources commencent à s'épuiser et le scénario d'une pénurie mondiale de certaines d'entre elles ne fait plus partie de la science-fiction. Mais nombre des sources d'énergie utilisées par l'homme possède des contreparties importantes.

- **L'énergie nucléaire :**

Les accidents d'exploitation de centrales nucléaires de Tchernobyl en Ukraine, Three Miles Island aux U.S.A et le dernier de Fukushima au Japon ont jeté une ombre sur cette technologie que les progrès en terme de fiabilité et de sécurité ont du mal à dissiper.

Le problème de la gestion des déchets reste entier : on enfouit aujourd'hui des déchets radioactifs dont la durée de demi-vie est de l'ordre de 10000 ans, et d'un million d'années pour certains. Qu'advient-il d'eux dans un siècle, ou un millénaire ? La stabilité géologique d'une région est-elle assurée sur d'aussi longues périodes ?

Le point positif de cette technologie est qu'elle ne rejette pas de gaz à effet de serre autre que la vapeur d'eau dans l'atmosphère. Les opinions publiques dans les pays occidentaux restent donc divisées sur son utilisation car le risque est parfois jugé trop grand pour le bénéfice obtenu.

- **Les énergies fossiles et leur impact sur le climat :**

Le cas des énergies fossiles est aujourd'hui au centre de nombreux débats au niveau mondial. Ce sont le charbon, le pétrole et le gaz trouvés dans des gisements souterrains issus de la décomposition d'organismes vieux de millions d'années. [9].

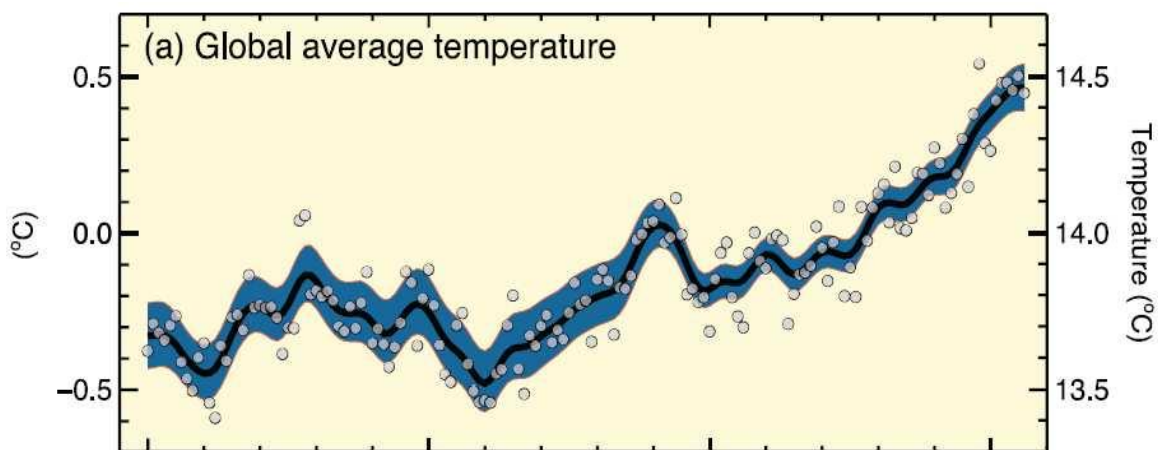
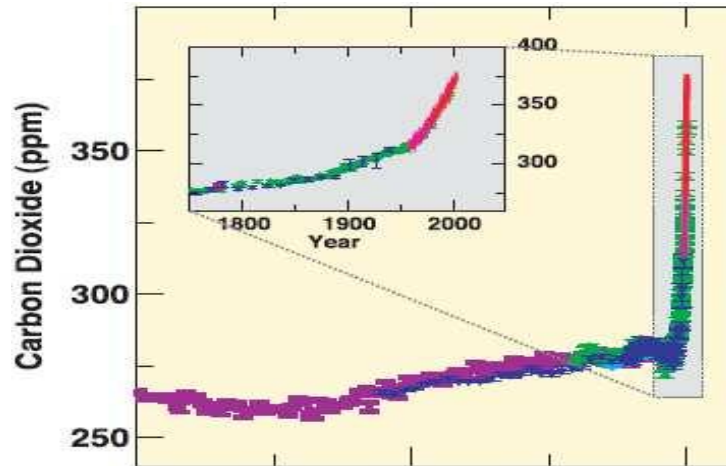


Figure I-2 : Température globale moyenne de 1850 à nos jours

On observe depuis le début du 20e siècle un réchauffement climatique global. Entre cette date et la fin du 20<sup>ème</sup> siècle, la température moyenne globale a en effet augmenté de près de 1°C. Ce réchauffement est en corrélation avec une hausse du taux de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère, hausse attribuée par une majorité de scientifiques aux activités humaines (Figure I.3). Ce CO<sub>2</sub> participe à l'effet de serre, soit le confinement des rayonnements solaires dans l'atmosphère terrestre. Au lieu d'être réfléchi dans l'espace, certains rayonnements émis par le sol sont captés par le CO<sub>2</sub>, participant ainsi au réchauffement global de l'atmosphère.



**Figure I-3 :** Evolution du taux de dioxyde de carbone dans l'atmosphère terrestre dans les dernières 10000 années

Ce réchauffement a de plus entraîné une fonte des calottes polaires et un réchauffement global des océans, entraînant une hausse du niveau des mers de près de 15 cm dans ce même laps de temps. La fonte des glaces participe également en soi au réchauffement climatique. Les rayons normalement réfléchis par la glace et la neige sont absorbés par les océans mis à nus. Le réchauffement climatique s'accélère donc par ce biais.

On peut prévoir la nature des conséquences de ce réchauffement mais difficilement leur ampleur. L'Organisation Internationale des Migrations a publié un rapport en 2008 qui souligne le développement des flux migratoires dus au changement climatique. D'ici à 2050, ces migrations devraient concerner 200 millions de personnes. Le rapport met cependant en garde sur les disparités dans les chiffres présentés par les experts, le chiffre des émigrants se situant entre 50 et 800 millions de personnes selon les études prises en compte. Ces migrations seront causées par l'engloutissement des atolls dont l'altitude par rapport au niveau de la mer est trop faible, ou encore des populations fuyant les zones côtières trop souvent frappées par les phénomènes météorologiques violents, qui ont doublés en deux décennies. Ces personnes pourraient entraîner des instabilités au niveau régional, national voir international en créant des déséquilibres démographiques et en venant s'ajouter aux migrations économiques. [10].

La croissance du nombre de catastrophes naturelles liées au climat entraîne également des coûts de plus en plus importants pour réparer les habitations et infrastructures détruites. On peut citer l'exemple du cyclone Gonu en 2007. Outre le fait que ce cyclone frappa une région peu habituée à ce genre d'évènement météorologique, il battit alors tous les records pour la

mer d'Oman en termes de vitesse de vent (plus de 240 km/h), et on estime le coût total de ses dévastations à plus de 200 millions de dollars US.

- **Des énergies aux ressources limitées :**

On peut trouver différents chiffres sur les ressources disponibles en uranium (en fonction des hypothèses prises sur l'évolution du mix énergétique mondial et le cours du métal), mais le fait certain est que ces ressources sont limitées, à seulement 60 ans dans l'état actuel des connaissances et du prix du marché. De nouvelles technologies de réacteurs et surtout de nouveaux cours de la matière première pourrait rendre les ressources connues fiables pour des millénaires.

Le charbon est l'énergie fossile la plus disponible. L'Agence Internationale de l'Energie estime que les réserves naturelles prouvées de charbon peuvent durer encore 137 ans au rythme de croissance actuel.

Le cas du pétrole est plus inquiétant, car il ne touche pas seulement le secteur de l'industrie mais aussi celui des transports. Les références à analyser ici sont très hétéroclites. Les organismes qui les émettent sont aussi bien des **ONG** (GreenPeace...) que des instances internationales (Agence Internationale pour l'Energie...) ou nationales. Dans ce dernier cas, on notera l'étude publiée par le UK Energy Research Center (émanation du gouvernement anglais), qui tient compte de plus de 500 études portant sur les prévisions de consommation de l'industrie et la production du pétrole. [11].

Les conclusions de ce rapport sont les suivantes : le pic de production de pétrole arrivera certainement avant 2030, il existe un risque prononcé qu'il advienne même avant 2020. Les études éloignant ce pic au delà de 2030 sont jugées « au mieux optimistes et au pire improbables ». Contrairement à ce que l'on pourrait croire, un tel scénario ne signerait pas la fin de l'émission de gaz à effet de serre à outrance. Le rapport s'inquiète en effet, en cas de pénurie de pétrole, à un retour à une industrie tirant son énergie du charbon, et souligne l'importance d'investir dès maintenant dans des alternatives renouvelables afin d'éviter à tout prix ce scénario. [11].

Une fois le pic de production passé, il est impossible de prédire combien de temps l'épuisement des ressources prendra. Il sera fonction principalement de la vitesse avec laquelle les industries et les transports se tourneront vers d'autres énergies et les cours du pétrole, imprévisibles du fait du manque de données sur l'offre et la demande à cette échéance de 2030. Le gaz enfin devrait connaître son pic de production après 2030, d'après l'US Energy Information Administration.

### I.1.3 Les énergies renouvelables : un rôle à jouer :

Les gisements fossiles ne sont pas les seuls à pouvoir soutenir la demande croissante du monde en énergie. De plus, l'urgence de réduire les émissions de CO<sub>2</sub> comme préconisé par le Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (**GIEC**) pousse les nations à développer les énergies renouvelables, peu ou pas émettrices de gaz à effet de serre. Les gisements éolien et solaire devraient être les principales sources d'énergie renouvelables dans le siècle à venir, et pourraient répondre en partie à ces problématiques.

- **Le gisement éolien :**

L'énergie éolienne pourra jouer un rôle non négligeable dans le mix énergétique de demain. Les projections du scénario énergétique tendanciel à 2030 pour la France indiquent une production éolienne de 43 GWh.

- **Le gisement solaire :**

Chaque année, la Terre reçoit 1,56.10 kWh en énergie solaire, ce qui représente plus de 10000 fois la consommation mondiale d'électricité ! Il existe deux façons d'exploiter cet incroyable gisement : convertir le rayonnement en chaleur puis (éventuellement) en électricité (voie thermodynamique) ou convertir le rayonnement directement en électricité (voie photovoltaïque).

Dans le cas de la voie thermodynamique, on peut capter la lumière avec des matériaux absorbants (typiquement noirs) qui vont convertir la lumière en chaleur. Les ballons d'eau chaude solaires fonctionnent ainsi. Un panneau absorbant est mis sur le toit de la maison et l'énergie thermique récupérée sert à chauffer l'eau du robinet. On peut atteindre des températures comprises entre 60 et 80°C de la sorte.

Une approche plus industrielle consiste à disposer des miroirs concentrateurs autour d'un dispositif contenant un fluide caloporteur. Le fluide caloporteur, mis en contact avec un second réseau d'eau via des échangeurs thermiques fait passer celle-ci en phase vapeur, ce qui permet de faire tourner une turbine. De telles centrales existent déjà et permettent une production d'électricité de l'ordre de quelques mégawatts à plusieurs centaines de mégawatts (cas de la centrale **de Luz Solar Energy** en Californie). Des bacs de sels fondus permettent le stockage de l'énergie thermique excédentaire (jusqu'à plus de 550°C) et ainsi de lisser la production avec la possibilité de continuer de produire de l'électricité durant la nuit. On parle, pour ces technologies, de centrales solaires thermodynamiques.

Dans le cas de la voie photovoltaïque, on convertit directement 3 à 40% de l'énergie lumineuse incidente en courant continu. La force de cette approche est la simplicité de mise en œuvre comparée à la précédente. Les faiblesses sont les mêmes : le problème du stockage de l'énergie produite lors de la journée ou des journées ensoleillées pour continuer de la distribuer la nuit ou les journées où la couverture nuageuse est trop importante pour permettre un fonctionnement correct des cellules.

L'aspect intéressant de ce mode de production vient du peu d'entretien que nécessite un panneau photovoltaïque une fois posé, et le fait que toutes les surfaces exposées au soleil sont candidates pour recevoir de tels panneaux. Ces deux points donnent un avantage significatif à filière solaire photovoltaïque par rapport à la filière solaire thermodynamique. Là où la première fonctionne sans entretien, la seconde est une usine à part entière, avec l'entretien et les risques industriels que cela implique. Là où la première ne nécessite qu'un toit, la seconde demande un terrain découvert pour les concentrateurs et le procédé en lui-même. On comprend que l'avantage de l'énergie solaire photovoltaïque tient donc dans le fait qu'elle peut utiliser des surfaces inutilisées jusque là, et ne nécessite pas en soi de surface au sol. Néanmoins, cela n'empêche pas de grandes fermes photovoltaïques d'être créées (Figure I.4).



**Figure I-4 :** Exemples de fermes solaires - Calvià , Mallorca, Espagne (image de gauche)  
Et Lucainena de las Torres, Andalusia, Espagne (image de droite)

## I.2. Définition générale :

### I.2.1 Coordonnées terrestres :

Tout point de la surface terrestre est repérée par ces coordonnées :

#### I-2-1-A/ Longitude :

La longitude d'un lieu correspond à l'angle formé par deux plans méridiens (passant par l'axe des pôles), l'un étant pris comme origine (méridien de Greenwich 0°) et



l'autre déterminé par le lieu envisagé. La longitude sera désignée ici par la lettre «  $\lambda$  ».

Longitude OUEST  $\lambda < 0^\circ$

Longitude EST  $\lambda > 0^\circ$

Un écart de  $1^\circ$  de longitude correspond à un écart de 4 minutes de temps légitime.[5].

- Pour Oran la longitude est de :  $0^\circ 642'$ .

### I-2-1-B /La latitude :

C'est l'angle entre l'équateur et le rayon de la terre qui passé par le lieu considéré. Pour la ville d'Oran la latitude est environ de  $35^\circ 691'$ .

### I-2-1-C/ L'altitude :

L'altitude d'un point correspond à la distance verticale entre ce point et une surface de référence théorique (niveau moyen de la mer), on l'exprime généralement en mètre. [5].

- Pour Oran Altitude est environ de 60 m

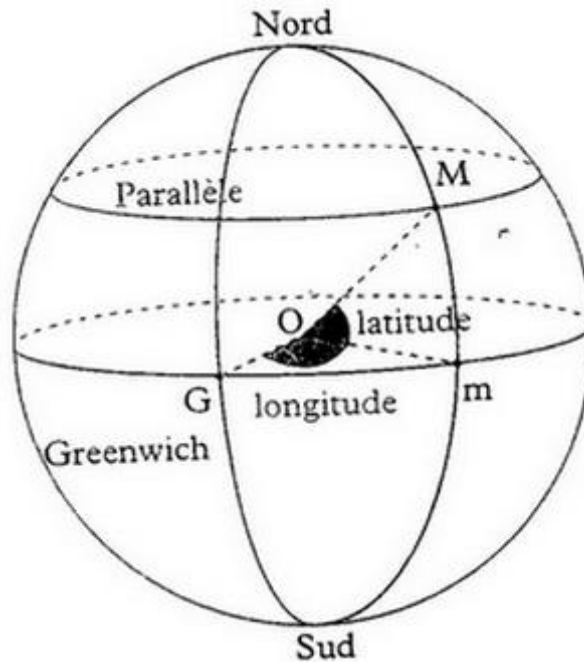


Figure I- 5 : Coordonnés terrestre [4].

## I.2.2 Rappels de quelques éléments de géométrie :

La trajectoire de la terre autour du soleil s'appelle « l'elliptique ». La distance terre soleil ne varie que de  $\pm 1,7\%$  par rapport à sa valeur moyenne qui est de  $1,49675 \cdot 10^8$  km. Cette distance est minimale au début de janvier et maximale au début de juillet.

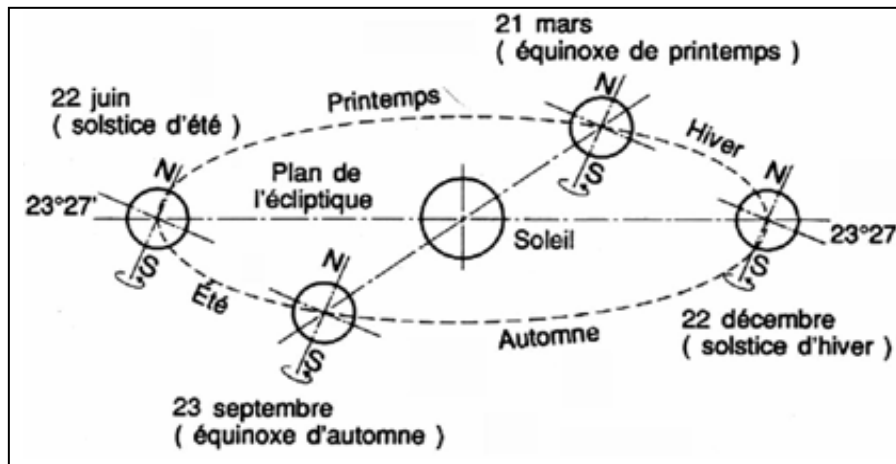


Figure I-6 : le mouvement de la terre autour de soleil [4].

**I-2-2-A/ Les coordonnées horaires :**

Les coordonnées horaires dont le repère est donné par l'axe des pôles et le plan de l'équateur, le méridien du lieu étant pris comme origine. Chaque point de l'espace est repéré par sa déclinaison  $\delta$  et son angle horaire  $\omega$ . [4].

**I-2-2-B/ Les coordonnées horizontales :**

Les coordonnées horizontales dont le repère est donné par la verticale du lieu (zénith) et le plan de l'horizon. Le méridien du lieu est encore utilisé comme origine. Chaque point de l'espace est repéré par sa hauteur  $\gamma$  et son azimut  $\psi$ . [4].

**I-2-2-C/ La déclinaison du Soleil :**

L'angle du zénith avec le plan équatorial est la latitude du lieu. La déclinaison du Soleil est l'angle de la droite Terre Soleil avec le plan équatorial. Elle varie entre  $+ 23^{\circ} 27'$  (au solstice d'été, 22 juin) et  $- 23^{\circ} 27'$  (au solstice d'hiver, 22 décembre) ; sa valeur est nulle aux équinoxes (21 mars et 23 septembre) .La valeur de la déclinaison au jour  $J$  (compté à partir du début de l'année) est approximée, à  $1^{\circ}$  près, par la formule :

$$\delta = 23.45 \sin (0.986J - 80^{\circ}) \dots\dots\dots (I-1)$$

Pour un jour fixé, la déclinaison peut être considérée comme constante ; sur la sphère céleste, le Soleil décrit alors un petit cercle, parallèle au plan de l'équateur, avec une vitesse angulaire constante de un tour par 24 heures. À un instant  $t$ , exprimé en temps solaire vrai,

L'angle horaire du Soleil est simplement donné (en degrés) [4] :

$$\omega = 15(t - 12) \dots\dots\dots (I-2)$$

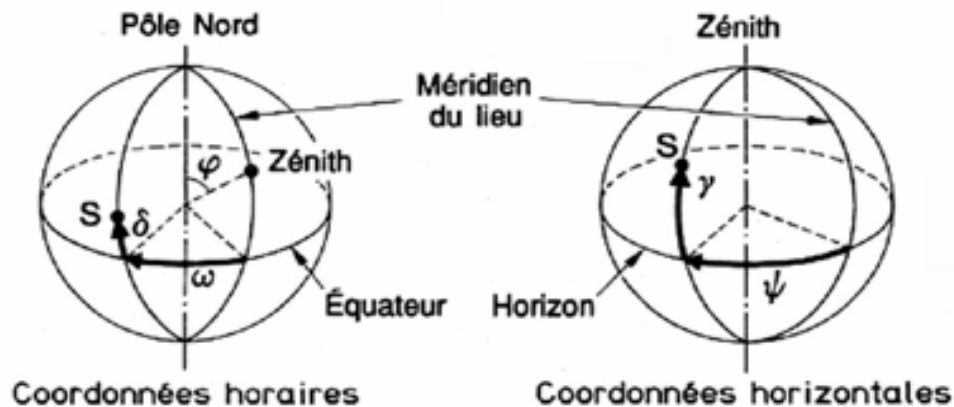


Figure I-7: Les coordonnées horaires et horizontales [4].

### I.2.3 Le soleil :

- **Caractéristiques générales :**

Le Soleil est une « petite » étoile, une boule de gaz, dont le diamètre est de 1 391 000 km, et qui est placée à 150 000 000 km de nous (périhélie : 147,1 millions de km et aphélie : 152,1 millions de km). Cette distance est si grande que sa lumière nous parvient 8 minutes après avoir été émise. N'oublions pas qu'elle voyage à la vitesse de 300 000 km/s, c'est-à-dire qu'elle fait 7 fois le tour de la Terre en 1 seconde.

Quant à son volume, il pourrait contenir 1 300 000 Terre. Avec une densité de 1,41 (contre 5,5 pour la Terre), sa masse est de 330 000 fois celle de la Terre ( $1,99 \cdot 10^{30}$  kg ou 2 milliards de milliards de tonnes). Il représente 99,867 % de la masse totale du système solaire, c'est-à-dire que l'ensemble de toutes les planètes et comètes ne représente que le millième du Soleil.

Il a déjà effectué 20 tours de la Galaxie en traversant des densités variables de poussières qui interceptent une partie du rayonnement qu'il nous envoie. Cela a dû certainement avoir des conséquences sur le climat terrestre.

Bien que sa lumière soit 600 000 fois plus élevée que celle de la Lune (son miroir), il n'est visible qu'à une distance de 60 al (année-lumière).

Notre Soleil est donc une énorme boule de gaz composée de 70% d'hydrogène et de 28% d'hélium, les 2% restants représentent la plupart des autres atomes présents dans l'univers. Il ne faut pas oublier non plus que les étoiles sont les usines qui créent tous les matériaux existant dans l'univers, à partir de l'hydrogène. Plus de 60 éléments chimiques furent identifiés, tel OH (radical hydroxyle), CH (radical méthylique) et aussi

du titane, du plomb, du mercure, du chlore, du silicium, cuivre, calcium, indium, antimoine, zirconium, rhodium, etc... On trouve, par exemple, 9 atomes d'or pour 1000 milliards d'atomes d'hydrogène, soit la bagatelle de 10 millions de milliards de tonnes d'or ( $1.10^{16}$  tonnes). Outre les atomes, l'analyse du spectre solaire a permis de découvrir des molécules complexes (figure I.8).

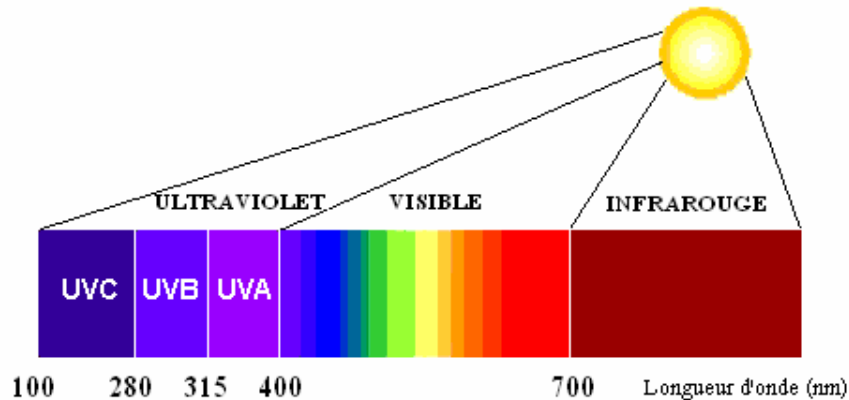


Figure I-8 : spectre solaire

Il n'a pas de surface à proprement parlé, mais la température de radiation, si on assimile le Soleil à un corps noir, est de 5 700 K selon la loi de Stephan (0 Kelvin = - 273,15 °C. C'est le zéro absolu; l'agitation moléculaire est stoppée), ce qui lui donne sa couleur jaune. La couleur est en relation directe avec la longueur d'onde, laquelle est liée à la température. Ainsi, en analysant la couleur, nous pouvons obtenir facilement sa température de radiation.

Au centre, il règne une pression 220 millions de fois plus grande que la pression atmosphérique de notre Terre (soit un gros pétrolier sur le bout du doigt !) qui est de 1033 hecto-pascal au niveau de la mer, entraînant une température de 15 millions K, et plusieurs millions de degrés dans les couches supérieures de son atmosphère (> 10 000 km à plusieurs millions de km).

- **Son énergie : Energie « humainement » inépuisable :**

C'est une gigantesque bombe thermonucléaire dont la puissance, émise sous forme de photons, représente un chiffre considérable:  $3,82.10^{26}$  Watts. C'est le résultat de la combustion de 596 millions de tonnes par seconde d'hydrogène convertis en 592 millions de tonnes par seconde d'hélium. La perte, 4 millions de tonnes/seconde, se traduit sous forme de rayonnement gamma. Chaque  $\text{cm}^2$  de sa surface émet une énergie de 6 kilowatts. Mais il n'arrive sur Terre que 5 milliardièmes ( $5.10^{-9}$ ) de cette puissance.

Cette pile thermonucléaire fonctionne grâce à la transformation de 4 noyaux d'atomes d'hydrogène qui fusionnent pour fournir 1 noyau d'atome d'hélium avec la libération d'une énergie de 25000 mégawatts par gramme et par seconde (100 milliards de bombes à hydrogène de 1 mégatonne).

Cette énergie provient du centre. La pression comprime les noyaux d'hydrogène et permet ainsi la fusion. Il ne faut pas confondre la fusion avec la fission, qui casse les noyaux dans une bombe atomique. La fusion d'un gramme d'hydrogène libère 140 milliards de calories, la calorie étant la quantité de chaleur nécessaire pour faire passer un gramme d'eau de 15°C à 16°C. Cela correspond à 0,14 W/cm<sup>2</sup>.

Le transfert d'énergie du centre vers la surface s'effectue par rayonnement et par convection. La zone de convection est limitée par la photosphère, épaisse de 200 km, et appelée ainsi parce que presque la totalité du rayonnement visible provient d'elle. Elle a une apparence granuleuse, provoquée par la turbulence de la partie supérieure de la zone de convection. La taille d'une granule peut dépasser celle de la France et la durée de vie peut aller de 10 minutes à plus de 10 heures, selon la taille (photo ci-dessous). [6].



**Figure I-9 :** La photosphère

Cette pression empêche les photons d'atteindre la surface dès leur création. Ainsi, ils mettent 2 millions d'années pour sortir des profondeurs du Soleil, tandis qu'il leur faut 8 minutes pour arriver sur Terre. Quant aux neutrinos, fabriqués en même temps, ils sortent instantanément. Absolument rien n'est capable de les arrêter. Par conséquent, il est très difficile de les étudier. Ainsi, la recherche des neutrinos nous renseigne sur la lumière qui sortira dans 2 millions d'années du Soleil. Aujourd'hui, le taux est inférieur à ce que l'on attendait. Cela peut signifier que dans 2 millions d'années, la température sera plus basse avec des conséquences très importantes sur l'environnement terrestre.

### I.2.4. Le rayonnement solaire :

Le rayonnement solaire global est composé du rayonnement direct, du rayonnement diffus et de l'albédo (voir figure I.10). L'évaluation d'installations solaires nécessite des données d'irradiance, c'est-à-dire du flux d'énergie incidente sur une surface donnée par unité de temps et de surface, exprimée en  $W/m^2$  ; ou son intégration sur une durée déterminée, l'irradiation en:  $kWh/m^2$

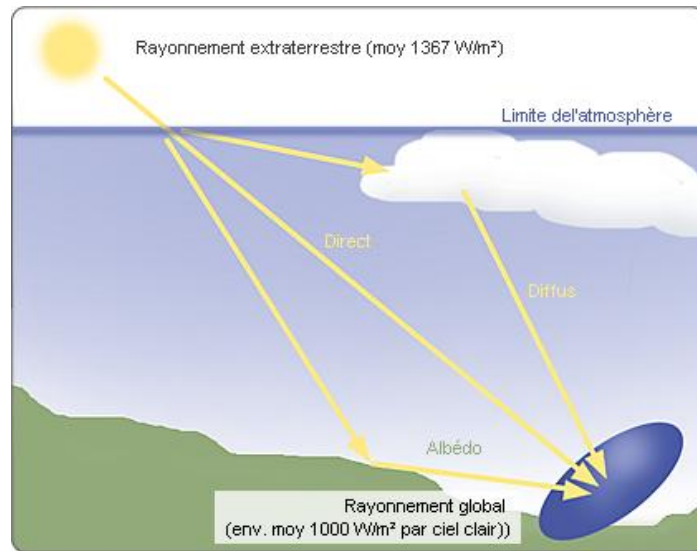


Figure I-10: Rayonnement global

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

**a) Le rayonnement direct :**

Le rayonnement direct est le rayonnement solaire incident sur un plan donné et provenant d'un angle solide centré sur le disque solaire.

**b) Le rayonnement diffus :**

Le rayonnement diffus est le rayonnement émis par des obstacles (nuages, sol, bâtiments) et provient de toutes les directions.

La conversion photovoltaïque (utilisant les modules) utilise aussi bien le rayonnement direct que le rayonnement diffus.

**c) L'albédo :**

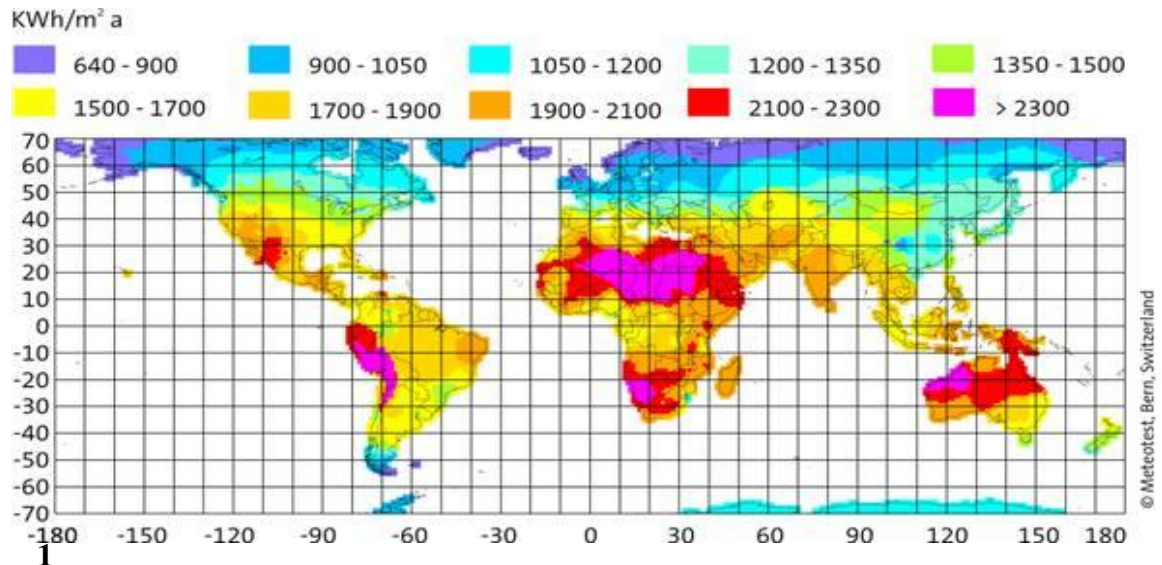
C'est la fraction d'un rayonnement incident diffusée ou réfléchi par un obstacle. Ce terme étant généralement réservé au sol aux nuages, c'est une valeur moyenne de leur réflectance pour le rayonnement considéré et pour tous les angles d'incidences possible. Par définition, le corps noir possède un albédo nul.

*d) Le rayonnement global :*

C'est tout simplement la somme de ces diverses contributions. [3,6].

- **Répartition géographique du rayonnement solaire :**

Au niveau géographique, l'énergie solaire reçue est inégalement répartie. Dans les régions les plus chaudes du globe, l'ensoleillement annuel peut atteindre 2300 kWh/m<sup>2</sup>.an (Figure I.11). En Europe centrale, l'ensoleillement moyen est de 1100 kWh/m<sup>2</sup>.an.



**Figure I-11:** Répartition de l'énergie solaire dans le monde

- **Caractéristique de rayonnement solaire :**

*a) L'atmosphère :*

Les couches atmosphériques modifient profondément la distribution spectrale du rayonnement solaire. Il subit une atténuation et une modification de son spectre, à la suite des phénomènes complexes d'absorption et de diffusion par les poussières et les aérosols (les poussières des cendres, des micros cristaux, des micros gouttelette, des fumées de pollution industrielle dont la taille varie de 0.5 à 10 μm). Ainsi la couche d'ozone absorbe la majeure partie du rayonnement ultraviolet, tandis que la vapeur d'eau absorbe le rayonnement infrarouge. [3].

*b) Masse d'air :*

Plus le soleil est bas sur l'horizon, plus il va traverser une épaisseur importante d'atmosphère et plus son rayonnement est modifié. On appelle « masse d'air »,  $m$ , la masse d'atmosphère traversée par le rayonnement directe pour atteindre le sol (par ciel clair), par rapport à une traversé vertical au niveau de la mer.

Cela dépend de la hauteur angulaire du soleil (h). A l'aide des points O, A et M, on écrit la longueur du trajet du soleil traversant l'atmosphère :

$$OM = \frac{OA}{\sin h} \dots\dots\dots (I-3)$$

On appelle m le rapport OM /OA, soit 1/sin h.

A une pression p différente de 1013 mbar et à altitude z (km), on désignera par masse atmosphérique ou nombre d'air masse le nombre [3] :

$$m = \frac{p}{1013 \times \sin h} \exp\left(-\frac{z}{7.8}\right) \dots\dots\dots (I-4)$$

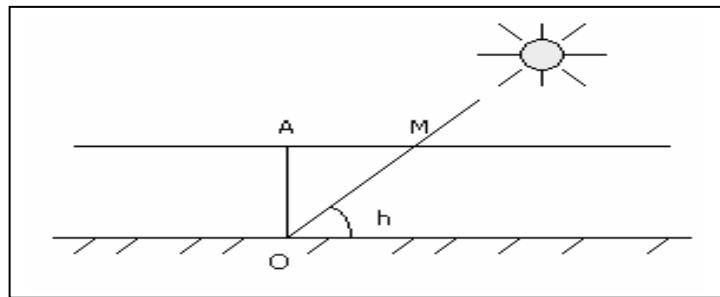


Figure I-12: le rayonnement solaire et le nombre d'air masse [4].

**Exemple :**

- Soleil au zénith (au niveau de la mer) on obtient les conditions : AM<sub>1</sub> (m =1/sin 90°=1)
- Avec un soleil à 30° sur l'horizon, on obtient les conditions : AM<sub>2</sub> (m =1/sin 30°)
- par convention AM<sub>0</sub>, désigne le rayonnement solaire hors atmosphère. [4].



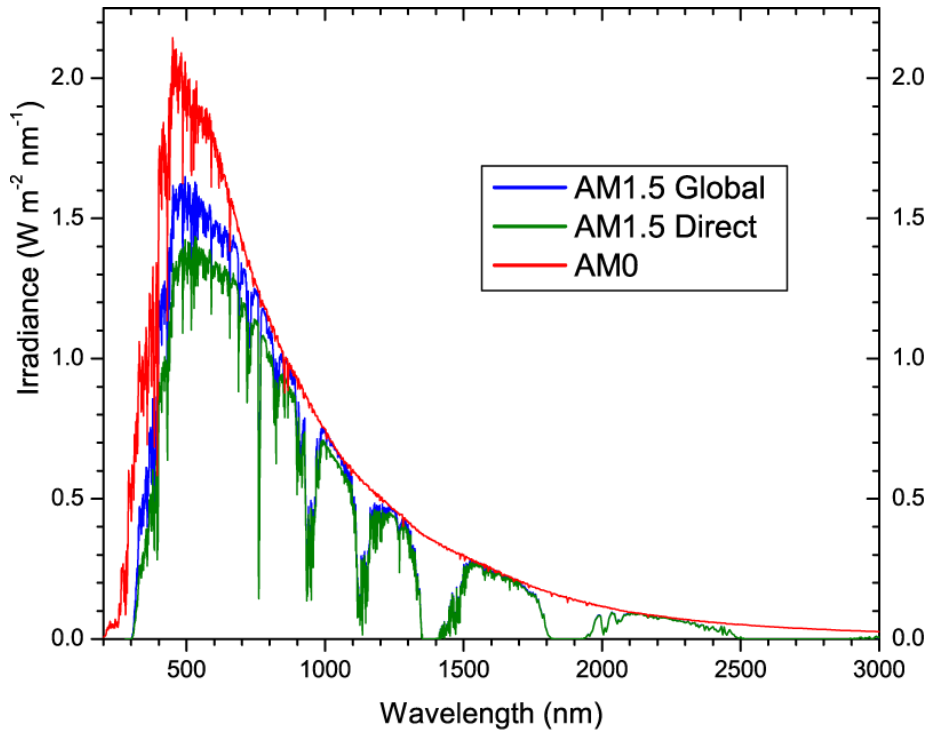


Figure I-13 : Représentation graphique des spectres AM0, AM1, 5

• Quelques grandeurs photométriques :

a) *Le Flux :*

Le flux lumineux est la valeur instantanée d'un débit de rayonnement. On peut mesurer le flux émis par une source, transporté par un faisceau ou encore reçu par un détecteur. Il peut être mesuré par la puissance qu'il transporte ou par le nombre de photons qu'il transporte par unité de temps, pour une surface S déterminée. Le flux lumineux s'exprime en Watts (W). [8].

b) *L'intensité Lumineuse :*

L'intensité I d'une source de rayonnement est le rapport entre le flux  $d\Phi$  qu'elle émet dans un petit angle solide donné et la valeur de celui-ci. I est en w/sr. [8].

c) *L'éclairement :*

L'éclairement E est la valeur locale du rapport entre le flux reçu par une surface élémentaire d'un récepteur et l'aire de cette surface, soit : [8].

$$E = \frac{d\phi}{ds} \dots\dots\dots (I-5)$$

E est en W/m<sup>2</sup>.

**d) L'exposition :**

L'exposition H d'une surface réceptrice en un point donné est l'intégrale de l'éclairement en ce point pendant un intervalle de temps donné [8] :

$$H = \int E dt \dots\dots\dots (I-6)$$

H est donc en J.m<sup>2</sup>.

**e) La Luminance :**

Considérons une source de faible surface dS entourant un point O. Soit dI l'intensité de l'élément dans une direction D, et A l'angle formé par d et la normale à l'élément. [8].

$$L = \frac{dI}{(dS \cos A)} \dots\dots\dots (I-7)$$

**CONCLUSION :**

Cette étude théorique concerne le gisement. Nous avons rappelé des définitions générales sur le rayonnement solaire (caractéristique des rayonnements solaires et les coordonnées terrestres) et quelques éléments de géométrie, les différents types de rayonnement.

Nous avons terminé par des définitions sur les notions de flux, l'intensité lumineuse, et l'éclairement.

**BIBLIOGRAPHIE :**

- [1] : B Bourges ; M Albuisson ; D Mayer ; L Wald « Le gisement solaire dans le cas des Applications photovoltaïques ».Le développement du solaire photovoltaïque. Journée, Paris, France. 10/12/1998.
- [2] :[http:// www. thermesciel.Fr](http://www.thermesciel.fr).
- [3] :A. Lauger.J.A.Roger « Les photopiles solaire» technique et documentation ,1981.
- [4] : C.Delerome « Revue internationale d'héliotechnique »année 1997.
- [5] : A.Ricaud « Photopiles solaire de la physique de conversion photovoltaïque aux filières, Matériaux et procédés ».presses polytechniques et universitaires romandes 1997.
- [6] :G.Bonnet « Rapport interne ENS de Lyon » 2002.
- [7] : [http://www. Les panneaux solaire PV](http://www.lespanneauxsolairepv.com) regroupement des cellules PV reliées entre elles en Série en parallèle.
- [8] :M.Orgeret « Les piles solaires », Paris.1985.
- [9] : Climate Change 2007: The Physical Science Basis, publication du Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat.
- [10] : rapport publié en 2008 par l'Organisation Internationale des Migrations.
- [11]: rapport publié par UK Energy Research Center.

**II.1. INTRODUCTION :**

L'utilisation des cellules solaires comme source d'énergie électrique a fait apparaître le besoin d'étudier ces systèmes afin de les optimiser. Le générateur photovoltaïque est composé particulièrement de :

1. Cellules solaires.
2. Modules (ou panneaux solaires).
3. Générateur photovoltaïque.

Dans ce chapitre, nous allons donner l'essentiel sur la constitution et les caractéristiques électriques de ces structures.

**II. 2 Cellule solaire :**

La conversion photovoltaïque est la transformation de l'énergie lumineuse en énergie électrique. Les dispositifs capables d'effectuer cette transformation sont appelés cellules solaires ou photovoltaïques.

Le principe d'une cellule solaire est basé sur le phénomène physique appelé « effet photovoltaïque ». Celui-ci consiste à établir une force électromotrice lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière. La tension générée peut varier entre 0.3 V et 0.7 V en fonction du matériau utilisé, de sa disposition, de la température de la cellule ainsi que du vieillissement de la cellule.

**II. 2. 1 Structure et principe de fonctionnement :**

La figure II.1 illustre la structure d'une cellule PV typique. On voit clairement qu'elle est réalisée à partir de deux couches de semi-conducteurs : une dopée P (dopée au bore) et l'autre couche dopée N (dopée au phosphore) créant ainsi une jonction PN avec une barrière de potentiel. Lorsque les photons sont absorbés par le semi-conducteur, ils transmettent leur énergie aux atomes de la jonction PN de telle sorte que les électrons de ces atomes se libèrent et créent des électrons (charges N) et des trous (charges P). Ceci crée alors une différence de potentiel entre les deux couches. Cette différence de potentiel est mesurable entre les connexions des bornes positives et négatives de la cellule.

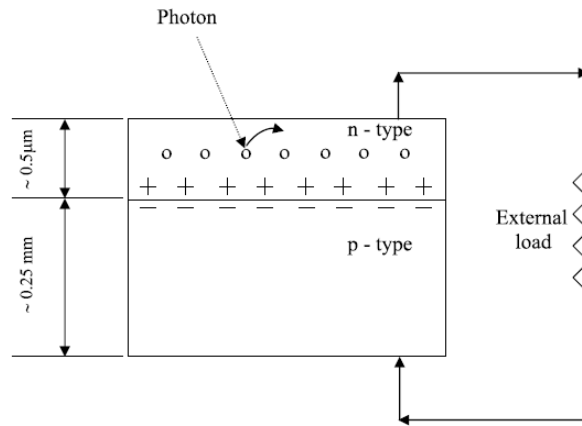


Fig. II.1 : Structure d'une cellule photovoltaïque.

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

$$I(V) = I_{ph} - I_{obs}(V) \dots\dots\dots(1. 1)$$

$I_{ph}$  : Courant photogénéré,

$I_{obs}$  : Courant d'obscurité.

Pour une cellule solaire idéale, l'équation (1. 1) peut être écrite sous la forme suivante :

$$I(V) = I_{ph} - I_s \left[ \exp\left(\frac{qV}{KT}\right) - 1 \right] \dots\dots\dots(1. 2)$$

Avec:

$I_s$  : Courant de saturation de la diode

q : charge élémentaire

K : constante de Boltzmann

T : la température.

Pour une cellule réelle, l'expression (1. 2) est alors remplacée par :

$$I = I_{ph} - I_s \left[ \exp\left(\frac{q(V + R_s I)}{nKT}\right) - 1 \right] - \frac{V + R_s I}{R_p} \dots\dots\dots(1. 3)$$

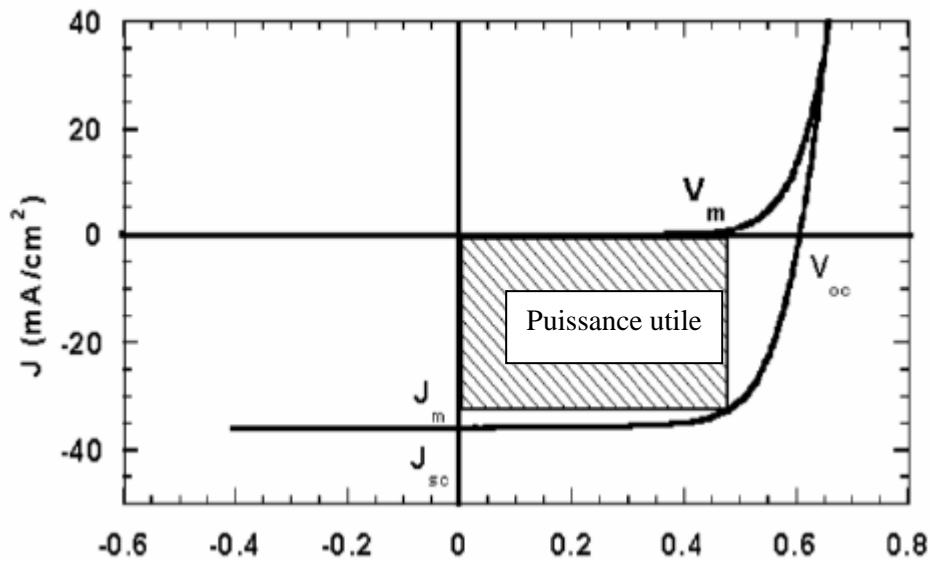
$$I_p = \frac{V + I.R_s}{R_p} : \text{Le courant dérivé par la résistance parallèle}$$

$$I_d = I_s \left[ \exp\left(\frac{q V + I R_s}{nKT}\right) - 1 \right] : \text{Le courant traversant la diode.}$$

$I_s$ : le courant de saturation inverse de la diode.

$n$ : facteur d'idéalité de la diode.

Sur la figure II.2 nous reportons cette caractéristique.



**Fig. II.2 :** Caractéristique I(V) sous obscurité et sous éclairissement d'une cellule photovoltaïque.

A partir de cette figure, on déduit les paramètres électriques propres à la cellule :

$I_{sc} = I_{ph}$  : Courant de court-circuit (obtenu pour  $V=0$ )

$V_{oc}$  : Tension en circuit ouvert (obtenue pour  $I=0$ )

$I_m$  : Courant à la puissance max de fonctionnement de la cellule solaire.

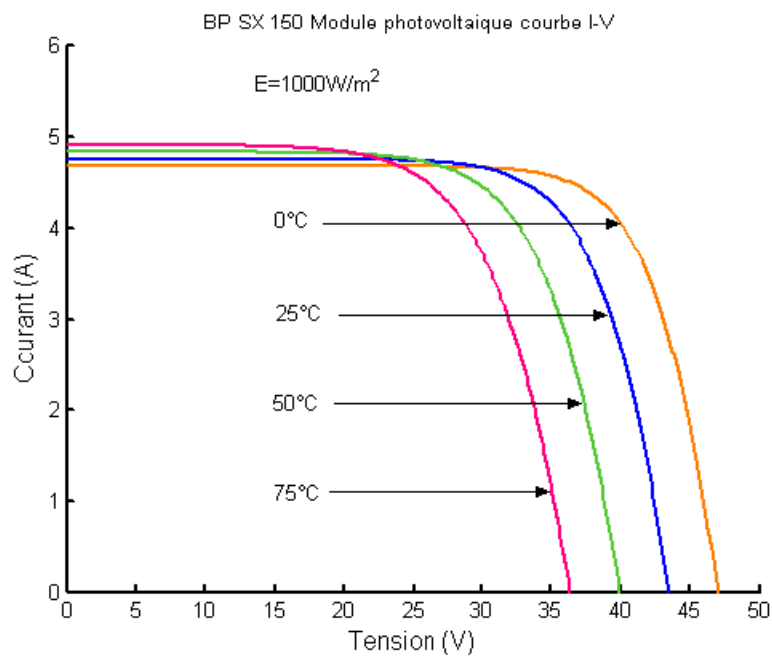
$V_m$  : Tension à la puissance maximale de fonctionnement de la cellule.

## II. 2. 2 Influence de la température et du rayonnement :

### II. 2. 2. 1 Influence de la température :

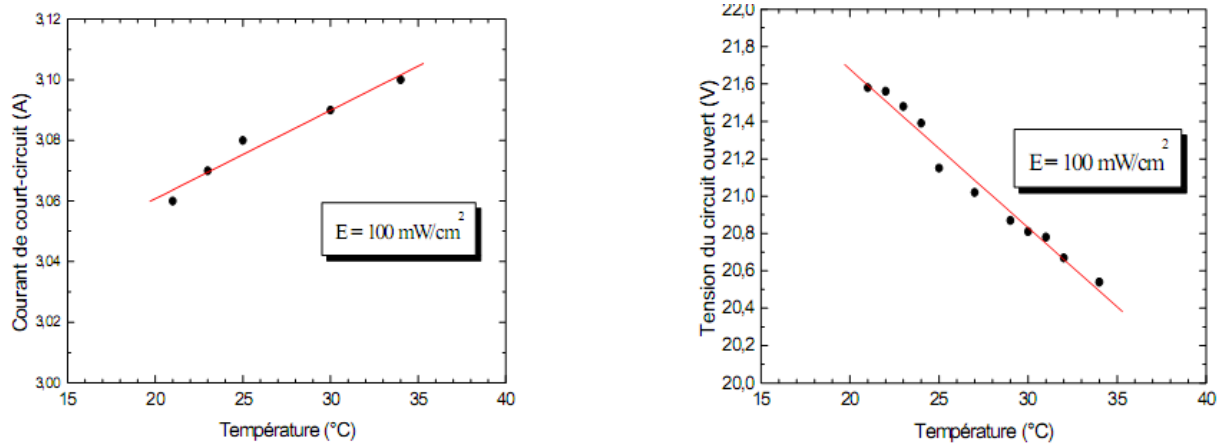
La température est un paramètre très important dans le fonctionnement des cellules solaires vu que les propriétés électriques d'un semi-conducteur sont très sensibles à la température.

Sur la figure (II.3), nous reportons les caractéristiques courant-tension pour différentes températures, sous un ensoleillement donné ( $E=1000W/m^2$ ),



**Fig. II.3 :** Effet de la température sur la caractéristique I-V.

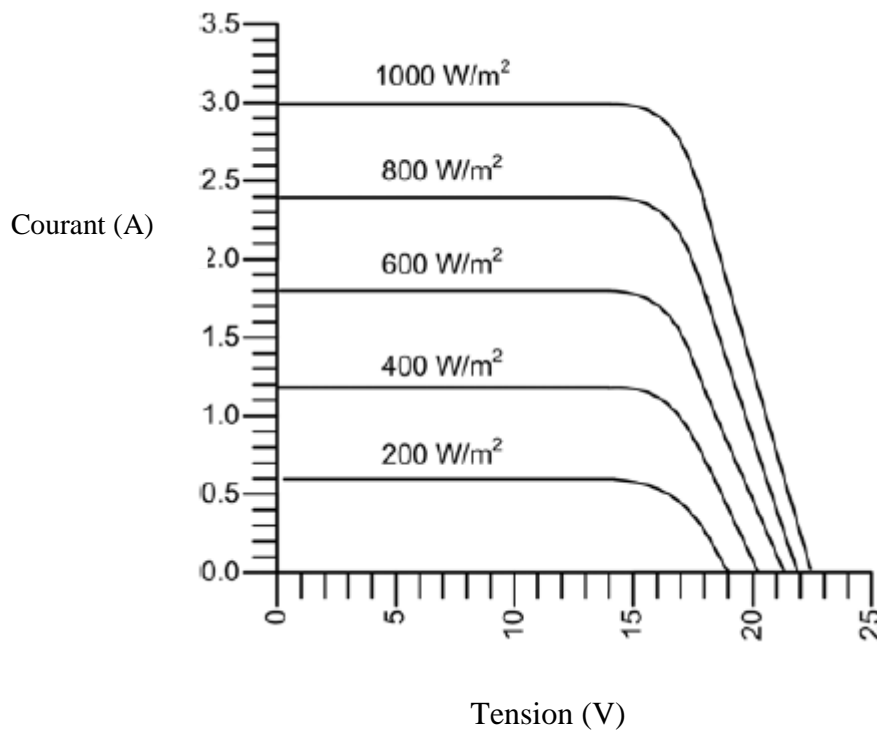
L'évolution du courant de court-circuit ( $I_{sc}$ ) et de la tension du circuit ouvert ( $V_{oc}$ ) avec la température pour un ensoleillement  $E = 100mW / cm^2$  est alors donnée sur la figure (1. 4)



**Fig. II.4:** Evolution du courant de court-circuit et de la tension du circuit ouvert avec la température.

**II. 2. 3. 2 Influence du rayonnement :**

De la même manière que la température, la jonction PN réagit différemment selon l'énergie qu'elle reçoit. Plus elle reçoit d'énergie plus elle en restitue. La variation de la caractéristique  $I(V)$  est représentée sur les courbes suivantes :



**Fig. II.5 :** L'évolution de la caractéristique courant- tension avec l'énergie reçue.



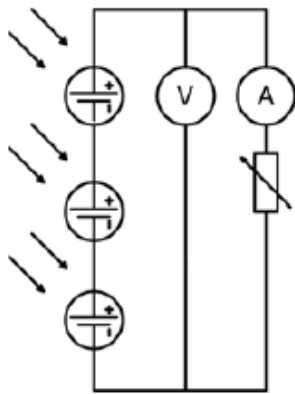
**II. 3 Le panneau solaire :**

La cellule individuelle, unité de base d'un système photovoltaïque, ne produit qu'une très faible puissance électrique, typiquement de 1 à 3 W avec une tension de moins d'un Volt. Pour produire plus de puissance, les cellules sont assemblées pour former un module (ou panneau). Les connections en série de plusieurs cellules augmentent la tension pour un même courant, tandis que la mise en parallèle accroît le courant en conservant la tension. La puissance crête, obtenue sous un éclairage maximal sera proportionnelle à la surface du module.

La mise en série ou parallèle des cellules solaires aboutit aux caractéristiques  $I(V)$  suivantes:

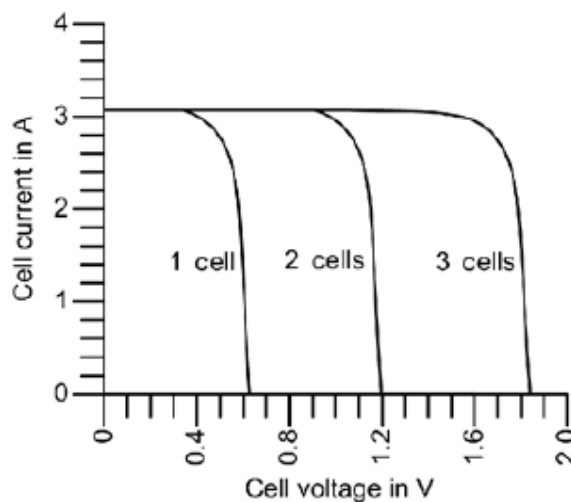
**II. 3. 1 Cellules en série :**

- *Schéma électrique* : Le schéma des cellules en série est comme suit :



**Fig. II.6 :** Les cellules placées en série.

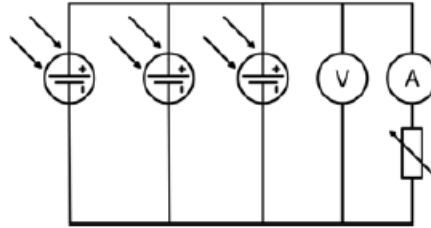
- *Caractéristiques courant – tension* : voici le diagramme :



**Fig. II.7 :** L'évaluation de la caractéristique courant- tension avec le nbre de cellules en série.

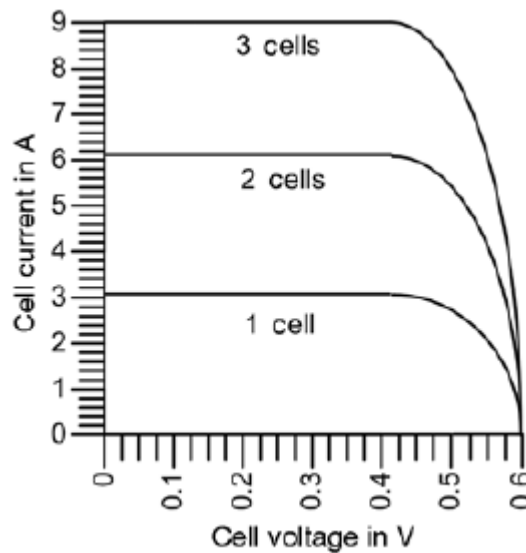
### II. 3. 2 Cellules en parallèle

- *Schéma électrique* : Le schéma des cellules en parallèle est comme suit :



*Fig. II.8* : Les cellules placées en parallèle.

- *Caractéristiques I(V) courant – tension* : voici le diagramme :



*Fig. II.9* : L'évaluation de la caractéristique I(V) avec le nombre de cellules en parallèle.

### II. 4 Le générateur photovoltaïque

L'interconnexion des modules entre eux, en série ou en parallèle, pour obtenir une puissance plus grande, définit la notion de *générateur photovoltaïque* (GP). Le générateur photovoltaïque se compose de plusieurs modules et d'un ensemble de composants qui adaptent l'électricité produite par les modules aux spécifications des récepteurs.

L'interconnexion des cellules peut être série ou parallèle. La tension totale disponible est égale au produit du nombre de cellules en série par la tension d'une cellule, et le courant est multiplié par le nombre de cellules connectées en parallèle.

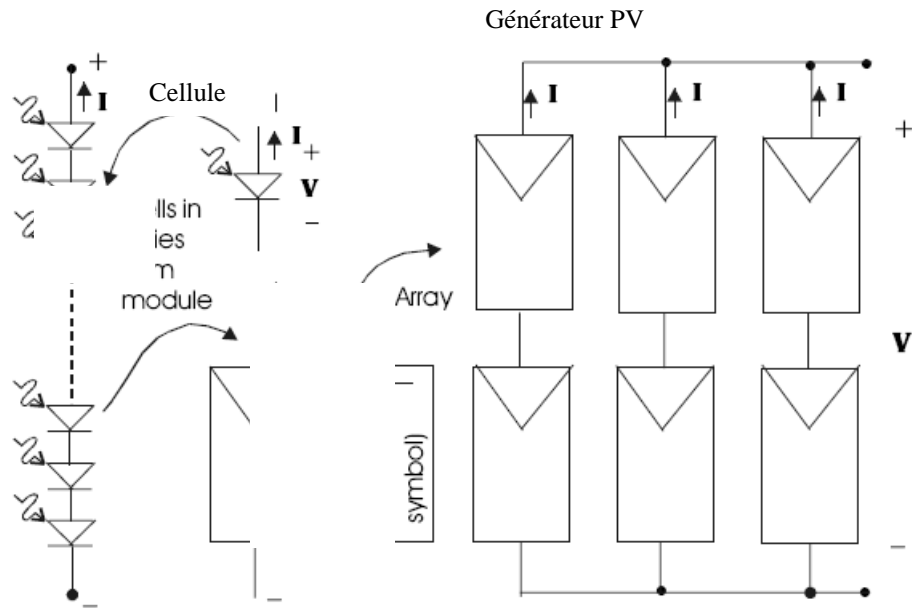


Fig. II.10 : La Notion de cellule, panneau et générateur photovoltaïque.

**II.5 Modèle électrique du générateur photovoltaïque :**

**II.5.1 Schéma électrique équivalent :**

En tenant compte de l'effet de l'association des cellules PV, nous pouvons décrire le schéma électrique équivalent d'un générateur PV par la figure (II.11) ci-dessous:

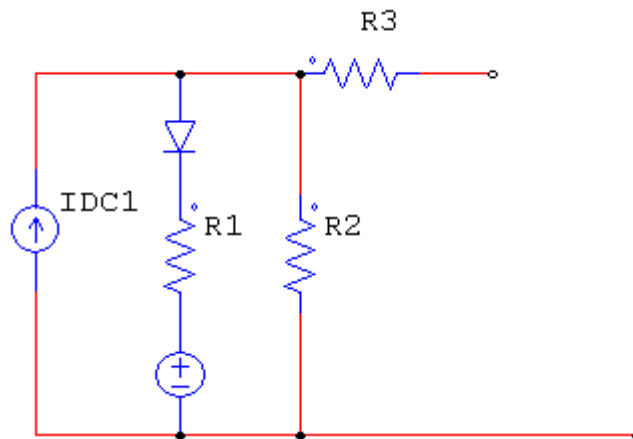


Fig. II.11 : Le schéma électrique équivalent d'un générateur photovoltaïque.

**II.5.2 Caractéristiques courant – tension**

Sur la figure (II.12), nous reportons un exemple de la caractéristique I-V d'un module constitué d'une association de trois branches en parallèles ayant chacune deux branches en série. On remarque que :

- Le courant du module est égal au courant de la cellule multiplié par le nombre des cellules montées en parallèle.

- La tension totale est égale au produit de la tension de la cellule par le nombre des cellules en série.

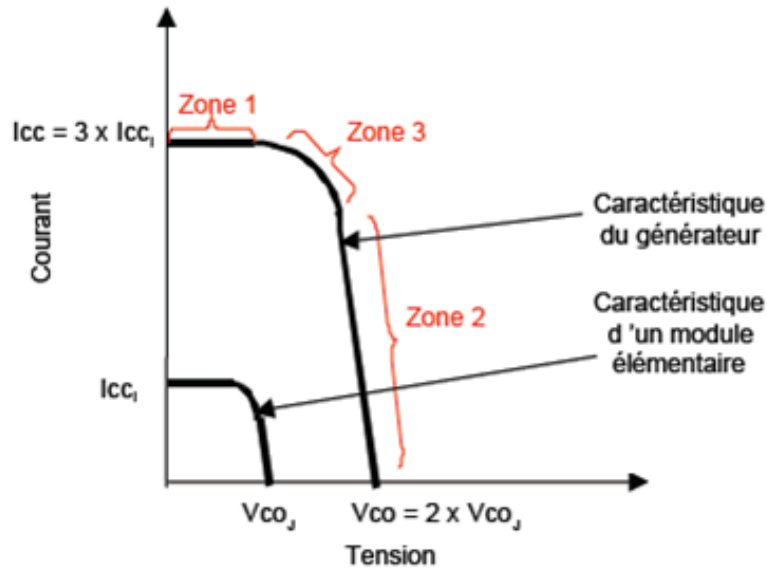


Fig. II.12 : Caractéristiques I(V) d'une cellule et d'une association de 3 branches en parallèle ayant chacune 2 cellules en série.

Nous pouvons décomposer la caractéristique I(V) du générateur photovoltaïque en 3 zones :

- Une zone assimilable à un générateur de courant  $I_{CC}$  proportionnel à l'irradiation, d'admittance interne pouvant être modélisée par  $1/R_p$  (Zone 1).
- Une zone assimilable à un générateur de tension  $V_{CO}$  d'impédance interne équivalente à  $R_s$  (Zone 2).
- Une zone où l'impédance interne du générateur varie très fortement de  $R_s$  à  $R_p$  (Zone 3).

**II. 5. 3 Caractéristiques puissance – tension :**

Le diagramme de la caractéristique se présente comme suit :

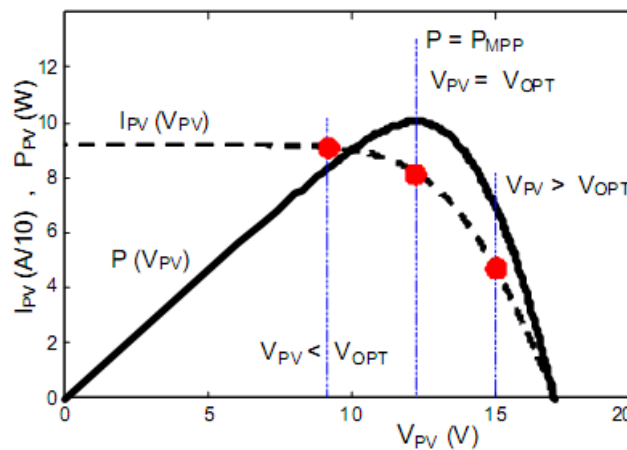


Fig. II.13 : Caractéristique courant-tension et puissance-tension.

## II. 6 Ensemble panneau – batterie :

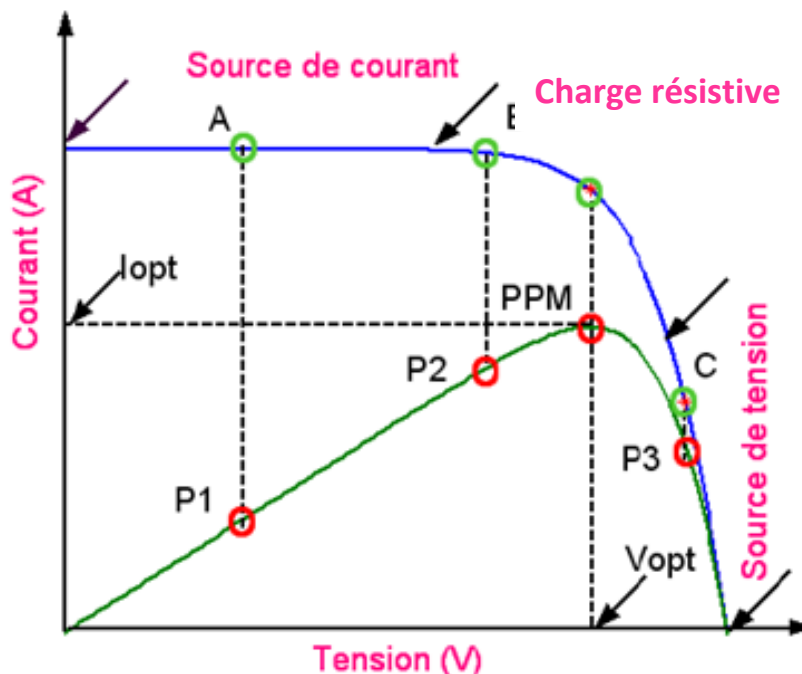
### II. 6. 1 Caractéristiques électriques (I(V) et P(V)) :

Trois types de charges DC typiques existent : une charge purement résistive, une charge de type source de tension et une charge de type source de courant. Sur la figure (1. 14), nous avons représenté les caractéristiques I(V) et P(V) d'un générateur PV ainsi que les caractéristiques I(V) des trois types de charges.

Tout d'abord, nous pouvons identifier le point de fonctionnement où la puissance fournie par le générateur est maximale pour un courant optimal et une tension optimale. Ce point est nommé MPP (Maximum Power point). Ensuite, nous remarquons le point d'intersection entre les caractéristiques I(V) du générateur et celles des trois types de charges :

1. point A pour une charge en source de courant,
2. point B pour une charge résistive,
3. point C pour une charge de type source de tension,

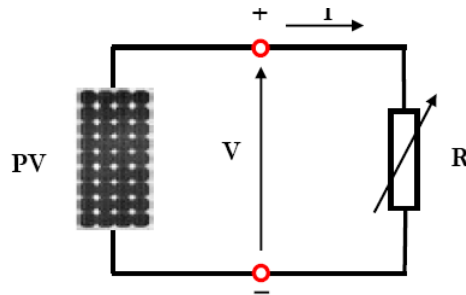
Pour ces trois points, la puissance fournie par le générateur est respectivement P1, P2 et P3, comme l'illustre la figure (II.14), correspondant à des valeurs de puissance inférieures à la puissance maximale disponible. Donc une perte d'une partie de la puissance délivrée par le générateur PV implique, des pertes de production énergétiques importantes.



**Fig. II.14 :** Caractéristique I(V) et P(V) établissant le principe du point de puissance maximale (MPP).

### II. 6. 2 Liaison directe :

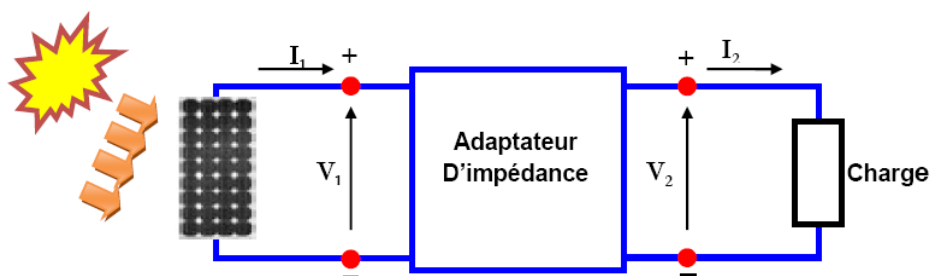
L'inconvénient de cette configuration est qu'elle n'offre aucun type de limitation et/ou réglage de la tension de la batterie. Le transfert de Puissance maximale disponible aux bornes du GPV vers la charge n'est pas non plus garanti.



*Fig. II.15* : Schéma électrique d'une liaison directe générateur PV – charge

### II. 6. 3 Liaison à travers un étage d'adaptation Générateur PV-Charge :

La production de puissance varie fortement en fonction de l'éclairement, de la température et du vieillissement du système. De plus, selon les caractéristiques de la charge sur laquelle le générateur PV débite, nous pouvons trouver un très fort écart entre la puissance potentielle du générateur et celle réellement transférée à la charge en mode connexion directe. Afin d'extraire à chaque instant le maximum de puissance disponible aux bornes du générateur PV et de la transférer à la charge, la technique adoptée classiquement consiste à utiliser un étage d'adaptation entre le générateur PV et la charge comme décrit dans la figure (II.16). Cet étage joue le rôle d'interface entre les deux éléments en assurant, à travers une action de contrôle, le transfert du maximum de puissance fournie par le générateur pour qu'elle soit la plus proche possible de la puissance maximale disponible.



*Fig. II.16* : Etage d'adaptation d'un générateur PV- charge.

**CONCLUSION :**

Dans ce chapitre, nous avons donné un aperçu général sur le domaine photovoltaïque. Nous avons commencé par donner l'essentiel sur les cellules solaires (structure, principe de fonctionnement, ...). La liaison de ces cellules (série et/ou parallèle) a été également traitée. Cette liaison constitue le module photovoltaïque; alors que la liaison de ces modules aboutit au panneau ou générateur photovoltaïque.

L'influence de la température et de l'éclairement sur les caractéristiques courant-tension a été présentée. De même, nous avons donné un bref aperçu sur les différentes liaisons entre le générateur PV et la charge.

**BIBLIOGRAPHIE :**

www .l'énergie renouvelable .com.

BUHLER, H. Électronique de puissance, Georgi, Lausanne, 1978.

[http://fr.wikipedia.org/wiki/panneau\\_solair](http://fr.wikipedia.org/wiki/panneau_solair) 2 3

Microsoft ENCARTA 2009, PREMIUM Collection



### III-1 INTRODUCTION

Plusieurs paramètres peuvent influencer l'énergie captée par un système PV :  
Le mouvement terre soleil, la position du soleil, l'orientation du panneau solaire, la situation Géographique...

Dans ce chapitre nous présentons les paramètres essentiels pour l'estimation des énergies captées par les systèmes PV.

### III-2 MOUVEMENT TERRE- SOLEIL :

On peut décomposer le mouvement de chacun d'eux en mouvement de rotation et mouvement de translation [3].

#### III-2-1-a Mouvement de rotation :

La terre tourne autour de son axe de rotation (Pôle Nord, Pôle Sud) dans le sens trigonométrique. L'alternance des jours et des nuits est une manifestation immédiate de ce mouvement. On définit le jour solaire comme la durée moyenne entre deux passages consécutifs au méridien d'un lieu. Ce jour est divisé en 24 intervalles égaux appelés heures. La rotation de la terre s'effectue avec une période de :  $P_r = 23\text{h } 56\text{mn } 04\text{s} \approx 24\text{h}$ .

Sa vitesse linéaire de rotation à l'équateur est ;  $V_r \approx 0,465\text{Km/s}$ , elle est variable en fonction de latitude  $\varphi$  telle que :

$$V_r(\varphi) = V_r(\cos(\varphi))$$

Les saisons n'existent pas si la terre se tenait droit sur son orbite, mais le fait que son axe de rotation est penché d'un angle  $23^{\circ}27' \approx 23,45^{\circ}$  avec un mouvement de révolution de la terre, le pôle Nord et le pôle Sud vont pouvoir successivement se dorer à la lumière. [2]

#### III-2-1-b Mouvement de translation :

Dans l'univers tout est en mouvement. La terre est en rotation sur elle-même puis elle tourne au tour du soleil en  $P_t = 365\text{jours } 5\text{h } 48\text{mn } 40\text{s} \approx 365,25\text{ jours}$ . Elle décrit une orbite elliptique dont le soleil occupe l'un des foyers. Cette orbite est située dans un plan appelé plan de l'écliptique où le soleil est presque au centre. Elle est légèrement aplatie, elle correspond à un cercle de rayon moyen de 150 millions de Kilomètres. La terre tourne avec une vitesse moyenne  $V_t \approx 29,77\text{Km/s}$  [vitesse maximale en hiver  $30,27\text{ Km/s}$  et minimale en été  $29,77\text{ Km/s}$ ]. Ce mouvement s'effectue dans le sens trigonométrique et provoque le cycle des saisons. [2]

#### La distance terre- soleil :

La distance terre- soleil varie quotidiennement selon la relation suivant [4]:

$$D_{TS}(N) = 1 - 0,017 \cdot \cos\left[\frac{360(N-2)}{365}\right] \quad \text{en U.A} \quad (\text{II-1})$$

N : le numéro du jour de l'année compté à partir du 1er janvier, c à d il varie de 1 à 365 ou 366 selon l'année :

Année civile :  $N = 365\text{ jours}$ , Année bissextile :  $N = 366\text{ jours}$

DTS (min) =  $0,983\text{ UA}$  vers le 2 janvier (Périgée).

DTS (max) =  $1,017\text{ UA}$  vers le 5 juillet (Apogée).

L'unité astronomique :  $1\text{ U.A.} = 149\,597\,870,691\text{ km}$

**III-2-2 Mouvement apparent du soleil :**

Pour étudier le mouvement du soleil nous examinerons le mouvement apparent du soleil pour un observateur sur terre. En un point de latitude  $\varphi$  au Nord de l'équateur, le soleil d'écrit un arc de cercle variable chaque jour a raison de 150 par heure.

L'angle que fait la direction du soleil avec le vertical du lieu est appelé « Distance Zénithale (ou angle zénithal) » noté Z. Elle varie quotidiennement et annuellement entre [2] :

$$\varphi - 23^{\circ}27' \leq Z \leq \varphi + 23^{\circ}27'$$

- Aux équinoxes (EA et EP)  $\rightarrow Z = \varphi$   
Les journées ont une durée de 12h.
- Au solstice hiver (SH)  $\rightarrow Z = \varphi + 23^{\circ}27'$   
Les journées ont une durée inférieure à 12h.
- Au solstice été (SE)  $\rightarrow Z = \varphi - 23^{\circ}27'$   
Les journées ont une durée supérieure à 12h.
- En un point de l'équateur ( $\varphi = 0$ )  $\Rightarrow 23^{\circ}27' \leq Z \leq 23^{\circ}27'$   
La durée des jours est de 12h = constante.
- En un point de l'attitude  $\varphi$ , le mouvement du soleil sera identique si on inverse les positions du sud et du nord.

**III-3 Repérage d'un site sur la surface terrestre :**

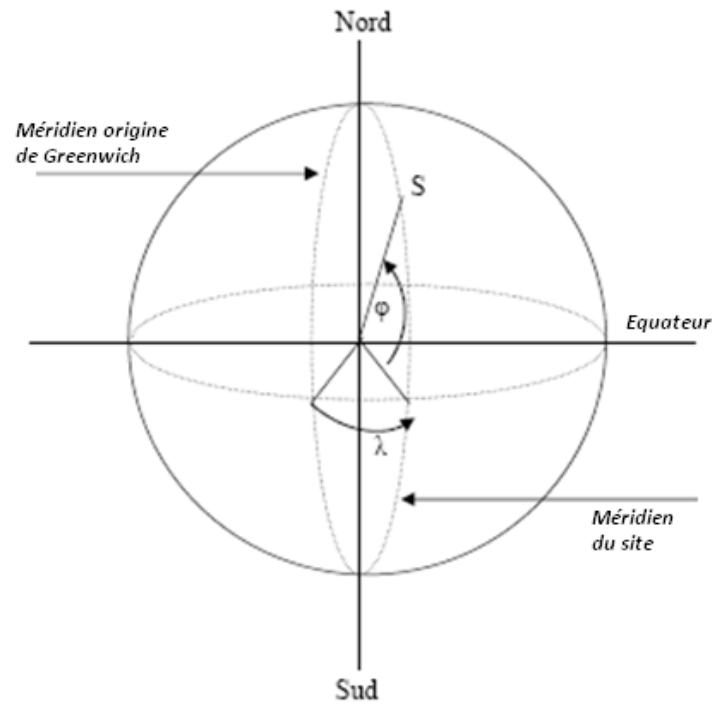
Les coordonnées géométriques utilisées pour déterminer la localisation d'un point sur la surface terrestre sont : La latitude et la longitude, qui sont calculées en angle et qui s'expriment en degrés, minutes et secondes d'angle [3].

- La latitude  $\varphi$  donne la localisation d'un point par rapport à l'équateur, elle varie de  $0^{\circ}$  à l'équateur à  $90^{\circ}$  N (ou S) aux pôles. Elle représente la distance angulaire du site S par rapport au plan de l'équateur.

$$\varphi \text{ Varie de } -90^{\circ} \text{ à } +90^{\circ} \text{ tel que : } \left\{ \begin{array}{l} \varphi > 0 \text{ Vers le Nord} \\ \varphi < 0 \text{ Vers le Sud} \end{array} \right.$$

- La longitude  $\lambda$ , permet de localiser un point à l'Est ou à l'Ouest d'une ligne Nord- Sud de référence appelée le méridien (Greenwich).

$$\lambda \text{ Varie de } -180^{\circ} \text{ à } +180^{\circ} \text{ tel que : } \left\{ \begin{array}{l} \lambda > 0 \text{ à l'est du méridien de Greenwich.} \\ \lambda < 0 \text{ à l'ouest du méridien de Greenwich.} \end{array} \right.$$



*Figure (III-1) : Repérage d'un site sur la surface terrestre*

#### III-4 Les coordonnées du soleil :

Pour un lieu donné, la position du soleil est repérée à chaque instant de la journée et de l'année par deux systèmes de coordonnées différents [4]:

- Par rapport au plan équatorial de la terre (repère équatorial).
- Par rapport au plan horizontal du lieu (repère horizontal).

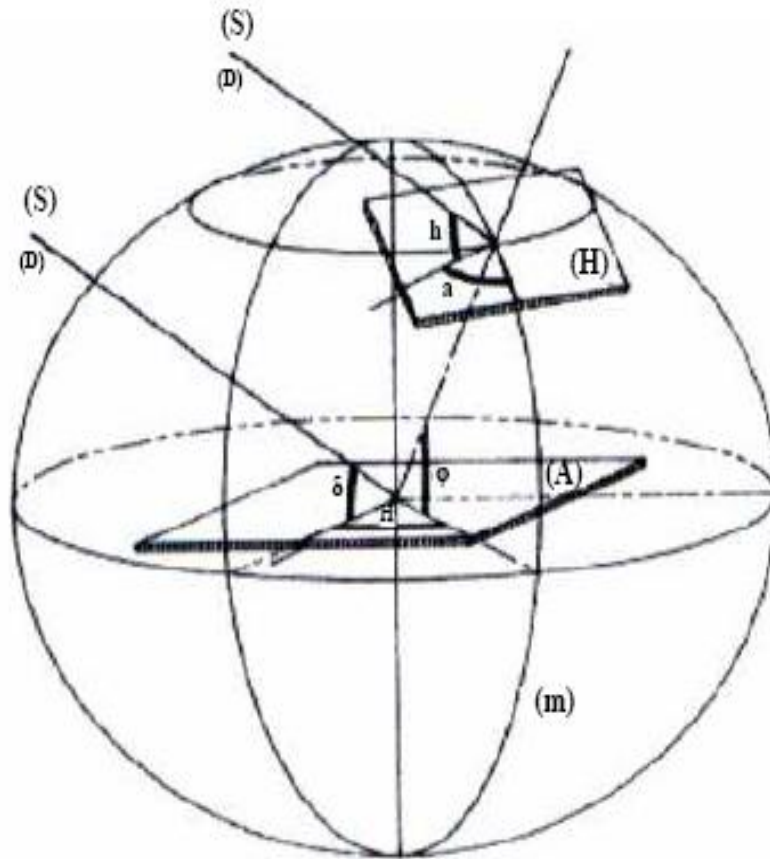


Figure (III- 2) : La direction du soleil (S) repéré en coordonnées équatoriales et en coordonnées horizontales en un lieu donné de latitude  $\phi$  [1].

#### III-4-a- Coordonnées équatoriales :

Le mouvement du soleil est repéré par rapport au plan équatorial de la terre à l'aide de deux angles ( $\delta$ , H).

##### III-4-a-1- La déclinaison du soleil $\delta$ :

C'est l'angle que fait la direction du soleil avec sa projection sur le plan équatorial. La déclinaison du soleil varie quotidiennement selon la relation [5] :

$$\delta = 23,45 \cdot \text{Sin} \left[ \frac{360}{365} (N - 80) \right] \quad (\text{II-2})$$

Ou avec plus de précision :

$$\delta = \text{ArcSin} \left[ 0,389 \cdot \text{Sin} \left[ \frac{360}{365} (N - 82) \right] + 2 \cdot \text{Sin} \frac{360}{365} (N - 2) \right] \quad (\text{II-3})$$

N : le numéro du jour de l'année compté à partir du 1er janvier, c à d il varie de 1 à 365 ou 366 selon l'année :

Année civile : N = 365 jours

Année bissextile : N = 366 jours

$\delta$  varie entre deux valeur extrêmes :  $-\delta_0 \leq \delta \leq +\delta_0$  avec  $\delta_0 = 23,45^\circ$ .

On prend :

- $\delta = 0$  aux Equinoxes (E.P, E.A)
- $\delta = 23,45^\circ$  au Solstice été (S.E)
- $\delta = -23,45^\circ$  au Solstice hiver (S.H)
- $\delta > 0$  aux E.P- S.E –E.A
- $\delta < 0$  aux E.A – S.H – E.P

La variation de la déclinaison du soleil au cours de l'année est représentée comme suit :

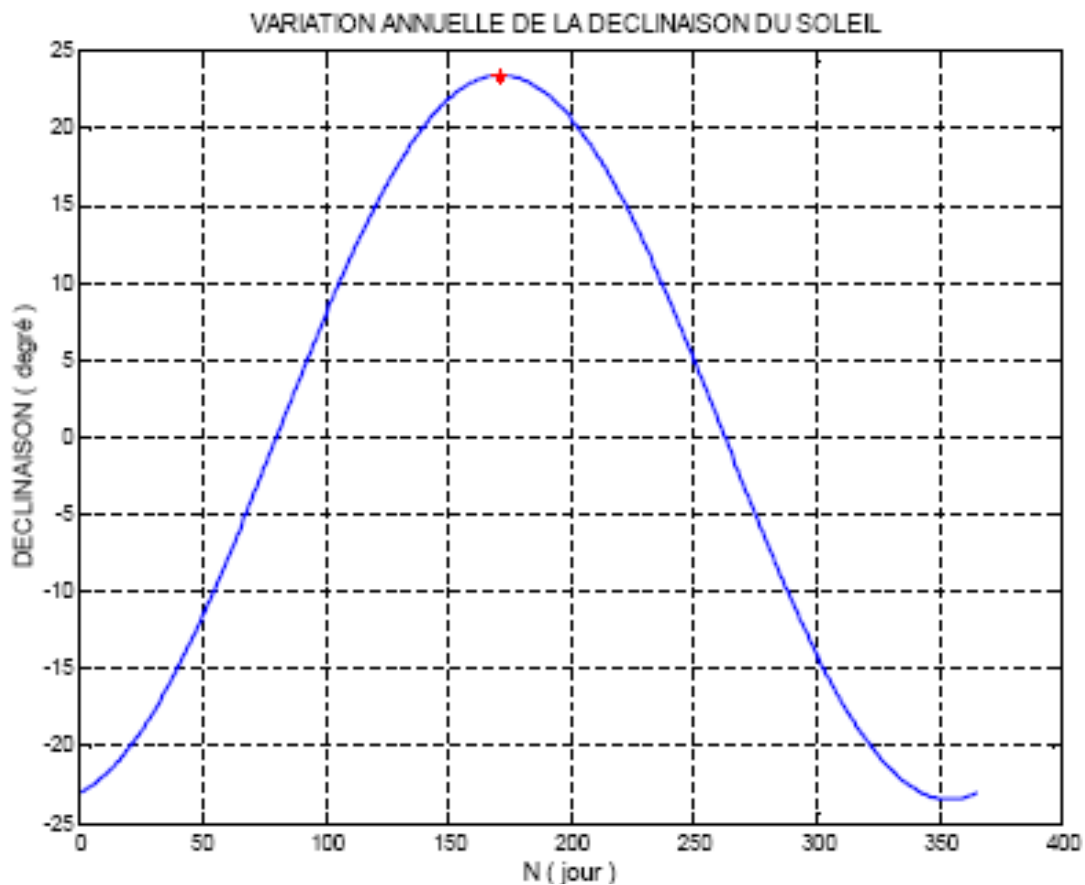


Figure (III- 3) : Déclinaison du soleil en fonction du numéro du jour de l'année N.

**III-4-a-2- L'angle horaire du soleil H :**

C'est l'angle que font les projections de la direction du soleil avec la direction du méridien du lieu, l'angle horaire du soleil varie à chaque instant de la journée selon la relation [5] :

$$H = 15(TSV - 12) \tag{II-4}$$

$$\text{avec } \begin{cases} TSV = TL - DE + \left( \frac{E_t + 4\lambda}{60} \right) \\ E_t = 9,87 \cdot \sin 2N' - 7,35 \cos N' - 1,5 \sin N' \\ N' = \frac{360}{365}(N - 81) \\ DE = +1 \text{ Pour l'Algérie.} \end{cases}$$

DE : décalage horaire par rapport au méridien de Greenwich.

TSV : temps solaire vrai = temps repéré de façon que le soleil se trouve au zénith à midi.

TL : temps légal = temps donné par une montre.

Et : correction de l'équation du temps.

$\lambda$ : longitude du lieu.

L'angle horaire H varie de  $-180^\circ$  à  $+180^\circ$ .

$$\text{On prend: } \begin{cases} H > 0 \text{ après midi.} \\ H < 0 \text{ le matin} \\ H = 0 \text{ midi TSV.} \end{cases}$$

**III-4-b- Coordonnées horizontales :**

Le mouvement du soleil est repéré par rapport au plan horizontal du lieu de latitude  $\phi$  par deux angles h et a.

**III-4-b-1- La hauteur du soleil h :**

C'est l'angle que fait la direction du soleil avec sa projection sur le plan horizontal. La hauteur du soleil varie à chaque instant de la journée et de l'année selon la relation suivante [5]:

$$\text{Sinh} = \text{Cosd} \cdot \text{Cosj} \cdot \text{Cosh} + \text{Sinj} \cdot \text{Sind} \tag{I-5}$$

h varie entre  $-90^\circ$  et  $+90^\circ$ .

$$\text{On prend: } \begin{cases} h > 0 \text{ le jour} \\ h < 0 \text{ la nuit} \\ h = 0 \text{ aux lever et coucher} \end{cases}$$

**III-4-b-2- L'azimut du soleil a :**

C'est l'angle que fait la projection de la direction du soleil avec la direction du Sud.

L'azimut du soleil varie à chaque instant de la journée selon la relation [5] :

$$\sin a = \frac{\cos \delta \cdot \sin H}{\cos h} \quad (I-6)$$

a : varie entre -180° et +180°.

On prend:  $\left\{ \begin{array}{l} a > 0 \text{ vers l'ouest} \\ a < 0 \text{ vers l'est} \\ a = 0 \text{ direction du sud} \end{array} \right.$

**II-5 L'orientation du panneau solaire :**

Elle est définie par deux angles (  $\gamma$  ,  $\alpha$  ) :

**a- La hauteur  $\gamma$  :**

C'est l'angle que fait la normale et sa projection sur le plan horizontal [2].

$\gamma$  varie entre -90° et +90° :  $\left\{ \begin{array}{l} \gamma > 0 \text{ plan tourné vers le haut} \\ \gamma < 0 \text{ plan tourné vers le bas} \\ \gamma = -90^\circ \text{ plan horizontal tourné vers le haut} \\ \gamma = -90^\circ \text{ plan horizontal tourné vers le bas} \\ \gamma = 0 \text{ plan vertical} \end{array} \right.$

**b- L'Azimut  $\alpha$  :**

C'est l'angle que fait la projection de la normale sur le plan horizontal et la direction du sud [2].

$\alpha$  varie entre -90° et +90° :  $\left\{ \begin{array}{l} \alpha > 0 \text{ vers l'ouest} \\ \alpha < 0 \text{ vers l'est} \\ \alpha = 0 \text{ plan Sud} \\ \alpha = -90^\circ \text{ plan Est orienté vers le nord} \\ \alpha = 180^\circ \text{ plan Nord orienté vers le nord} \\ \alpha = +90^\circ \text{ plan Ouest orienté vers l'ouest} \end{array} \right.$

L'inclinaison  $\beta$  par rapport au plan horizontal est donnée par :  $\beta = 90 - \gamma$ .

**II-6 LES DIFFERENTS TYPES D'ORIENTATION :**

L'énergie reçue par le panneau dépend de son orientation et de son angle d'incidence  $i$  [2].

Parmi les panneaux recevant une énergie instantanée, journalière et annuelle élevée :

- L'orientation TEL : qui est orienté face au Sud (hémisphère Nord) est incliné d'un angle  $\beta = \phi$  par rapport à l'horizontal. Ces coordonnées sont :

$\alpha = 0$ ,  $\gamma = 90 - \phi$  et  $i = 0$  uniquement aux équinoxes et à 12h TSV.

- L'orientation à un axe : qui suit le soleil en azimut et généralement est incliné d'un angle  $\beta = \phi$  par rapport à l'horizontal. Ces coordonnées sont :

$\alpha = a$ ,  $\gamma = 90 - \phi$  et  $i = 0$  uniquement aux équinoxes.

- L'orientation à deux axes : qui suit le soleil en site et en azimut et généralement est perpendiculaire aux rayons solaires à chaque instant de la journée. Ces coordonnées sont :

$\alpha = a$ ,  $\gamma = h$  et  $i = 0$

## CONCLUSION

Nous avons décrit en premier temps le mouvement terre-soleil à chaque instant de la journée et de l'année qui est nécessaire pour l'orientation du panneau solaire pour un site donné.

Après avoir expliqué les différents angles d'orientation avec leurs fonctions mathématiques on va entamer la phase pratique de notre suiveur solaire à deux axes.



**BIBLIOGRAPHIE :**

[1] : S. Bouazza, H. Bouchnafa, « Estimation des énergies incidentes et fournies par module photovoltaïque », Mémoire de DES, Université de Tlemcen, juin 2001.

[2] : F. Benyarou « Conception assistée par ordinateur des systèmes photovoltaïques modélisation, dimensionnement et simulation », Thèse de Doctorat d'état. Université de Tlemcen Juillet 2004.

[3] : F. Benyarou, « Conversion des énergies », Document de cours (EN01), Université de Tlemcen 2001- 2002.

[4] : S. Mejdoube, « Simulation et optimisation des paramètres photo solaire », thèse de Magister, Université de Tlemcen, 2001.

[5] : B. Benyoucef, « les énergies renouvelables », cours magister, 2002.

## IV.1. INTRODUCTION :

Le dispositif électronique SUNTRACKER-2 (KITLAAR45) est réalisé à base d'un PIC 16F628A [1] qui est un microcontrôleur 8-bit de la gamme *mid-range* de la société MICROCHIP, basé en Arizona (U.S.A), devenu leader mondial dans cette catégorie de composants numériques, depuis l'année 2000, devant MOTOROLA. Ce montage fournit en temps réel des informations sur la position du Soleil durant la journée, en fonction du temps, par rapport à la ville d'Oran (latitude =  $36^\circ$ , longitude =  $0^\circ$ ). Ces informations, stockées dans une EEPROM externe de 8 Ko (une 24LC64), sont visualisées sur un afficheur LCD 2x16 caractères, et traduites sous forme de protocole DiSEqC v1.2 pour le pilotage d'un positionneur numérique. L'intérêt d'utiliser une EEPROM externe est de donner la possibilité à un utilisateur de stocker une table des azimuth et élévation du Soleil, durant une année, pour une autre localité (latitude, longitude) sans retoucher au programme assembleur gravé dans le PIC16F628A. L'intérêt d'utiliser un moteur positionneur compatible DiSEqC v1.2 est de pouvoir bénéficier d'une précision angulaire inférieure à  $1^\circ$ , sans faire appel à un moteur pas à pas, très coûteux.

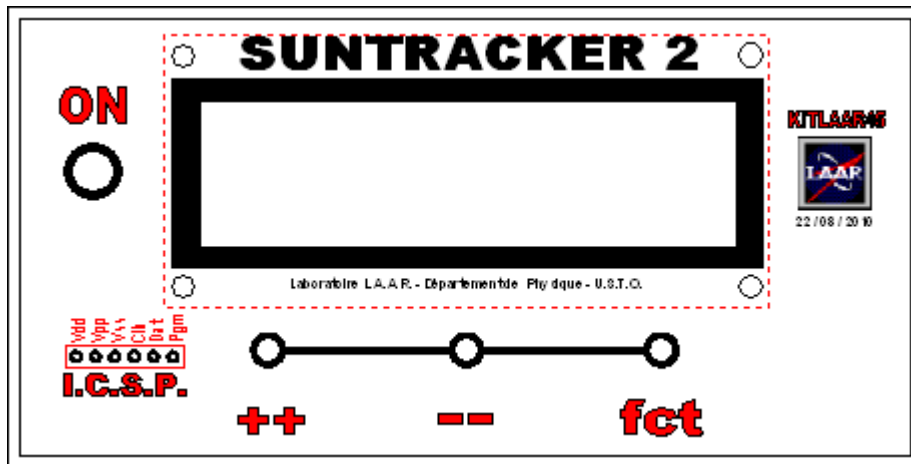


Figure IV.1 : Aperçu du dispositif réalisé.



Figure IV.2 : Aperçu du positionneur utilisé (moteur compatible DiSEqC v1.2).

## IV.2. DESCRIPTION HARDWARE :

Le synoptique suivant indique les principaux modules de ce montage: un microcontrôleur 8-bit (PIC16F628A), un module afficheur LCD 2x16 caractères, un clavier de 3 boutons poussoirs, une mémoire EEPROM externe (24LC64), un étage tampon pour le pilotage du positionneur numérique et enfin la section alimentation composée d'un régulateur série (78L05) pour alimenter le PIC, l'afficheur LCD et la mémoire EEPROM en +5V, ainsi qu'un élévateur de tension à découpage (TL497) pour alimenter le positionneur en +13V.

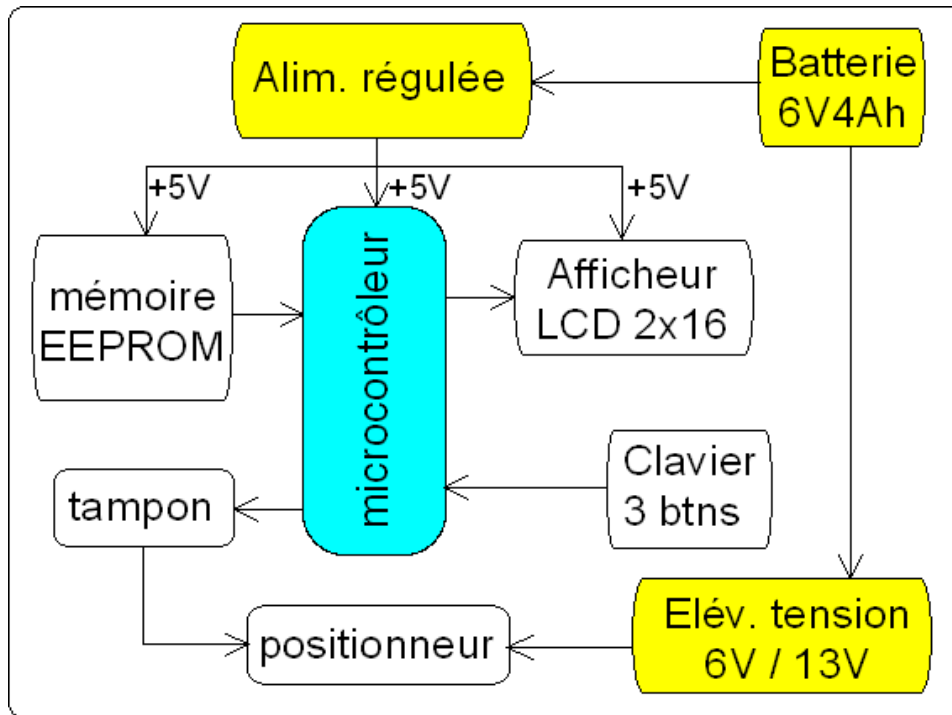
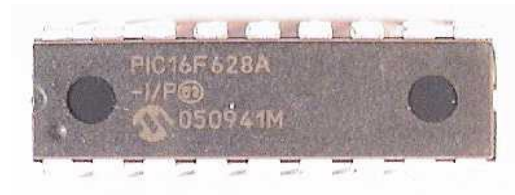
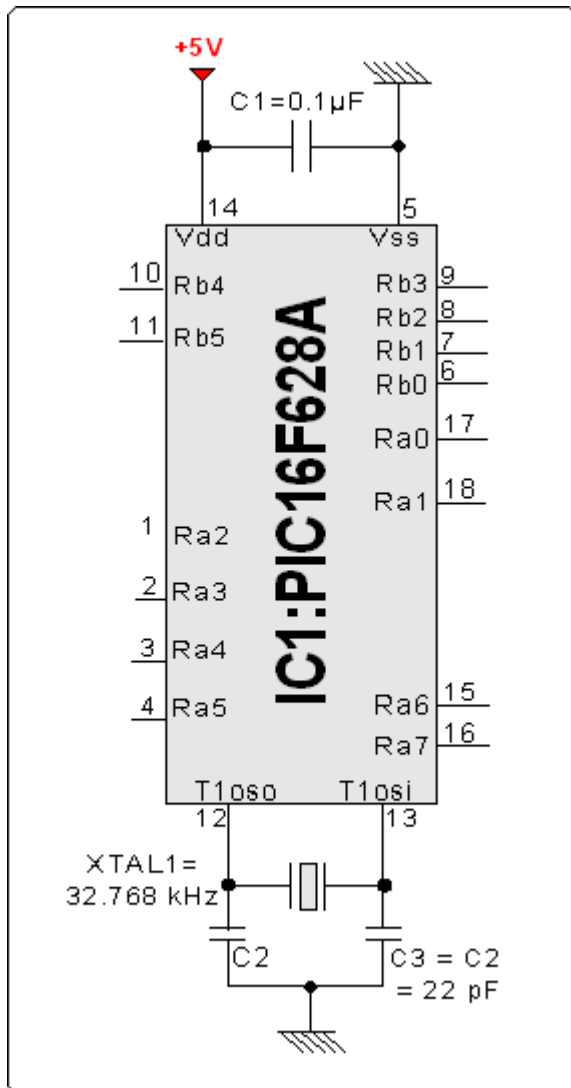


Figure IV-3 : Synoptique du montage réalisé.

### IV.2.1. Le microcontrôleur 8-bit (PIC16F628A) :

Il s'agit d'un microcontrôleur 8-bit de la gamme *mid-range* de la société américaine Microchip, devenu leader mondial dans cette catégorie de composants numériques programmables. Il est doté d'une architecture RISC, dont les performances en vitesse d'exécution et taux d'occupation mémoire sont bien meilleurs que l'ancienne architecture CISC (exemple : Motorola 68705 ou Intel 8051).

Il est alimenté par une tension de +5V. Ce choix a été plutôt imposé par la présence de l'afficheur LCD qui ne peut pas être fonctionnel en dehors d'une marge étroite autour de +5V (+/- 5%). Ce PIC16F628A est cadencé par une horloge interne de 4 MHz (1% de précision), nécessaire au fonctionnement de ce microcontrôleur (une instruction est exécutée en 1  $\mu$ s), et d'une horloge externe à quartz de 32768 Hz nécessaire au fonctionnement du module RTCC (*Real Time Clock and Calendar*)



**Figure IV-4 : Circuit du PIC16F628A, avec son quartz RTCC de 32768 Hz.**

Les principales caractéristiques du PIC 16F628A sont :

- 16 lignes d'Entrées/Sorties : 8 lignes sur le PORTA (avec possibilité sur 4 entrées de convertir sa valeur analogique en un mot numérique grâce à un double comparateurs intégrés) + 8 lignes sur le PORTB.
- Une mémoire programme contenant 2048 mots de 14 bits.
- Une mémoire RAM de données de 224 octets.
- Une mémoire EEPROM interne de 128 octets.
- Trois temporisateurs et un chien de garde.
- Un jeu d'instructions réduit de 35 instructions seulement.
- Une interface de transmission série USART
- Un oscillateur interne de 4MHz (1% de précision), ou externe pouvant aller jusqu'à 20MHz, dans ce dernier cas, il faut ajouter un quartz ou un circuit RC.
- La possibilité d'être programmé insitu (mode ICSP).
- Une programmation facile en langage Basic , C, ou en assembleur
- Un coût faible à l'unité.

IV.2.2. Le module afficheur LCD 2x16 caractères :

Un module afficheur LCD 2x16 caractères [2] nécessite au minimum 10 lignes I/O (entrées/sorties) de la part du PIC, en mode 8-bit, ou seulement 6 lignes I/O en mode 4-bit. Ce dernier mode a été donc choisi pour minimiser le nombre de lignes I/O.

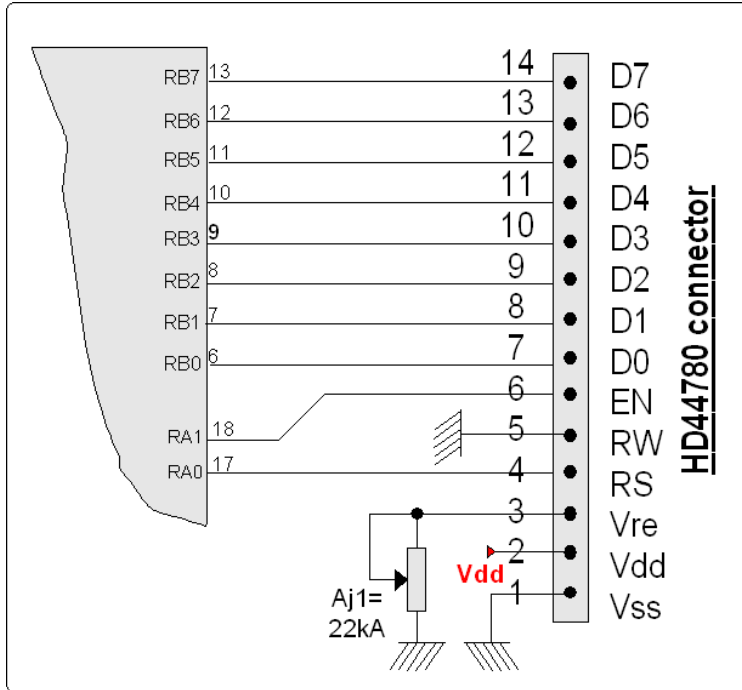


Figure IV-5 : module afficheur LCD en mode 8-bit classique.

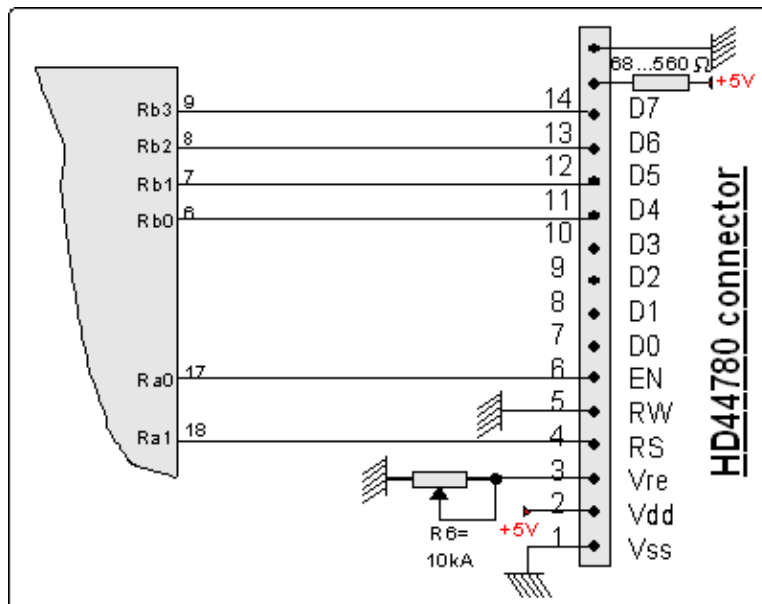
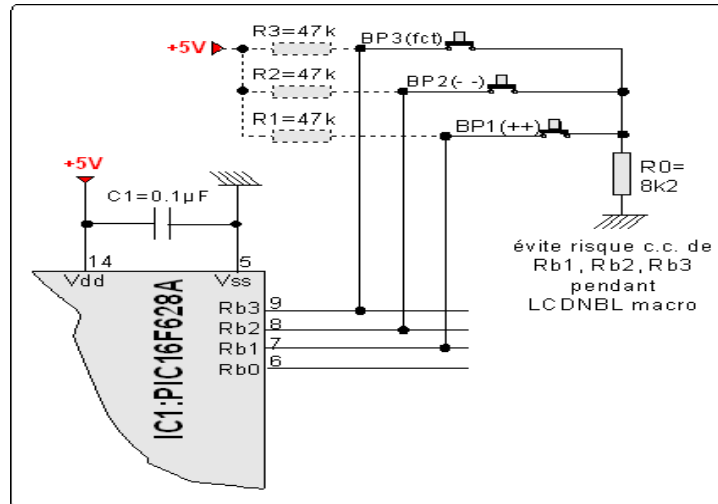


Figure IV-6 : module afficheur LCD en mode 4-bit classique.

**IV.2.3. Le clavier de 3 boutons poussoirs :**

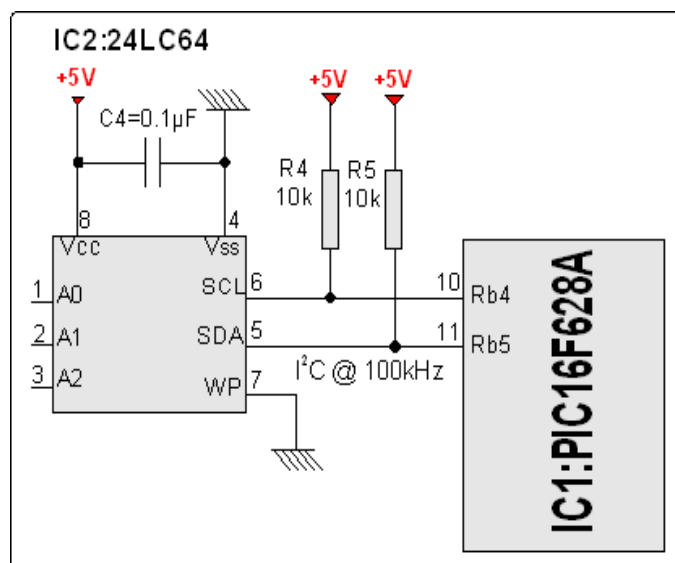
Le clavier rudimentaire est composé de trois mini boutons poussoirs seulement : un pour incrémenter, un pour décrémenter, et un pour passer à la fonction suivante. Ce minimum indispensable a été dicté essentiellement pour le réglage de l'horloge-calendrier RTCC (*Real Time Clock and Calendar*) ; ce programme supplémentaire a été rajouté pour des impératifs de consultation quotidienne (durant une année) de la position du Soleil en azimuth et élévation.



**Figure IV-7 : Clavier de 3 mini boutons poussoirs.**

**IV.2.4. La mémoire EEPROM externe 24LC64 :**

Le tableau de stockage de la position du Soleil (azimuth et élévation) a été relevée toute les 12 minutes pour toute une année, sur un tableur (EXCEL), et nécessite une capacité mémoire de 1 Ko, et donc, une 24LC08 aurait suffit dans ce montage. La 24LC64 [3,4] de 8 Ko (donc surdimensionnée) n'a été choisi que pour des raisons de disponibilités. Cette mémoire, présentée dans un boîtier DIP 8 pattes, est connectée au PIC avec seulement 2 lignes, suivant le protocole I<sup>2</sup>C, standard de communication entre circuits intégrés numériques imposé par la société PHILIPS. Les 2 résistances R4 et R5 fixent la fréquence de ce protocole (100 kHz si R4=R5=10k, ou 400 kHz si R4=R5=2k). Enfin, Cette mémoire peut être alimentée par une gamme de tension continue assez large, allant de +2.5V à +5.5V.



**Figure IV-8 : Circuiterie pour la mémoire EEPROM externe.**

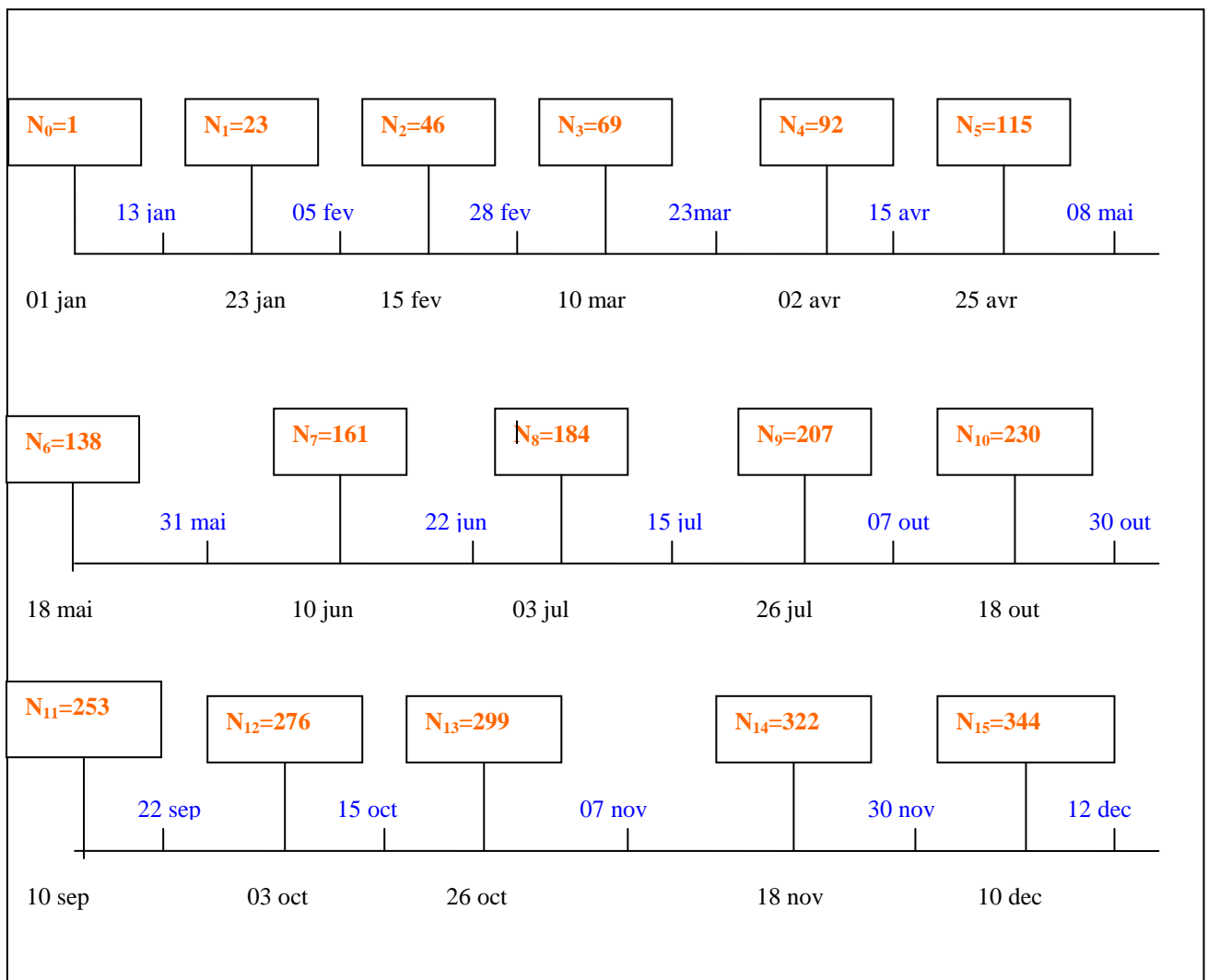
**Principe de calcul des angles (a et h) dans EXCEL :**

Les valeurs des angles a et h sont calculées pour les 16 dates clés suivantes :  
 13 Janvier, 05 Février, 28 Février, 23 Mars, 15 Avril, 08 Mai, 13 Mai, 22 Juin, 15 Juillet,  
 07 Août, 30 Août, 22 Septembre, 15 Octobre, 07 Novembre, 30 Novembre, 21 Décembre

Pour un numéro de jour N donné, les valeurs de AZ et EL seront extraites de la façon suivante : Si  $N_i \leq N < N_{i+1} \rightarrow$  lecture du tableau de la date clé qui correspond.

*Exemple : N=10 (10<sup>ème</sup> jour de l'année)*

$N_0 \leq N < N_1 \rightarrow$  Donc, lecture du tableau 13 janvier,  
 pour extraire AZ = a, et EL = h , selon la tranche horaire, entre 06h00 et 18h00 GMT



**Figure IV-9 : Représentation des dates-clés durant une année.**

Pour chaque date clé, on doit réserver 62 octets : 1 pour AZ et 1 pour EL à 06:00 GMT, suivi par 60 valeurs d'écart successifs (écart pour AZ, codé 4 bits et de même pour EL). En effet, de 06H00 GMT à 18H00 GMT, subdivisé par tranches de durée 12 minutes, cela nécessite 61 valeurs.

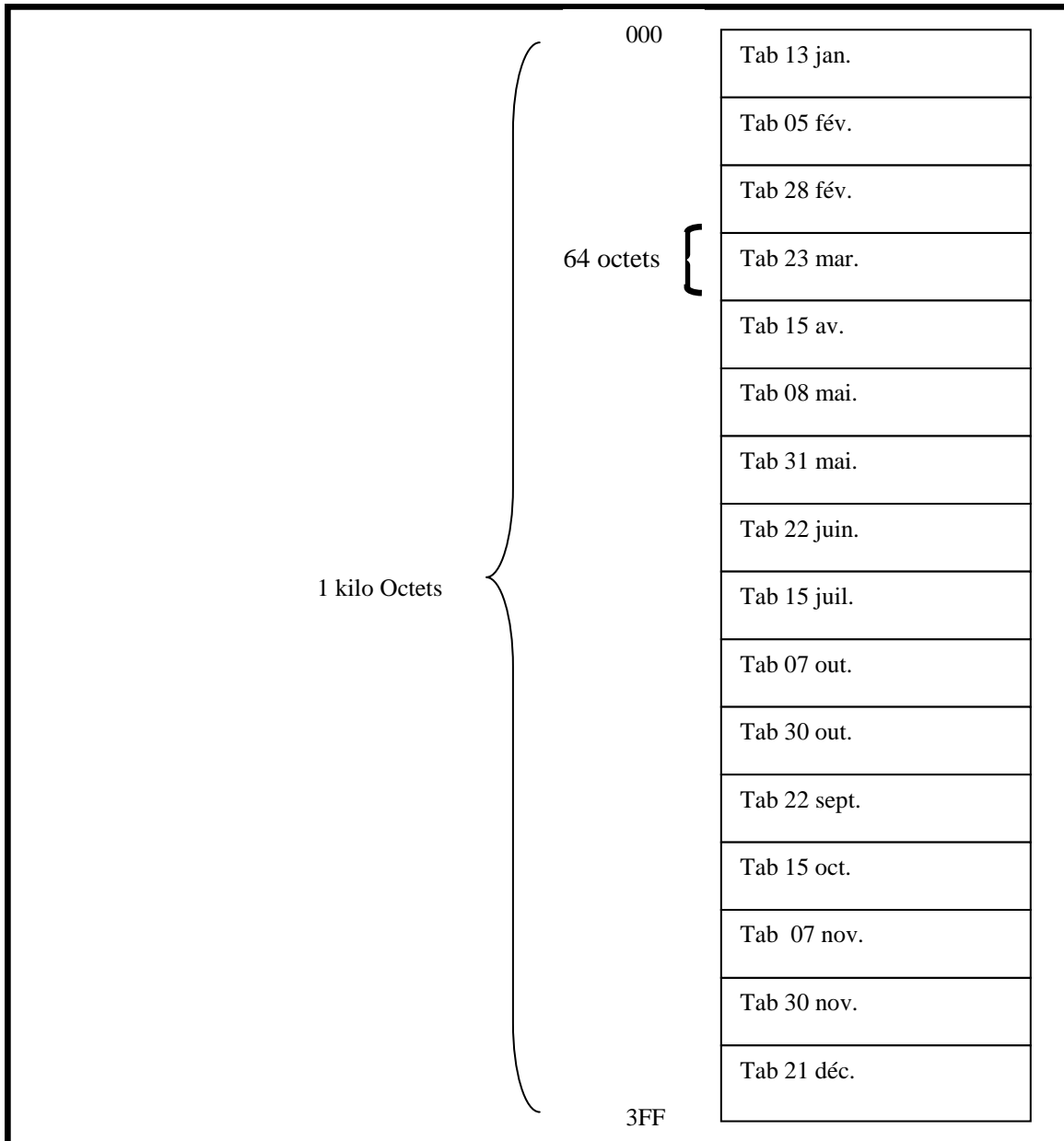


Figure IV-10 : Stockage des 16 tableaux dans la mémoire externe 24LC64.

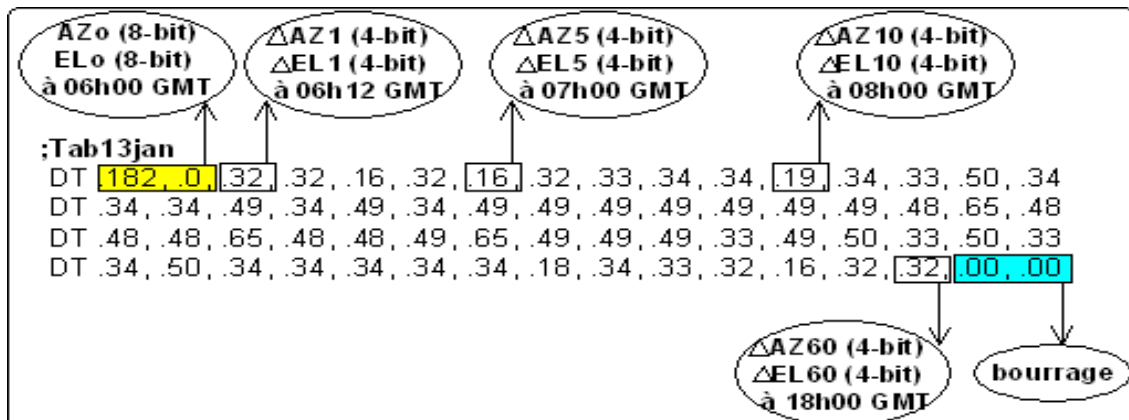


Figure IV-11 : Exemple de codage pour la table date-clé du 13 Janvier :



### IV.2.5. L'étage tampon pilote du moteur positionneur :

Cet étage permet le pilotage du positionneur numérique, à travers un transistor bipolaire tampon, qui permet de translater le niveau de tension de sortie du PIC (limité à +5V) vers un niveau de tension requis par ce moteur (+13V si le mode lent est utilisé, ou +18V si le mode rapide est utilisé). Le PIC génère la fréquence de 22 kHz grâce à la routine assembleur *emit22kHz* dans laquelle est calculé avec précision la durée ON de l'état haut et la durée OFF de l'état bas d'une période T : (ON=23  $\mu$ s, OFF=22  $\mu$ s, T=45  $\mu$ s). Les messages compatibles DiSEqC v1.2 ont été extraits du document [5] [6] [7] [8] d'EUTELSAT.

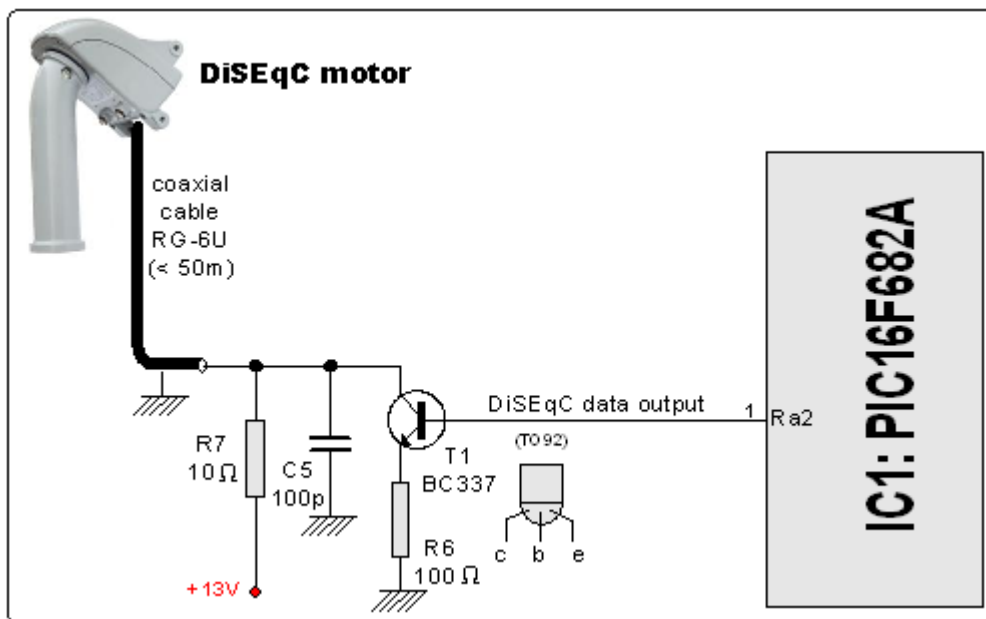


Figure IV-12 : Circuit tampon pour le pilotage du positionneur numérique.

### IV.2.6. La section alimentation :

La section alimentation est composée :

- 1- d'un régulateur série classique 78L05 [9] (version en boîtier TO92, limitée à un courant de sortie maximum de 100 mA) chargé d'abaisser la tension délivrée par une batterie de 6V4Ah interne au montage, à une tension 5V nécessaire pour alimenter l'ensemble des circuits actifs (le microcontrôleur PIC16F628A, l'afficheur LCD 2x16 caractères et la mémoire externe 24LC64).
- 2- d'un élévateur de tension à découpage (circuit appelé *boost*) basé sur un TL497 [10] intéressant pour sa facilité de mise en œuvre (très peu de composants adjoints et une seule bobine, autour de 150  $\mu$ H, réalisable manuellement). Ce convertisseur délivre une tension de +13V (500 mA max.) requise pour le moteur positionneur.

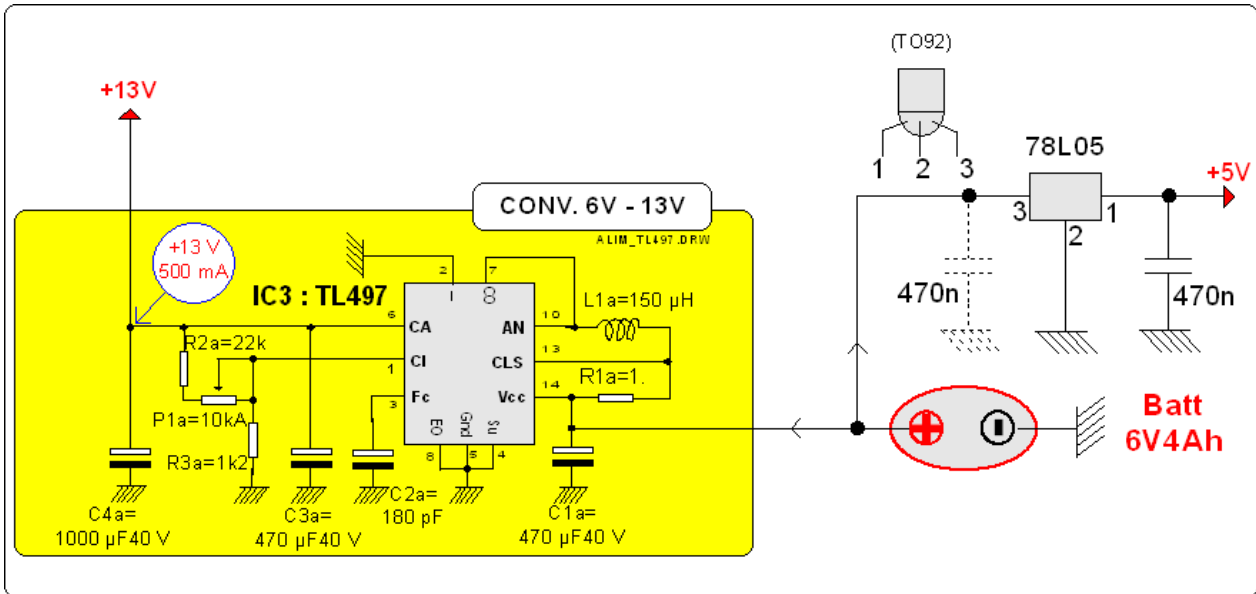


Figure IV-13 : Section alimentation.

Pour terminer cette description hardware, voici le schéma électrique complet, ainsi que le schéma du circuit imprimé.

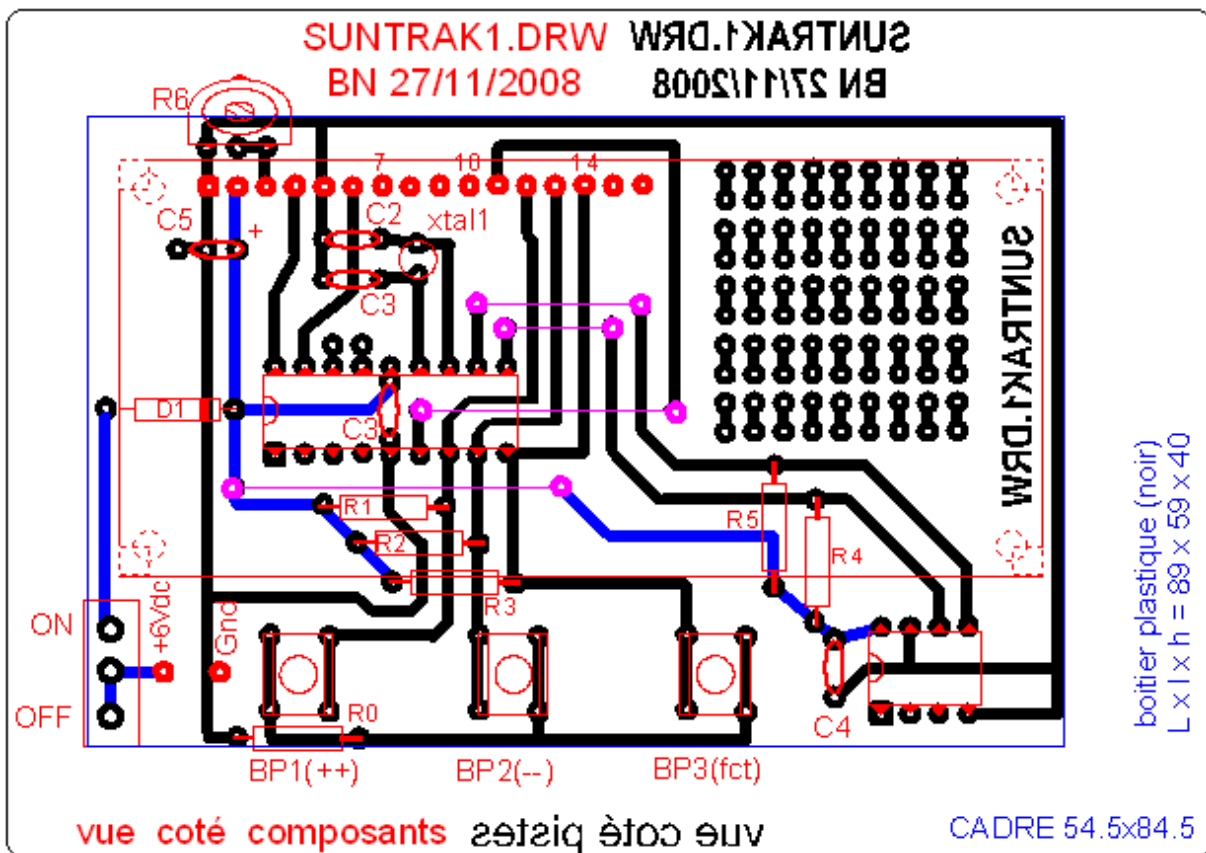


Figure IV-14 : Typon du circuit imprimé et implantation des composants.

### IV.3. DESCRIPTION FIRMWARE :

Le microcontrôleur 8-bit (PIC16F628A) a été programmé en assembleur avec MPLAB v7.52 [11] sous Windows XP, suivant une logique modulaire : un fichier principal (.ASM) et des fichiers secondaires associés (.INC).

- Fichier N°1: SUNTRK10.ASM : fichier principal.
- Fichier N°2: UTILF628.INC : routines utilitaires d'ordre général.
- Fichier N°3: IF8B16B.INC : routines des tests (IF) à variables 8-bit et 16-bit.
- Fichier N°4: LCD2x16b.INC : routines de gestion de l'afficheur LCD 2x16 caractères.
- Fichier N°5: 3BTNSLCD.INC : routines de gestion du clavier 3 boutons poussoirs.
- Fichier N°6: UPD\_AZEL.INC : routine de mise à jour de la position du Soleil (AZ, EL)
- Fichier N°7: DiSEqC12.INC : routine de gestion des messages DiSEqC v1.2
- Fichier N°8: RW1Byte3.INC : routines de lecture/écriture de la 24LC64 (par octet)
- Fichier N°9: F628i2c.INC : routines de gestion du protocole I<sup>2</sup>C

#### IV-3-1. Le fichier principal SUNTRK10.ASM :

Le 1er fichier comporte le programme principal chargé de configurer les modules internes qui seront sollicités par la suite :

- Le timer1 de 16-bit (TMR1) prévu pour gérer l'horloge et la mise à jour périodiques des valeurs (AZ, EL) indiquant la position du Soleil en temps réel.
- Le portA pour la commande de l'afficheur LCD 2x16, en mode 4-bit, et de la sortie Ra2 qui pilote le moteur positionneur à travers le transistor tampon T1.
- Le portB pour envoyer les données de l'afficheur LCD 2x16, en mode 4-bit, du clavier de 3 boutons poussoirs et des 2 sorties Rb4, Rb5 prévu pour la liaison I<sup>2</sup>C avec la mémoire EEPROM externe.

Après avoir fixé à zéro toutes les variables déclarées, ce programme principal entre dans une boucle sans fin, en attente d'une interruption périodique, déclenchée par le débordement du timer1 de 16-bit (TMR1) à chaque seconde. En effet, le PIC16F628A est cadencé par un quartz horloge de 32.768 kHz, ce timer déborde avec précision après une durée de 1s. Pour cela, on règle le prédiviseur interne de ce timer à 1:1, ce qui permet de compter jusqu'à un maximum de 2s, mais en surveillant le bit15 de ce timer1, cette durée est ramenée exactement à 1s (afin de gérer avec précision l'horloge programmée).

Ce 1<sup>er</sup> fichier comporte aussi la déclaration des constantes et variables globales, ainsi que des messages à visualiser au démarrage du dispositif, ces messages ont été stockés dans la mémoire EEPROM interne du PIC. Pour minimiser la consommation de courant du PIC, le module double comparateur interne a été désactivé en permanence.

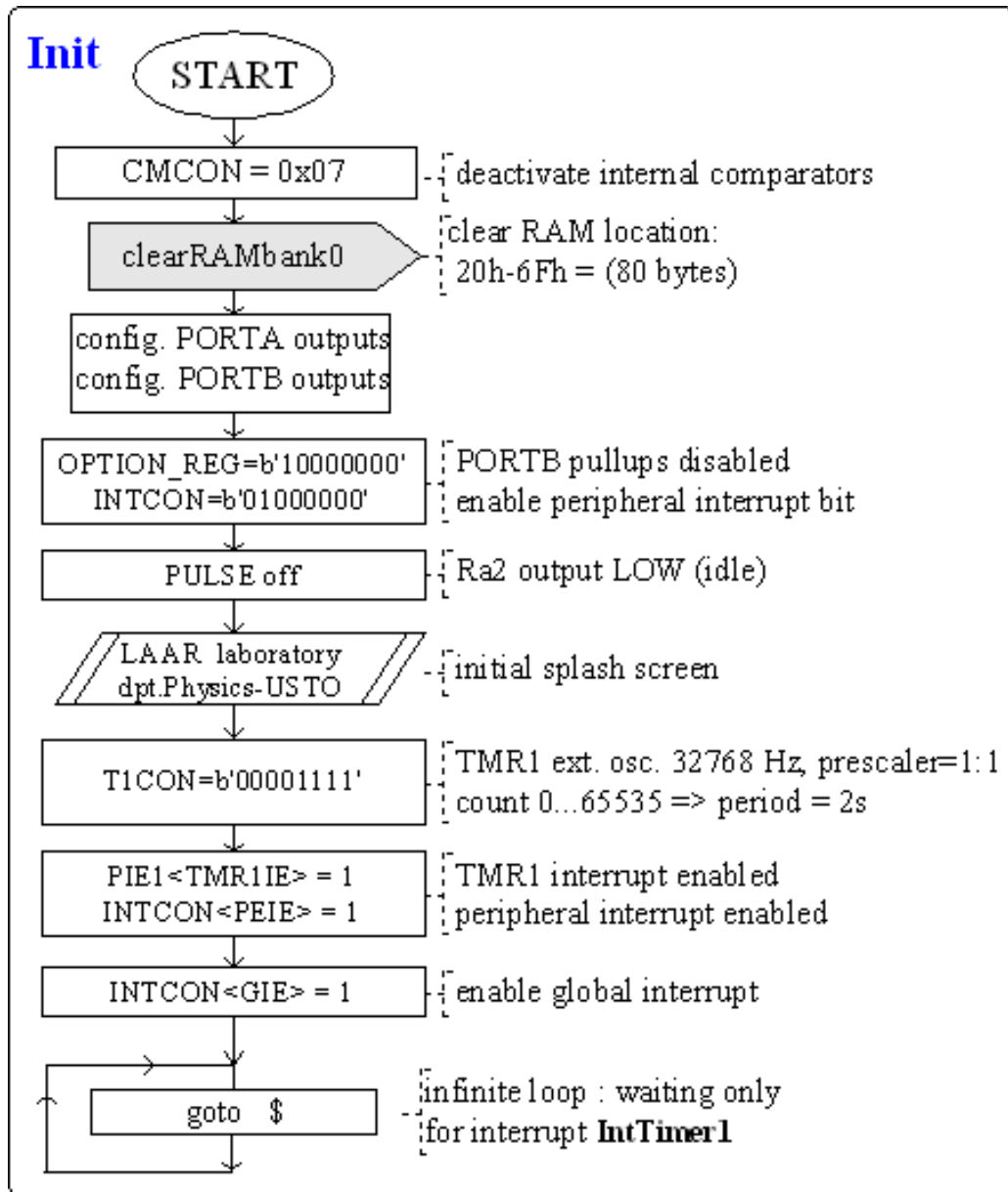


Figure IV-15 : Organigramme du programme principal.

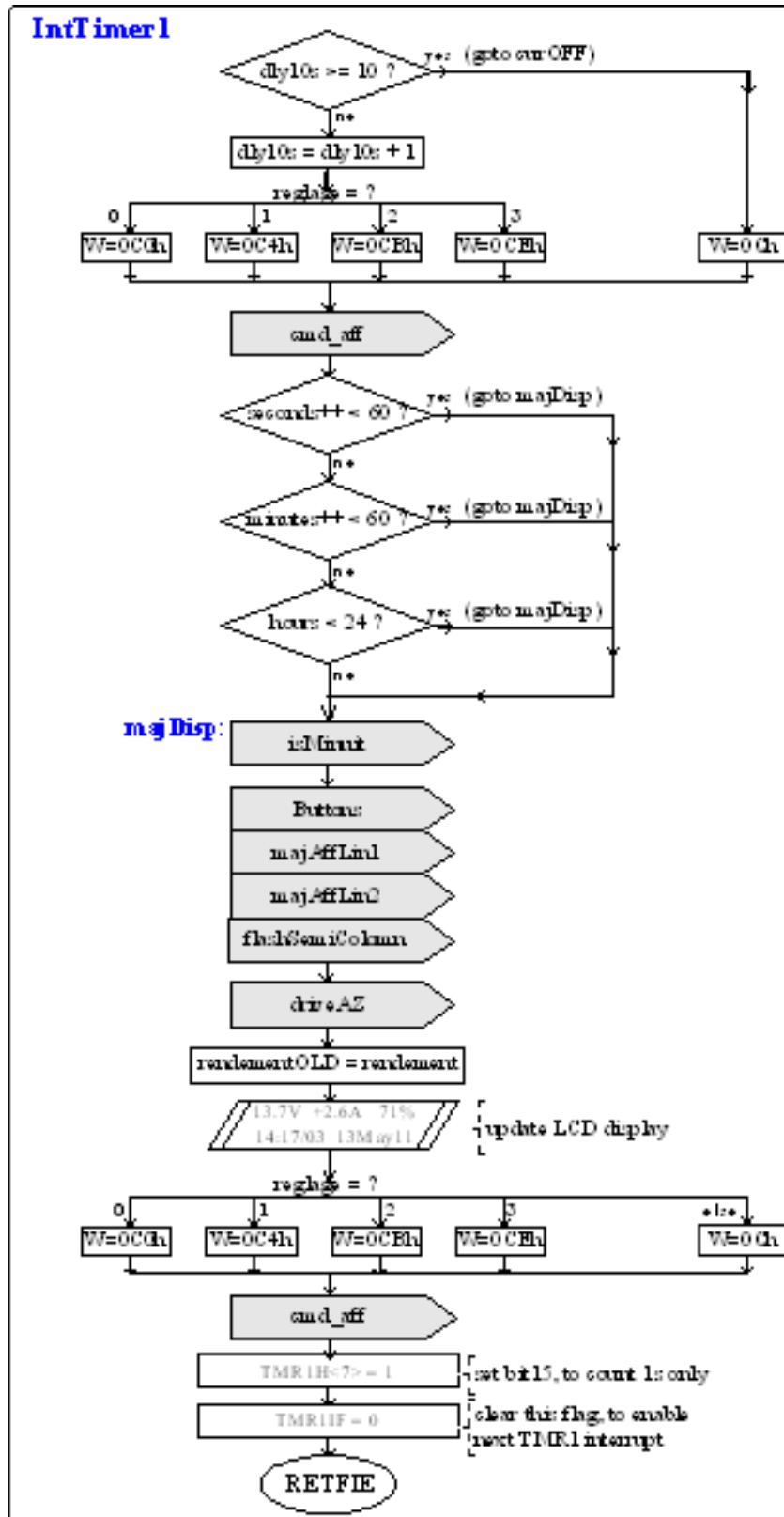


Figure IV-16 : Traitement de l'interruption périodique TMR1

**IV.3.2. Le fichier secondaire UTILF628.INC :**

Ce fichier, d'ordre utilitaire particulier au PIC16F628A (ainsi qu'aux autres PIC de la gamme 8-bit *mid-range*), comporte les macros et routines suivantes :

**BANK0:** macro, pour le passage en banque 0

**BANK1:** macro, pour le passage en banque 1

**MOVL:** macro, pour simplifier l'écriture d'affectation d'une constante à une variable 8-bit

**READLUT:** macro, pour simplifier l'écriture de la consultation d'une donnée dans une table

**CONVERT2BIN :** macro, conversion de 2 digits en valeur binaire 8-bit

**clearRAMbank0 :** mise à zéro des 80 + 16 octets de la RAM, en banques 0 + commune

**dIV8:** routine de dIVision 8-bit : tmp2 (8bit) / tmp1 (8bit) = quotient8b , reste8b

**rdEEPROM:** routine de lecture de l'EEPROM interne (128 octets pour un PIC16F628A)

**IV.3.3. Le fichier secondaire IF8B16B.INC :**

Dans ce fichier (version 1), on a réuni tous les cas possibles du test IF en comparant une variable à une constante, ou une variable à une autre variable, en considérant les cas 8-bit et 16-bit :

```

;-----
; if (file == 0) goto jmpOk ;
SIregNUL macro file, jmpOk
;-----
; if (file <> 0) goto jmpOk ;
SIregNOTNUL macro file, jmpOk
;-----
; if (file == val) goto jmpOk ;
SIregEQval8b macro file, cst, jmpOk
;-----
; if (file <> val) goto jmpOk ;
SIregNEval8b macro file, val, jmpOk
;-----
; if (file >= val) goto jmpOk ;
SIregGEval8b macro file, val, jmpOk
;-----
; if (file < val) goto jmpOk ;
SIregLTval8b macro file, val, jmpOk
;-----
; if (regA < regB) goto jmpOk ;
SIregALTregb8b macro regA, regB, jmpOk
;-----
; if ((file1 == val1) && (file2 == val2)) goto jmpOk ; else goto jmpNo ;
SIregEQval16b macro file1, val1, file2, val2, jmpOk, jmpNo
;-----
; if (fileHI < Nhi) goto jmpOk ;
; if (Nhi < fileHI) goto jmpNo ;
; if (Nlo >= fileLO) goto jmpOk ; else goto jmpNo ;
SIregaGeregb16b macro Nhi, fileHI, Nlo, fileLO, jmpOk, jmpNo
;-----

```

**IV.3.4. Le fichier secondaire LCD2x16b.INC :**

Ce fichier pilote le module afficheur LCD 2x16 caractères, en mode 4-bit :

- les sorties Rb0,Rb1,Rb2,Rb3 envoient des données 4-bit aux entrées D4,D5,D6,D7
- la sortie Ra0 pilote directement l'entrée EN (front haut-bas => écriture dans LCD)
- la sortie Ra1 pilote directement l'entrée RS (RS=0 => cmd ; RS=1 =>data)

```

;-----
; macro to move cursor to a gIVen column (Line 1)
CURSOR_L1Cx macro colonne
;-----
; macro to move cursor to a gIVen column (Line 2)
CURSOR_L2Cx macro colonne
;-----
; macro to display a digit
LCDDGT macro digit
;-----
; macro to display a character
LCDCAR macro caract
;-----
; macro to use DelayXs ; value = 1,2,...,255 s ; value = 0 for 256 s
DELAYxS macro value
;-----
; routine to write a nibble into LCD D7,D6,D5,D4, connected to RB3,RB2,RB1,RB0
LCDNBL
;-----
; routine to display a text, up to 16 char, from internal EEPROM.
LCDTXTEE
;-----
; Delay 1 ms (XTAL1=20MHz => T=0.2us)
Delay1ms
;-----
; Delay 100 ms (XTAL1=20MHz => T=0.2us)
Delay100ms
;-----
; Delay X s, where X = 1,2,...,255
DelayXs
;-----
; init_aff: config. mode 4 bits + config. curseur
init_aff
;-----
; clr_aff: efface affichage + curseur en position 0,0
clr_aff
;-----
; cursorON: show cursor
cursorON
;-----
; cmd_aff: envoi d'un octet de commande
; car_aff: envoi d'un octet de donnee
car_aff
;-----
cmd_aff
.....

```

```

;-----
flasing ':' each second
flashSemiColumn
;-----
; read LUT "tableau" in 0x400 and ++ (1 de 16 tranches de 64 octets)
LireTableau
;-----
; update LCD Display Line 1: meas. I battery, U battery, efficiency
majAffLin1
;-----
; update LCD Display Line 2: current time, date/rise/set/t'H & t'E
majAffLin2
;-----
; convert 16 bit value (parL,parH) to 3 separate bytes (hunds,tens,units)
SP_DIGBYTE
;-----

```

#### IV-3-5. Le fichier secondaire 3BTNSLCD.INC :

La gestion spécifique du claviers à 3 boutons poussoirs est assumé dans ce fichier.

```

;-----
; increment seconds, minutesL, minutesH, hoursL or hoursH
INC1 macro ssmmhh, maxi, jump
;-----
; decrement seconds, minutesL, minutesH, hoursL or hoursH
DEC1 macro ssmmhh, maxi, jump
;-----
; update Jmax, according to current month
majJmax
;-----
; Test pushbuttons BP1(++), BP2(--), and BP3(fct).
; Called inside IntTimer, "another way" to solve Pb of debouncing
;;; reglage=0: month ; =1: day ; =2: hour ; =3: minute
Buttons
;-----
; reconfig. I/O lines BP1 BP2 BP3 as inputs
cfgBP123in
;-----
; reconfig. I/O lines BP1 BP2 BP3 as outputs
cfgBP123Out
;-----
; 1 btn pushed => cfg. I/O lines BP1 BP2 BP3 as outputs, then clear dly10s
oneBTNpushed
;-----
; comput (jcumulLO, jcumulHI) from mois, jour, and L.U.T. TabJmax
CalculJcumul
;-----

```



**IV.3.6. Le fichier secondaire UPD\_AZEL.INC :**

Ce fichier comporte deux routines qui permet d'ajuster les adresses nécessaires pour la consultation des valeurs (AZ, EL) en tenant compte de la date courante, de l'horaire courant (compris entre 06h00 GMT et 18h00 GMT) et du codage particulier de la mémoire EEPROM externe (AZo et ELo codés en 8-bit non signés, suIVi par les écarts successifs codés en 4-bit signés).

```

;-----
; test N with (TabJlo,TabJhi)[i], beginning i=ndxTabJlohi with .16
testN
;-----
; if 6<=hours<18, then compute minutesBip = (hours - 6) * 5 + ndxTabMinutes
calMinutesBip
;-----

```

**IV.3.7. Le fichier secondaire DiSEqC12.INC :**

Ce fichier contient les routines de gestion des messages du protocole DiSEqC v1.2, établi par EUTELSAT.

```

;-----
; emit message DiSEqC => each byte followed by an odd parity bit
EMITMSGF macro framingVal, adrVal, cmdVal, dataVar
;-----
; Delay 0.5 ms precisely
Delay05ms
;-----
; emit '0' data bit
emit0
;-----
; emit '1' data bit
emit1
;-----
; emit nPulses of 22kHz (period = 45 us): pulse ON = 23 us ; pulse OFF = 22 us
emit22kHz
;-----
; emit9bits ( 1 byte + odd parity bit)
emit9bits
;-----
; drIVeAZ, called from intTimer1: prepare AZ angle to drIVe DiSEqC1.2 motor
drIVeAZ
;-----

```

**IV.3.8. Le fichier secondaire RW1Byte3.INC :**

Ce fichier comporte des routines de lecture/écriture de la 24LC64 (octet par octet). Ces routines ont été inspirées de la note d'application [4] AN974 : Interfacing I<sup>2</sup>C™ Serial EEPROM to PICmicro Microcontrollers, MICROCHIP, 2005

```
-----  
; BYTEREAD: read 1 byte at address (addrHI, addrLO)  
-----  
BYTEREAD  
-----  
;; BYTEWRITEPOLL: write 1 byte at address (addrHI, addrLO)  
-----  
BYTEWRITEPOLL  
-----  
;; ERASEPOLL: each page of 32 bytes, write FF  
-----  
ERASEPOLL
```

**IV.3.9. Le fichier secondaire F628i2c.INC :**

Ce fichier est consacré aux routines de gestion soft du protocole I<sup>2</sup>C, intéressantes pour tout microcontrôleur qui ne comporte pas un module interne gérant ce protocole. Il a été écrit, par Chris Parris, chez MICROCHIP, pour un ancien microcontrôleur, le PIC16F54, ancêtre du populaire PIC16F84. Nous l'avons ici adapté au PIC16F628A.

**IV.4. CONCLUSION :**

Le montage SUNTRACKER-2 proposé dans ce mémoire de magister se veut être d'un coût très abordable, utilisant un nombre de composants très limités, facilement disponibles et occupant un espace très restreint, afin de l'intégrer facilement dans un système photovoltaïque complet. Cependant, cette version est valide seulement pour la ville d'Oran (coordonnées enregistrées : latitude=35°37N, longitude=0°39W). Grâce à la mémoire EEPROM externe (24LC64), l'utilisateur peut envisager d'adapter ce montage pour être exploité pour d'autres villes ; il suffit dans ce cas de recalculer dans EXCEL les 16 tables comme expliquées dans le paragraphe IV.2.4.

**BIBLIOGRAPHIE :**

- [1] DS40044F, PIC16F627A/628A/648A datasheet : Flash-based, 8-bit C-MOS microcontrollers with nanoWatt technology, MICROCHIP, **2007**
- [2] Nouredine BENABADJI, Microcontroller drives LCD with just one wire, EDN, electronic design network, December 03, **2007**
- [3] DS21189D, 24AA64/24LC64 datasheet: 64K I<sup>2</sup>C<sup>TM</sup> CMOS Serial EEPROM, MICROCHIP, **2000**
- [4] DS00974A, Application Note AN974 : Interfacing I<sup>2</sup>C<sup>TM</sup> Serial EEPROM to PICmicro Microcontrollers, MICROCHIP, **2005**
- [5] DiSEqC Bus functional specification, version 4.2, EUTELSAT, February 25, **1998**
- [6] DiSEqC Positioner Application Note, version 1.0, EUTELSAT, March 15, **1998**
- [7] DiSEqC Applications Information For Using a PIC Microcontroller in DiSEqC And Simple Switcher, version 1.0, EUTELSAT, June 01, **1999**
- [8] DiSEqC Monitor : PIC listens in on satellite receiver control bus, ELEKTOR ELECTRONICS, 9 / **2006**
- [9] Voltage Regulator Data Book, (Switching, Series Pass, Shunt, Precision), pp 2-157 to 2-162, TEXAS INSTRUMENTS, **1984**
- [10] Voltage Regulator Data Book, (Switching, Series Pass, Shunt, Precision), pp 2-109 to 2-112, TEXAS INSTRUMENTS, **1984**

## **Résumé :**

Le but de ce travail est de concevoir et de réaliser un dispositif autonome de poursuite du soleil, basé, non pas sur un système asservi classique (par photorésistance ou photodiode, très sensible aux conditions météorologiques), mais sur l'algorithme SDP4 ou similaire, caractérisé par une modélisation astrophysique, utile au pointage du soleil, même sur une plateforme mobile (navires, aéronefs, etc...). Le dispositif doit répondre aux impératifs suivants :

- Utiliser un microcontrôleur PIC 8 bits high-end (PIC18F452 ou compatible) à base de temps réel RTCC.
- Programmation en langage C.
- Calcul mathématique en 32 bits, norme IEEE 754.
- Consommation de courant minimisée (alimentation par piles).
- Sortie double, azimuth et élévation, prévu pour commander, au choix :
  - a) un rotor à courant continu.
  - b) un moteur pas à pas.
  - c) un servomoteur.

## **Abstract :**

The objective of this work is to design and build an autonomous sun tracker, based not on a conventional servo system (photo-resistor or photo-diode, sensitive to weather conditions), but the algorithm SDP4 or similar, characterized by a modeling astrophysics, pointing the sun, even on a mobile platform (ships, aircraft, etc ...). The device must meet the following requirements:

- Use a PIC microcontroller high-end 8-bit (PIC18F452 or compatible) based real-time RTCC.
- Programming in C.
- 32-bit mathematical calculations, IEEE 754.
- Current consumption minimized (battery power).
- Dual Output, azimuth and elevation, set to control either:
  - a) a rotor current.
  - b) a stepper motor.
  - c) an actuator.

### CONCLUSION GENERALE

Avec une superficie de 2 381 741 Km<sup>2</sup>, l'Algérie est le pays le plus vaste du côté de la méditerranée. Les études actuelles montrent que l'Algérie offre des potentialités intéressantes, à moyen et long terme, pour investir dans de nombreux projets et programmes pour la production d'énergie électrique issue des énergies renouvelables, principalement l'énergie solaire.

En effet, l'Algérie est l'un des pays qui dispose d'un potentiel énergétique solaire très élevé. Selon les données d'ensoleillement, l'Algérie est comptée parmi les pays les plus ensoleillés au monde. C'est optimal pour l'exécution des projets solaires.

La durée d'ensoleillement du territoire national dépasse les 2 000 heures annuellement et peut atteindre les 3 900 heures (hauts plateaux et Sahara). Pendant sa trajectoire quotidienne, le soleil n'est pas suivi par le générateur photovoltaïque, perdant ainsi une quantité considérable d'énergie sauf à MIDI. Même dans un milieu très favorable, on pourrait avoir que 6 h par jour, sauf si le soleil est à la verticale du panneau solaire alors là on arrive à 10 h, ce qui améliore au maximum la production.

Plusieurs paramètres influencent l'énergie captée par les modules : le mouvement terre-soleil, la position du soleil, l'orientation de la capture, et la situation géographique. Donc c'est très important d'étudier la variation journalière, et l'enregistrer pour pouvoir entamer l'étude et la conception du suiveur (mécanique) solaire.

D'où, le montage SUNTRACKER-2 (KITLAAR45) proposé dans ce mémoire de magister se veut être d'un coût très abordable, utilisant un nombre de composants très limités, facilement disponibles et occupant un espace très restreint, afin de l'intégrer facilement dans un système complet (à base de moteur DiSEqC 1.2) de poursuite solaire, généralement prévu pour des panneaux solaires.

Le temps de réalisation, les frais et risques de transport sont très minimisés par rapport aux autres systèmes, en connaissant la flexibilité, puisqu'ils peuvent être élargis à n'importe quel moment pour répondre aux besoins croissants. C'est écologique, non polluant et surtout silencieux.

Malheureusement les systèmes raccordés au réseau sont rarement économiques, surtout parce que le coût actuel de la technologie Photovoltaïque est beaucoup plus élevé que celui de l'énergie traditionnelle (Diesel pour de petite utilisation).