

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVESITE DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE HOUARI BOUMEDIENE



FACULTE D'ÉLECTRONIQUE ET D'INFORMATIQUE

MÉMOIRE

Présenté pour l'obtention du diplôme de

MAGISTER en ÉLECTRONIQUE

SPECIALITE : RAYONNEMENT ATMOSPHERIQUE

Par :

Ahmed LAHMISSI

Thème

**MISE AU POINT D'UN SYSTEME DE MESURE DES
COMPOSANTES DU RAYONNEMENT SOLAIRE A L'AIDE
DE CAPTEURS PHOTOVOLTAÏQUES**

Soutenu publiquement le : 07/07/2005

Devant le jury suivant :

Mr : A. AISSANI

Mme : F. YUCEF ETTOUMI

Mme : A. ABABOU

Mr : A. ADANE

Professeur à l' U.S.T.H.B

Maître de conférence à l'U.S.T.H.B

Maître de conférence à l'U.S.T.H.B

Professeur à l' U.S.T.H.B

Président

Directeur de mémoire

Examinatrice

Examineur

REMERCIEMENTS

Je commence par remercier Monsieur le Professeur A.ADANE de m'avoir accueilli au sein du laboratoire Traitement d'images et Rayonnements. Je le remercie également pour sa participation au jury. Je voudrais remercier particulièrement Mme F. YUCEF ETTOUMI, qui a accepté de me proposer ce sujet et me diriger, et qui a mis à ma disposition les capteurs utilisés comme référence. Ses remarques pertinentes et ses conseils ont été très utiles pour mener à terme ce travail.

Je remercie également le président du jury ainsi les membres du jury, qui m'ont honoré, en acceptant d'examiner mon travail.

Je tiens à remercier particulièrement mon ancien promoteur en Projet de fin d'étude, Mr. ABABOU, pour m'avoir permis d'accéder au laboratoire Capteur et Instrumentation, et pour avoir mis à ma disposition quelques capteurs (pression, humidité, température) et divers composants et appareils de mesure. Ceci m'a permis d'effectuer une partie de ce travail expérimental dans de très bonnes conditions et qui m'a ouvert la voie sur les applications didactiques que pourrait trouver ce projet en météorologie, et en énergie solaire. J'exprime ma gratitude à mon professeur et co-promoteur en Projet de fin d'étude, Mr L. BENZAOUI pour son aide, en particulier pour l'installation de la maquette en extérieur et pour m'avoir aidé à effectuer convenablement les mesures sur site.

Je suis aussi reconnaissant à Monsieur le responsable de l'UDTS d'avoir bien voulu mettre à notre disposition quelques unes des cellules solaires que nous avons utilisées dans ce travail.

Je ne dois pas oublier de citer le personnel du laboratoire N°02 pour sa disponibilité et le Club « CELEC » pour son aide matérielle.

J'exprime toute mon estime à Mme BOUKHELIFA, qui a eu la gentillesse de donner quelques précieux commentaires et suggestions pour la rédaction de ce manuscrit. J'ai fortement apprécié les encouragements de Mlle L.BARAZANE, de Melle O.RAAF, ceux des membres du laboratoire Rayonnement Atmosphérique et ceux des membres du laboratoire Capteurs et Instrumentation.

Enfin, je tiens à remercier tout l'ensemble des enseignants et professeurs qui pendant toute ma formation graduée et post-graduée, m'ont transmis leur savoir et leur connaissance qui m'ont initié au monde de la recherche scientifique.

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE	1
CHAPITRE I : ETUDE GENERALE DU RAYONNEMENT SOLAIRE TERRESTRE	3
I. NOTIONS D'ASTRONOMIE TERRESTRE ET SOLAIRE	5
I.1 Description du soleil	5
I.2 Mouvement de la terre	5
I.3. Mouvement apparent du Soleil	6
I.4. Durée du jour	7
I.5. Variation de l'énergie solaire	8
II. LE RAYONNEMENT SOLAIRE ET L'ATMOSPHERE	9
II.1. Le spectre solaire extraterrestre et la constante solaire.	9
II.2. Définition de la notion « Masse d'Air »	12
II.3 Absorption et diffusion atmosphériques	13
II.3.1 Absorption atmosphérique	13
II.3.2 Diffusion atmosphérique	14
II.4 Détermination approchée des composantes du rayonnement solaire au sol	17
II.5 Durée et taux d'ensoleillement	18
III. BILAN RADIATIVE ET L'ALBEDO DE LA TERRE	19
IV. CONCLUSION	20
CHAPITRE II : CONCEPTION ÉLECTRONIQUE DU SYSTEME DE MESURE	23
I. INTRODUCTION	25
II. DESCRIPTION DES CAPTEURS SOLAIRES	26
III. CHOIX DES CAPTEURS	27
III.1 Capteur de rayonnement solaire	27
III.2 Capteur de pression atmosphérique	28
III.3 Capteur d'humidité	28
III.4 Capteur de température	28
III.5 Capteur de vitesse et de direction de vent.	29

IV. CONCEPTION DU SYSTEME DE MESURE -----	29
IV.1 Synoptique du système de mesure -----	29
IV.2 Conditionnement des différents capteurs -----	32
IV.2.1 Mesure de la température -----	32
IV.2.2 Mesure de Rayonnement solaire -----	34
IV.2.3 Mesure de la pression Atmosphérique -----	35
IV.2.4 Mesure du taux d'humidité -----	38
IV.2.5 Mesure de vitesse et de direction de vent -----	40
IV.3 Exploitation d'une Cellule solaire pour la mesure -----	41
IV.4 Gestion des mesures par microcontrôleur -----	43
 CHAPITRE III : CONCEPTION DE LA PARTIE MECANIQUE ET REALISATION	
DU SYSTEME DE MESURE-----	49
I. INTRODUCTION -----	51
II. METHODES DE MESURE DU RAYONNEMENT SOLAIRE-----	51
II.1 Mesure des composantes du rayonnement solaire-----	51
II.2 Mécanisme de poursuite du mouvement de soleil-----	52
II.3 Mesure de la durée d'insolation -----	57
III. REALISATION DES DIFFERENTES CARTES DU SYSTEME-----	57
IV. FONCTIONNEMENT GENERAL DU SYSTEME DE MESURE -----	60
IV.1 Programme de gestion du microcontrôleur -----	60
IV.2 Le programme réalisé pour l'opération d'acquisition-----	63
V. PRESENTATION DU LOGICIEL SCI_VIEW-----	66
 CHAPITRE IV : RESULTATS ET DISCUSSION -----	69
I. INTRODUCTION -----	71
II. PRESENTATION ET INTERPRETATION DES MESURES-----	71
II.1 Mesure du rayonnement solaire -----	71
II.2 Influence des autre grandeurs mesurées-----	73
III. QUALITE DES MESURES -----	75
IV. LA MESURE DU RAYONNEMENT PAR UNE CELLULE SOLAIRE -----	76
V. CONCLUSION -----	81
 CONCLUSION GÉNÉRALE -----	83
 RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES -----	85
 ANNEXES -----	91

INTRODUCTION GÉNÉRALE

A partir de l'énergie rayonnée par le soleil, notre planète intercepte *chaque dix secondes* près de 1750 milliards de Mégajoules (soit l'énergie consommée par un pays moyen en un an). Cette quantité d'énergie gigantesque, habituellement appelée « propre » est en effet, nécessaire à toute forme de vie, et est considérée comme étant la cause principale des mouvements atmosphériques. D'un autre côté, le soleil peut être vu comme premier responsable de ces phénomènes extrêmes que sont les tornades, les inondations, les sécheresses ou la désertification. En effet, les rayonnements solaires jouent un rôle fondamental dans différents domaines (exploitation d'énergie, agriculture, météorologie, ...etc.). Par conséquent, ils suscitent depuis un certain nombre d'années déjà l'intérêt des chercheurs. Ainsi, le recours aux observateurs et instrumentistes s'avère indispensable. Leur rôle consiste à fournir les mesures susceptibles de former des bases de données qui permettraient aux chercheurs d'avancer dans leurs travaux. Les résultats des mesures ne sont pas seulement nécessaires aux travaux présents, ils seront également indispensables aux futures générations des Chercheurs.

Etant donné que, l'intensité des rayonnements solaires est influencée par l'atmosphère terrestre, il serait judicieux de prendre en considération d'autres mesures supplémentaires (essentiellement : l'humidité de l'air, la pression atmosphérique, la vitesse et la direction de vent ainsi que la température) lors des observations météorologiques. Il est à noter que chacune de ces grandeurs a une influence sur les autres.

L'objectif du présent travail consiste à concevoir et construire une station de mesure « automatique » des composantes de rayonnement solaires et les grandeurs météorologiques précitées dans le but d'étudier le rayonnement solaire, comprendre son comportement et la nature des échanges énergétiques qui en résultent. Par ailleurs, une étude expérimentale sur la possibilité d'employer une cellule solaire destinée à la mesure du rayonnement solaire est prévue dans le but de faire face au coût élevé des radiomètres solaires.

Ce mémoire est subdivisé en quatre chapitres :

- Le premier est consacré principalement à introduire les concepts d'astronomie et du rayonnement solaire, ainsi, que les différentes méthodes employées pour les calculs et les mesures des composantes de ce dernier. D'un autre côté, il est destiné d'une part, à l'étude du bilan énergétique à la surface du sol, appelé aussi bilan calorifique en raison de l'infrarouge qui le domine et d'autre part, à la description des processus d'interaction qui peuvent en résulter entre les constituants de l'atmosphère et le rayonnement solaire. De plus, l'analyse du phénomène d'absorption sélective par les gaz et la diffusion de Rayleigh par les molécules et celle de Mie par les aérosols, sont présentées.
- Dans le deuxième chapitre, nous détaillons la conception électronique de la station de mesure, le choix des capteurs appropriés pour chaque grandeur à mesurer, leurs conditionnements électroniques, l'organisation des entrées/sorties par microcontrôleur, et la manière de les transférer vers un ordinateur (PC). Etant donnée que les opérations de mesures durent toute une journée (de l'aube jusqu'au coucher du soleil), ainsi, le microcontrôleur est programmé pour acquérir les mesures chaque 10 minutes durant 14 heures par jour. Cette durée est considérée suffisante même pour la journée la plus longue de l'année en Algérie.
- Le troisième chapitre fera l'objet de la réalisation, de l'installation de la station de mesure ainsi que, la description de la partie mécanique destinée à la poursuite du soleil. Nous décrivons également, les techniques de mesures utilisées en météorologie, en particulier les mesures de rayonnement solaire dans le but de connaître et déterminer les processus et les règles qui servent à la collecte des données employées en analyse climatologique. Par ailleurs, nous présentons aussi la conception d'un logiciel sous Delphi, permettant la séparation et le stockage des données reçues pour une visualisation ultérieure.
- Le quatrième chapitre est consacré aux mesures obtenues à l'aide de la station réalisée d'une part, et d'autre part, il est destiné à l'évaluation de l'impact des différentes grandeurs les unes sur les autres. Les résultats de mesure obtenues en utilisant une cellule solaire, sont par la suite analysés pour une éventuelle correction de leurs allures par rapport à celles des capteurs solaire étalons.

Enfin, une conclusion générale est établie pour décrire les avantages de notre travail et en déduire les performances qui peuvent être rapporté.

Etude générale du rayonnement solaire terrestre.

Notre travail vise la conception d'un système qui mesure plusieurs grandeurs atmosphériques, et notamment le rayonnement solaire. Ce dernier constitue la source principale de l'énergie atmosphérique, ce qui produit des transferts d'énergie entre le soleil, l'atmosphère et la surface terrestre.

Le présent chapitre est consacré à la description des échanges énergétiques et à la présentation des différents types de rayonnement d'origine solaire. A cet effet, une description astronomique des mouvements de la terre et du soleil est effectuée, suivi de l'explication des phénomènes qui se produisent lors de l'arrivée des rayonnements solaires à l'atmosphère terrestre, puis de la présentation du bilan énergétique globale de la planète terre.

I. NOTIONS D'ASTRONOMIE TERRESTRE ET SOLAIRE

I.1. Description du soleil

Le soleil est une étoile gazeuse de rayon de 1 391 000 km, environ 109 fois celui de la terre. Il est composé principalement d'hydrogène (70%) et d'hélium (25 %) qui rentrent dans des réactions thermonucléaires causant sa propre brillance lumineuse. L'angle sous lequel on voit le disque solaire est de $31' 59'' 20'''$. Quant à sa masse, elle est évaluée à $3,3 \times 10^5$ fois celle de la terre. Le soleil est entraîné à une vitesse de 250 km/s sur son orbite galactique, ce qui lui donne 220 millions d'années pour achever une révolution complète. En plus, il tourne sur lui-même (de durée 25,38 jours environ) [Wiley, 1982 ; Halimi, 1986].

Le soleil émet une grande quantité d'énergie sous forme d'ondes électromagnétiques dont la terre ne reçoit qu'une très faible partie.

I.2. Mouvement de la terre

La Terre tourne autour du Soleil sur une orbite elliptique (comme il est montré à la Figure.I-1) et sa vitesse au cours de l'année n'est pas constante. Le plan de cette ellipse est appelé l'écliptique. La distance Terre- Soleil ne varie que de $\pm 1,7\%$ par rapport à la distance moyenne qui est de 149,6 millions de km.

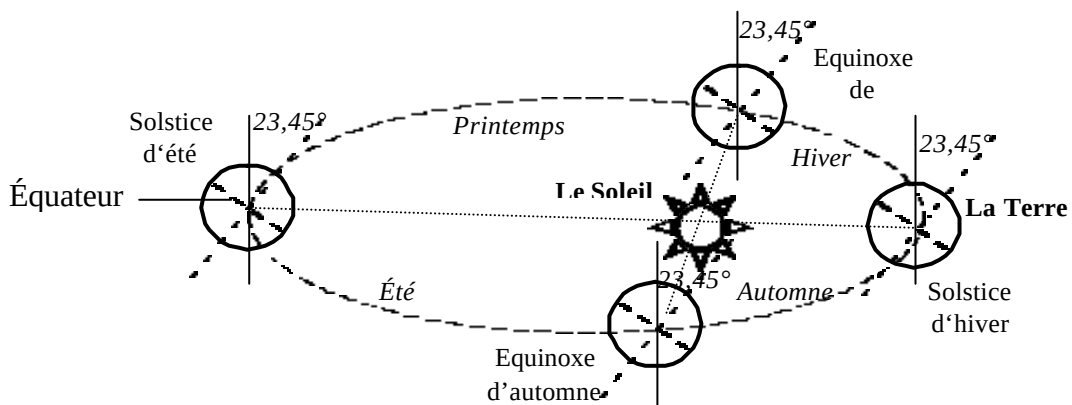


Figure.I-1 : Mouvement de la terre autour de soleil.

On appelle déclinaison ϕ l'angle formé par la direction du Soleil avec le plan équatorial. Le plan de l'écliptique est incliné de $23,45^\circ$ sur le plan de l'équateur, ce qui rend une variation de la déclinaison du soleil entre $23,45^\circ$ (21 juin) et $-23,45^\circ$ (22 décembre) en passant par 0 aux équinoxes (21 mars et 23 septembre). Ce qui explique l'inégalité des jours et des nuits pour les différents points de la surface terrestre.

La valeur de la déclinaison ϕ peut être exprimée par la relation : [Sfeir et Guarracino, 1981]

$$\phi = 23,45 \sin [0,98 (j+284)] \quad [\text{en degré}] \quad (1-1)$$

Où : j est le numéro du jour de l'année.

I.3. Mouvement apparent du Soleil

Le mouvement apparent du Soleil vu par un observateur fixe en un point de latitude L au Nord de l'équateur est représenté sur la Figure.I-2 .

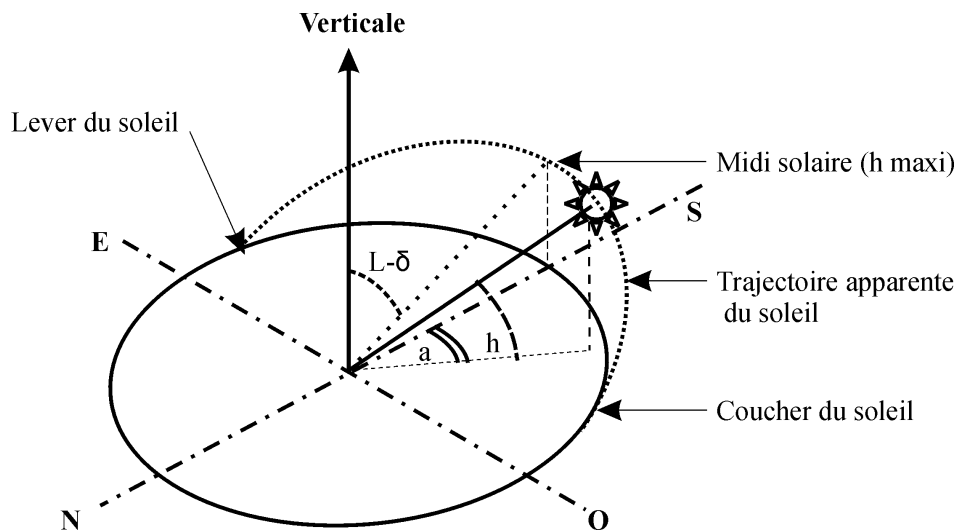


Figure.I-2 : Repérage de la position du soleil dans un point de latitude L .

Au midi solaire, l'angle que fait la direction du Soleil avec la verticale du lieu est égal à $(L - \delta)$, δ est la hauteur maximale du soleil pendant la journée. Notons que la durée du jour est de 12h aux équinoxes, elle est inférieure à 12h entre le 21 septembre et le 21 mars, supérieure à 12h entre le 21 mars et le 21 septembre.

Le repérage du Soleil s'effectue par l'intermédiaire des deux angles a et h :

- L'azimut a : c'est l'angle que fait la direction de la projection du Soleil sur le plan horizontal avec la direction Sud, cet angle étant orienté positivement vers l'Ouest.
- La hauteur du Soleil h : qui est l'angle que fait la direction du Soleil avec sa projection sur un plan horizontal.
- Ces deux angles sont fonction de :
 - La latitude L du lieu
 - La date j (numéro du jour de l'année)
 - L'heure solaire TS dans la journée.

L'heure solaire TS est définie en fixant TS = 12h lorsque la hauteur du Soleil est maximale et l'angle horaire ω est exprimé par [Sfeir et Guarracino, 1981] :

$$\omega = 15^\circ (TS-12) \quad (1-2)$$

La hauteur h du Soleil peut alors se déduire de la relation :

$$\sin(h) = \sin(L) \sin(\delta) + \cos(L) \cos(\delta) \cos(\omega) \quad (1-3)$$

Et l'azimut a par la relation :

$$\sin(a) = \frac{\cos(\delta) \sin(\omega)}{\cos(h)} \quad (1-4)$$

Pour certaines applications et pour faciliter le travail, il est souhaitable d'établir les abaques des hauteurs de soleil qui ne sont qu'une série de courbes d'égales hauteurs du soleil en fonction des dates de l'année, à l'aide des formules précitées. Des diagrammes solaires, tels que ceux présentés en annexe A1 [Sfeir et Guarracino, 1981], permettent une détermination rapide, en un lieu de latitude L donnée, des valeurs de a et h pour chaque heure (solaire) de la journée et chaque mois de l'année.

I.4. Durée du jour

Le module ω_l de l'angle horaire au lever du Soleil s'obtient en écrivant $\sin(h) = 0$ dans la formule (1-3), ce qui conduit à :

$$\cos(\omega_l) = -\tan(L) \tan(\delta) \quad (1-5)$$

Le soleil décrit toujours un arc de cercle de 15° pour chaque heure solaire. L'heure solaire au lever du Soleil a donc pour valeur :

$$(TS)_{\text{lever}} = 12 - \frac{w_l}{15} \quad (1-6)$$

L'angle horaire ω_c au coucher du Soleil est l'opposé de l'angle horaire à son lever, nous avons donc $\omega_c = -\omega_l$ et la durée du jour vaut :

$$D = 2 \frac{w_c}{15} \quad (1-7)$$

I.5. Variation de l'énergie solaire

Le soleil est la principale source de chaleur agissant directement ou indirectement sur la surface du globe terrestre. Cette chaleur est caractérisée par une variation due à plusieurs facteurs :

- ❖ La durée du soleil au dessus de l'horizon qui est en fonction de l'inclinaison du plan de l'équateur sur le plan de l'écliptique (terre- soleil). Le cercle d'illumination séparant le jour de la nuit ne passe par l'axe des pôles que deux fois par an.
- ❖ Un autre facteur, est l'angle d'incidence α que font les rayons solaires arrivant au sol (supposés parallèles vue l'importante distance soleil- terre) avec la normale, appelé aussi hauteur du soleil au-dessus de l'horizon ; cet angle est fondamental concernant l'intensité énergétique reçue par la surface terrestre suivant les latitudes (voir la Figure.I-3).

La relation (1-8), rend possible la quantification approximative de l'énergie reçue par une surface terrestre en fonction de son angle d'incidence.

$$E = S I_0 \cos \alpha \quad (1-8)$$

Avec:

E : l'énergie de rayonnement.

I_0 : l'énergie de la constante solaire (1,9 cal/mn. cm^2).

S : la surface (cm^2).

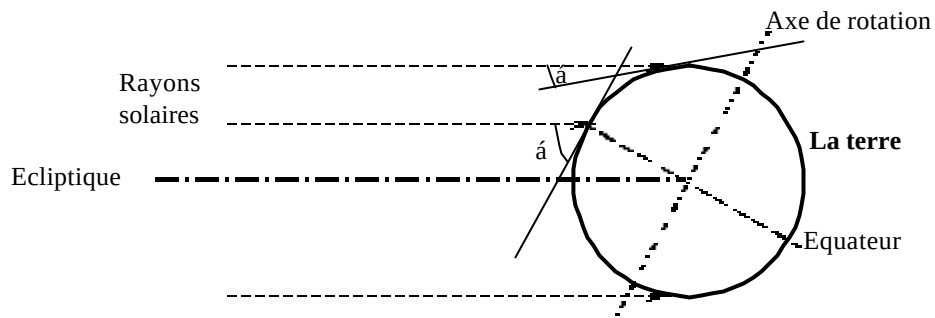


Figure.I-3 : Angle d'incidence des rayonnements solaires.

- ❖ La variation de la distance terre- soleil pendant l'année influe sur la valeur de la constante solaire. Pour plus de précision la relation suivante donne la valeur corrigée de la constante solaire [Sfeir et Guarracino, 1981] :

$$I_0 = 1353 (1 + 0,033 \cos j) \quad (1-9)$$

Les pertes énergétiques sont beaucoup plus importantes pour les rayons inclinés qui effectuent une longue traversée de l'atmosphère que pour les rayons verticaux.

II. LE RAYONNEMENT SOLAIRE ET L'ATMOSPHERE

II.1. Le spectre solaire extraterrestre et la constante solaire

Le spectre solaire est la répartition en longueur d'onde du rayonnement solaire, qui s'étend des ondes radios jusqu'aux rayons gamma. Ces rayonnements émis par le soleil ont une longueur d'onde comprise entre trois milles mètres et dix- milles milliardièmes de mètres. Mais l'énergie de ce spectre est presque totalement comprise entre 0,2 et 3 micromètres

La courbe de distribution spectrale du soleil est analogue à celle du corps noir à la température d'environ 5800K comme le montrent les Figures.I-4 et I-5. Elle présente un maximum pour la longueur d'onde $\lambda = 0,5 \mu\text{m}$. D'après la loi de Planck lorsque la température est basse, la plupart du spectre se trouve dans les infrarouges, l'objet n'émet pas de lumière visible. Lorsque la température s'élève, la couleur commence par devenir rouge, puis devient blanche (le spectre s'étale sur tout le spectre visible).

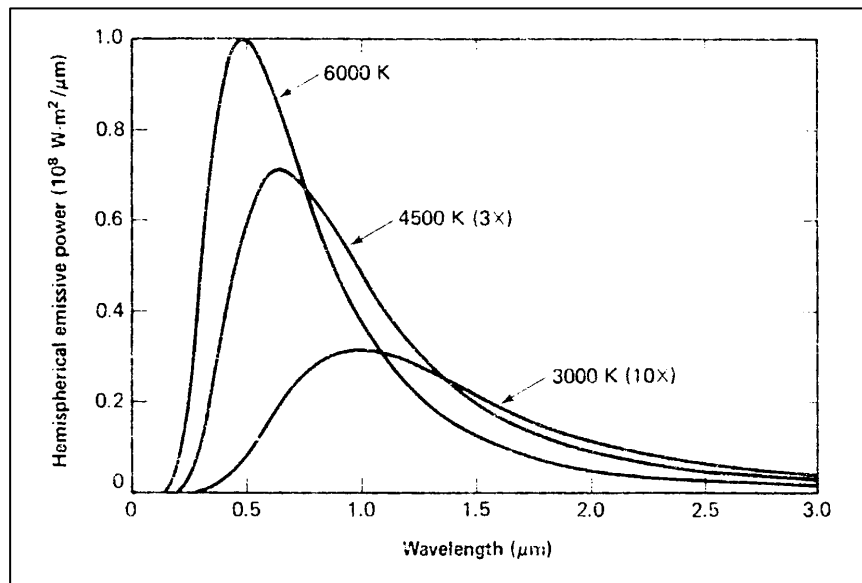


Figure.I-4 : Distribution radiatif selon la théorie du corps noir [Green, 1982].

La distribution spectrale des irradiances solaires hors l'atmosphère terrestre est souvent notifiée dans la littérature par AM0 (Air Mass Zero) qui est déterminée par différentes méthodes d'estimation et de mesure dans l'espace (voir Figure.I-5).

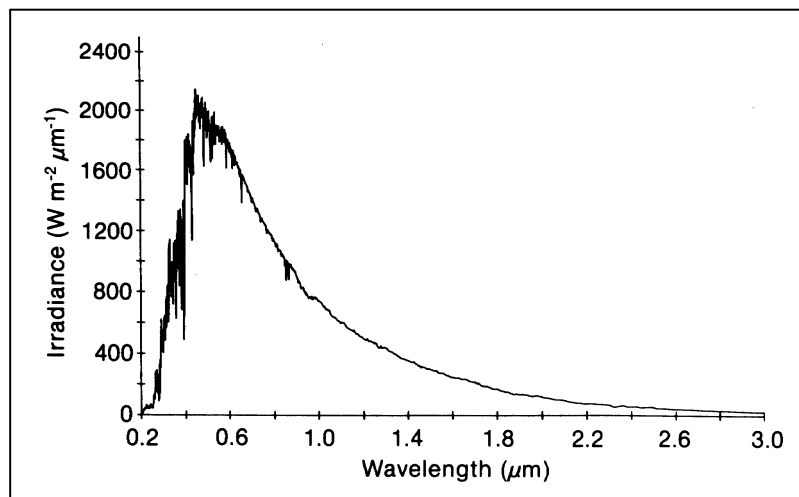


Figure.I-5 : Spectre de rayonnement solaire AM0 entre 0,2 et 3 μm [Coutts et Meakin, 1990].

L'intégrale du spectre AM0 est appelée « la constante » solaire, qui varie autour de 1353 W/m^2 . C'est l'énergie totale dans toutes les longueurs d'onde reçues par unité de temps et par unité de surface déterminée à une distance soleil – terre moyenne. Cette

irradiation n'a été mesurée de façon précise qu'aux années 1980 à 1989 par l'instrument ACRIM-1 (Active Cavity Radiometer Irradiance Monitor-1) de SMM (Solar Maximum Mission) d'une radiance moyenne de $1357,1 \text{ W/m}^2$, et de 1979 à 1993, par l'instrument ERB (Earth Radiation Budget) sur *Nimbus-7* d'une radiance moyenne de $1371,4 \text{ W/m}^2$ [Robert, 1994]. Cette constante est influée notamment par l'activité solaire (<1%) [Coutts et Meakin, 1990].

Théoriquement, on peut déterminer la constante solaire I_0 lorsqu'on considère l'angle apparent du soleil ($\theta=31'$) très petit. A une distance terre- soleil d , et en fonction du rayon du soleil R , on peut écrire :

$$\tan \frac{\theta}{2} = \frac{R}{d} \approx \frac{\theta}{2} \quad (\theta \text{ en radian}) \quad (1-10)$$

$$\phi = e \cdot S = S \cdot \sigma \cdot T^4 \quad (\text{lois de Stefan}) \quad (1-11)$$

T est la température de surface du soleil (5800 K) et S est la surface du soleil qui rayonne : c'est une sphère de rayon R , d'où :

$$S = 4\pi \cdot R^2 \quad (1-12)$$

Les équations (1-11) et (1-12) permet d'écrire :

$$\phi = 4\pi \cdot R^2 \cdot \sigma \cdot T^4 \quad (1-13)$$

A la distance d , la puissance reçue par unité de surface, c'est-à-dire l'éclairement, est :

$$E = I_0 = \frac{\phi}{S'} = \frac{4\pi \cdot R^2 \sigma T^4}{4\pi \cdot d^2} \quad (1-14)$$

Si on remplace par l'égalité (1-10), on peut écrire :

$$I_0 = \sigma T^4 \frac{\theta^2}{4} \quad (1-15)$$

$$I_0 = 5,67 \cdot 10^{-8} \times (5800)^4 \frac{(9,3 \cdot 10^{-3})^2}{4} = 1387,4 \text{ W/m}^2$$

II.2. Définition de la notion « Masse d’Air »

Cette notion consiste à déterminer l’épaisseur d’air traversée par les rayons solaires avant d’atteindre une surface terrestre. Nous appellerons ‘masse atmosphérique unité $m=1$ ’ (AM1) la masse atmosphérique à la verticale d’un lieu situé au niveau de la mer à la pression de 1000mb [Brichambaut et Perrin, 1963].

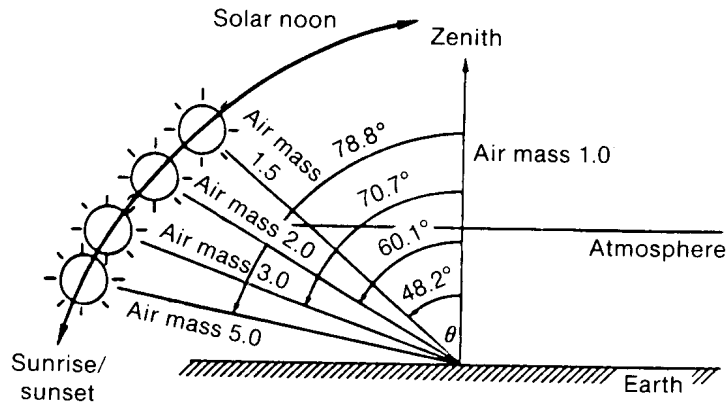


Figure.I-6 : L’ « Air Mass » dépend de l’angle de soleil avec la verticale
[Coutts et Meakin, 1990].

Si on considère l’atmosphère comme une couche plane, l’épaisseur d’air traversée est proportionnelle à l’angle des rayons avec le zénith. En fait, la courbure de la terre rend cette proportionnalité incorrecte et les angles de correspondance sont plus grands. AM1 implique que le soleil est à la verticale, c’est l’heure à laquelle la couche d’atmosphère, que la lumière traverse, est la plus mince. Un AM très grand implique que l’épaisseur d’atmosphère traversée est très importante (le matin ou le soir) comme le montre la Figure.I-6. On peut exprimer avec une bonne approximation la valeur de la masse d’air (AM) en fonction de la pression atmosphérique P et de la hauteur du soleil h (en ciel clair) :

$$AM = \frac{P}{1000} \times \frac{1}{\sin(h)} \quad ; \text{ Pour } h > 15^\circ. \quad (1-16)$$

Les valeurs réelles sont données à l’annexe A2 [Brichambaut et Perrin, 1963].

II.3 Absorption et diffusion atmosphériques

II.3.1 Absorption atmosphérique

L'atmosphère est constituée de plusieurs couches de caractéristiques différentes, on cite notamment :

- La troposphère, entre le sol et 15 km d'altitude.
- La stratosphère entre 15 et 80 km d'altitude.
- L'ionosphère entre 80 et 200 km d'altitude.

Les caractéristiques absorbantes de l'atmosphère sont déterminées par la présence de :

- CO₂ (0,03%)
- Vapeur d'eau
- Ozone O₃ située entre 10 et 30 km d'altitude.
- Aérosols : grains de sable, poussières, fumées...

Le spectre d'émission du soleil représente ce que le soleil émet, mais tous les constituants moléculaires de l'atmosphère "filtrent" eux aussi les rayonnements reçus, en effet les différentes couches de gaz qui nous entourent sont très protectrices. La Figure.I-7 montre les atténuations de spectre solaire dues aux absorptions des gaz atmosphériques.

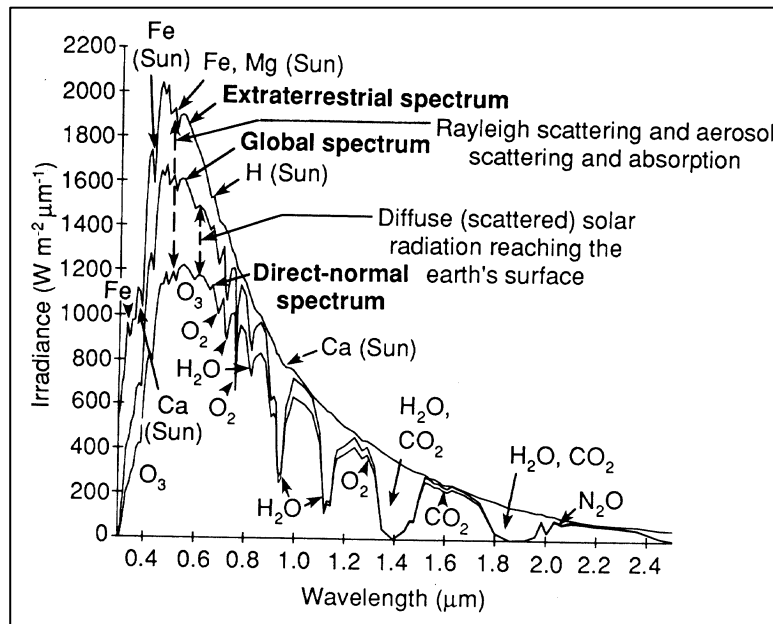


Figure.I-7 : Spectre de processus de diffusion et d'absorption dans l'atmosphère
[Coutts et Meakin, 1990].

L'ozone absorbe particulièrement les rayonnements dont les longueurs d'onde sont inférieures à 290 nm (et particulièrement les ultraviolets nocifs pour les êtres vivants).

L'oxygène présente une bande étroite d'intense absorption autour de 760 nm, c'est le bleu qui est plus diffusé dans toutes les directions.

La vapeur d'eau, le gaz carbonique et le méthane constituent les trois principaux gaz qui absorbent la majeure partie du rayonnement solaire de l'infrarouge à l'infrarouge thermique. L'annexe A3 montre l'absorption des gaz atmosphériques [Brichambaut et Perrin, 1963].

II.3.2 Diffusion atmosphérique

La diffusion atmosphérique est due à l'interaction des photons avec les molécules et les aérosols existant dans l'atmosphère. Il y a principalement deux processus de diffusion : la diffusion de Rayleigh et la diffusion de Mie.

II.3.2.1 Diffusion de Rayleigh

La diffusion Rayleigh désigne la diffusion de la lumière solaire par les atomes ou molécules de l'atmosphère dont la taille est très inférieure à celle de la longueur d'onde.

En l'absence de radiation, le nuage électronique est centré sur le noyau. Mais en présence de radiation, le nuage électronique est déformé et son barycentre (centre de gravité) ne coïncide plus avec le noyau. Dans ces conditions, il y a apparition d'un dipôle électrique qui oscille proportionnellement à la distance noyau - barycentre des charges négatives.

En 1873, John William Strutt Lord Rayleigh a montré qu'un tel dipôle électrique oscillant "rayonne" un champ électromagnétique dont l'intensité de puissance I décroît selon la puissance quatre de la longueur d'onde λ . Sa direction est préférentiellement orientée en avant et en arrière par rapport au sens de propagation du rayonnement incident ($\theta = 0$).

L'intensité de la diffusion de Rayleigh est donnée par la formule suivante [Satheesh, 2003] :

$$I = \frac{I_0}{r^2} \cdot \alpha^2 \cdot \left(\frac{2p}{l} \right)^4 \cdot \frac{1 + \cos^2 \theta}{2} \quad (1-17)$$

où : α est la polarisabilité et θ est l'angle de diffusion.

Cette formule nous montre que :

- La diffusion de Rayleigh peut être négligée dans l'étude de la diffusion du rayonnement thermique émis par la Terre car ce dernier est situé dans l'infrarouge (puissance diffusée très faible.)
- La puissance n'est pas émise avec la même valeur dans toutes les directions. Dans la direction du dipôle, la puissance est même nulle, comme il est présenté sur la Figure.I-8.a.
- la puissance dépend fortement de la longueur d'onde incidente comme le montre la Figure.I-8.b.

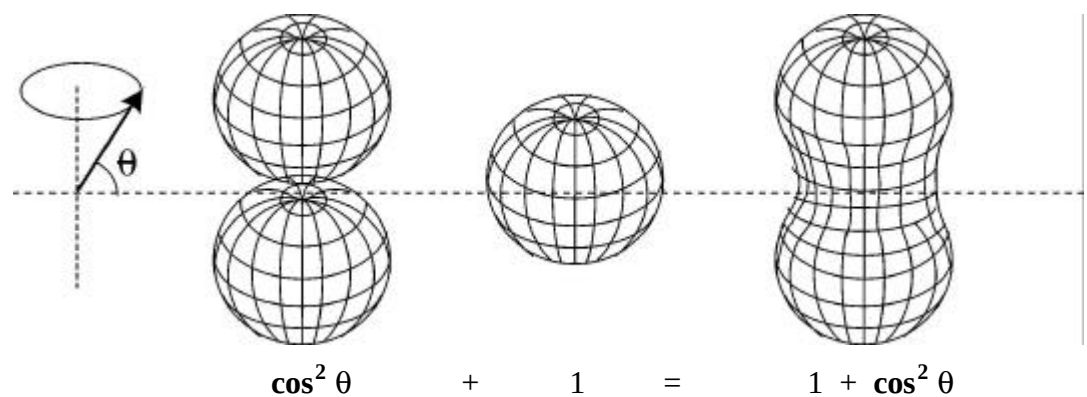


Figure.1-8 - a) Répartition de la diffusion de Rayleigh dans l'espace.

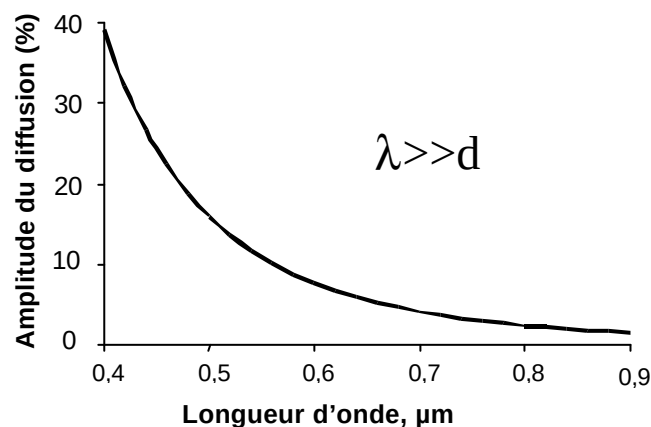


Figure.1-8 - b) Représentation de la diffusion de Rayleigh selon la longueur d'onde de rayonnement.

II.3.2.2 La diffusion de Mie

La diffusion de Mie concerne les aérosols (qui peuvent posséder un diamètre inférieur même à 0,1 micron). Elle désigne la diffusion par des particules dont le rayon r est entre 0.1 et 10 fois la longueur d'onde λ (Figure.I-9). Cette théorie est complexe et des résultats quantitatifs ne sont obtenus qu'avec des particules sphériques. On note que la puissance diffusée est maximale lorsque la longueur d'onde est proche du rayon de la particule [Cox et al, 2002].

Contrairement à la théorie de Rayleigh, la puissance rétro diffusée est plus grande que la puissance diffusée dans la direction de l'onde incidente comme le présente la Figure.I-10. On explique ainsi la couleur blanche des nuages, ils diffusent l'ensemble du spectre de la lumière blanche et pas seulement les petites longueurs d'onde [Nan et Riordan, 1990].

Les résultats montrent que les propriétés diffusantes varient rapidement en fonction de l'indice de réfraction des particules.

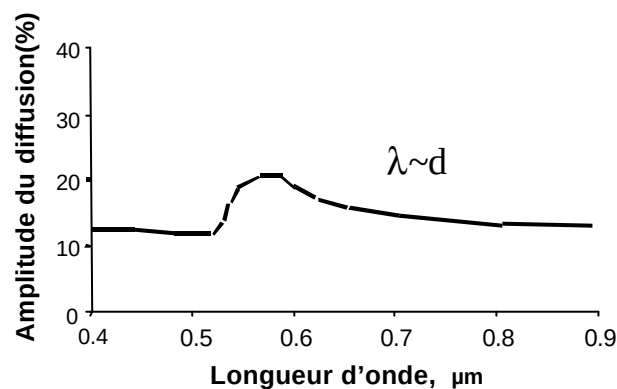


Figure.I-9 : Représentation de la diffusion de Mie selon la longueur d'onde de rayonnement.

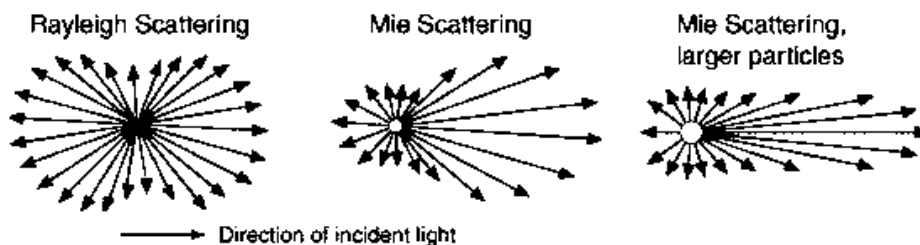


Figure.I-10 : comparaison entre la diffusion Rayleigh avec celle de Mie.

II.3.2.3 Diffusion non sélective ou isotrope

Quand le rayon des particules diffusantes est encore plus petit que celle de Mie par rapport à la longueur d'onde, la diffusion est purement isotrope, elle correspond à une répartition isotrope de l'énergie comme il est présenté sur la Figure.I-11.

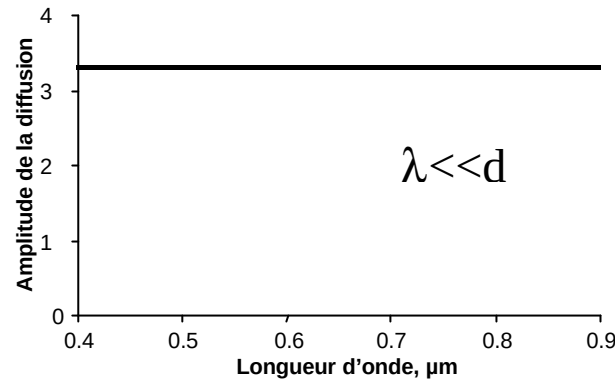


Figure.I-11 Représentation de la diffusion non sélective en fonction de la longueur d'onde de rayonnement.

II.3.2.4 Notion d'albédo

L'énergie réémise par la terre dépend de la surface (eau, végétation, roche, désert...). Le pouvoir réfléchi ρ de la surface est exprimé en %. On désigne par $\tilde{n}$ le facteur de réflexion du sol vis-à-vis du rayonnement solaire, il est appelé l'**albédo**. On trouvera ses valeurs en annexe A4 [Olivier, Notice- technique].

Cette notion est particulièrement importante dans la télédétection par satellite.

II.4 Détermination approchée des composantes du rayonnement solaire au sol

L'atmosphère ne transmet pas au sol la totalité du rayonnement solaire qu'elle reçoit : Nous distinguons trois composantes solaires dans le sol :

- **Rayonnement direct** (qui traverse l'atmosphère sans subir de modifications).
- **Rayonnement diffus** (la part du rayonnement solaire diffusé par l'atmosphère)
- **Rayonnement global**. (la somme du rayonnement direct et diffus.)

Les notations utilisées pour les composantes du rayonnement solaire sur une surface horizontale sont données dans le tableau 1.

Radiation solaire Energie reçue pendant une certaine durée $W.m^{-2}.durée^{-1}$ (kWh.m ⁻²)	Directe	S	G = S + D
	Diffusé	D	
	Globale	G	
Eclairement solaire (Radiance) Flux instantané $W.m^{-2}$	Direct	S*	G* = S* + D*
	Diffus	D*	
	Global	G*	

Tableau I-1 : Rayonnement solaire sur un plan horizontal : notations utilisées

Le rayonnement direct reçu par une surface orientée en permanence vers le Soleil et qui reçoit donc le rayonnement solaire sous une incidence normale est désigné par I . Nous désignerons par :

- I L'énergie reçue (irradiation) en $W.m^{-2}.durée^{-1}$
- I^* le flux reçu (éclairement) en $W.m^{-2}$

Nous avons la relation

$$S^* = I^* \sin(h) \quad (1-18)$$

La mesure de deux types de rayonnements permet de conclure le troisième. En appliquant la relation suivante :

$$G^* = D^* + I^* \times \sin(h) \quad (1-19)$$

II.5- Durée et taux d'ensoleillement

On appelle durée effective d'ensoleillement ou insolation SS le temps pendant lequel le disque solaire a été visible ou durant lequel on a pu observer des ombres portées sur le sol. Elle est également définie comme la durée pendant laquelle le rayonnement direct est demeuré supérieur à une valeur internationalement admise : $120 W/m^2$.

En ciel clair sans nuages, le sol reçoit le rayonnement solaire direct pendant la durée maximale d'ensoleillement SS_0 . On appelle taux d'ensoleillement ou taux d'insolation σ le rapport entre la durée effective et la durée maximale d'ensoleillement SS_0 :

$$s = \frac{SS}{SS_0} \quad (1-20)$$

III. BILAN RADIATIVE ET ALBEDO DE LA TERRE

Le terme "albédo" caractérise l'énergie réémise par la terre, et dépend de la surface (eau, végétation, roche, désert...). Le "pouvoir réfléchir", appelé (réflectance), de la surface est exprimé en %. L'albédo, proche de la réflectance, représente le rapport de l'énergie réfléchie à l'énergie incidente, pour uniquement la partie du spectre solaire allant de 0,3 à 1 μ m. L'albédo s'exprime également en pourcentage. Il s'agit donc de la fraction du rayonnement solaire global réfléchi par une surface. Le facteur $\tilde{n}$ de réflexion du sol vis-à-vis du rayonnement solaire est important dans l'étude énergétique de bilan radiative. La mesure de l'albédo est généralement obtenu par le rapport des valeurs relevées sur deux pyranomètres en position horizontale, l'un est dirigé vers le ciel, et l'autre dirigé vers le sol [Bernard et al, 1980].

Le système Terre- Atmosphère reçoit essentiellement l'énergie solaire sous forme d'un rayonnement de courtes longueurs d'onde. Il en absorbe une grande partie qui est presque intégralement transformée en un rayonnement de grandes longueurs d'onde dans l'infrarouge moyen et lointain entre 5 μ m et 80 μ m. Les énergies reçues et réémises par le système Terre- Atmosphère sont quasiment égales. Si cette condition n'était plus remplie la Terre s'échaufferait, ou se refroidirait en permanence, c'est ce qu'on appelle l'effet de serre. Le Bilan radiatif du système est, par définition, égale à la différence entre les énergies reçues et émises [olivier, Notice- technique ; Aye et al, 2003].

La température d'équilibre radiatif du système Terre- Atmosphère se calcule par la relation suivante :

$$T = \left(\frac{I_0(1 - r)}{4\epsilon\sigma} \right)^{\frac{1}{4}} = 255K = -18^\circ C \quad (1-21)$$

$\tilde{n}$: présente l'Albédo planétaire ($\tilde{n} \approx 0,3$), ϵ l'émissivité du système ($\epsilon=1$) et σ représente la constante de Stefan- Boltzmann.

Cette température sera aussi celle d'une Terre d'une atmosphère absolument transparente à tous les types de rayonnement. On justifiera l'effet de serre produit par l'atmosphère, par l'écart qui existe entre cette température et la température moyenne des températures météorologiques mesurées au sol ($\approx +15^\circ\text{C}$).

Les variations de l'albédo du sol, de la constante solaire et de la transparence de l'atmosphère rendent l'équilibre radiatif jamais atteint. La puissance interceptée par le système Terre- Atmosphère est égale ($I_0 \pi r^2$) et l'énergie solaire moyenne qui arrive sur l'unité de surface à l'extérieur de toute l'atmosphère terrestre est :

$$\frac{I_0 \cdot \pi \cdot r^2}{4 \cdot \pi \cdot r^2} \approx 342 \text{ W / m}^2 \quad (1-22)$$

r : est le rayon de l'ensemble terre plus atmosphère.

La température moyenne du sol étant égale à $+15^\circ\text{C}$, l'éclairement de ce rayonnement selon la loi de Stefan est égale à :

$$E = \sigma T^4 \approx 390 \text{ W / m}^2 \quad (1-23)$$

(Soit 114% du celui trouver précédemment).

Les 14% supplémentaires sont dus par la géothermie de la planète Terre. La Figure.I-12 montre les quantifications du la moyenne annuelle du billon radiatif.

VI. CONCLUSION

L'étude du rayonnement solaire a montré que les mesures de ce rayonnement sont effectuées à partir de trois composantes de mesure : la mesure de rayonnement direct, de celui qui est diffusé et l'ensemble de ces deux dernier (le rayonnement globale). Nous avons vu également que la température ambiante a une forte dépendance au rayonnement solaire et que l'interdépendance entre ce dernier et les constituants de l'atmosphère est complexe et leur étude n'est pas précise.

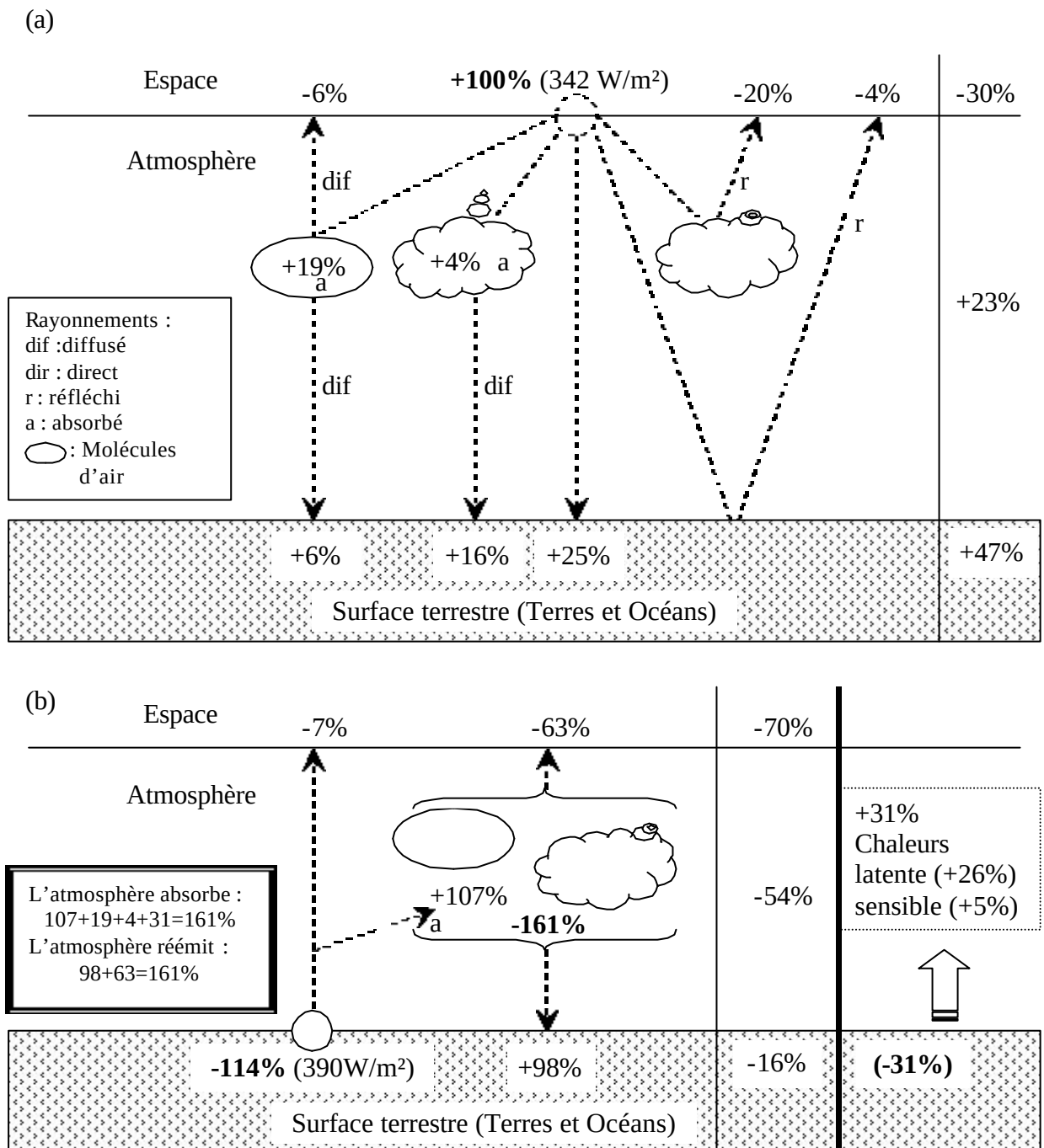


Figure.I-12 : Moyenne annuelle du Bilan énergétique de la planète Terre.

(a) : Les rayonnements d'origine solaire

(Rayonnements de courtes longueurs d'onde)

(b) : Les rayonnements d'origine tellurique

(Rayonnements de grandes longueurs d'onde)

Conception électronique du système de mesure

On a vu dans le chapitre précédent les concepts généraux liés à l'atmosphère et au rayonnement solaire. Dans ce chapitre, nous présentons notre conception du système de mesure permettant de mesurer le rayonnement solaire et plusieurs grandeurs atmosphériques, de les stocker et de permettre, par la suite, leurs utilisations ultérieures. Avant de commencer à concevoir ce système de mesure, il est important de savoir les types d'appareils de mesure qui existent déjà et leurs principes de mesure.

I. INTRODUCTION

Dans notre travail, nous nous intéressons à la mesure des composantes directe, diffuse et globale du rayonnement solaire sur une surface terrestre. Ce dernier est pratiquement (en dehors de la géothermie, dont l'effet global est négligeable) l'unique source d'énergie de la terre [Robert, 1994]. Il est aussi sensible aux variations climatiques. Il est donc évident de chercher l'influence et les interdépendances entre celui-ci et les paramètres de la météorologie terrestre. Ceci nous a amené à la mesure d'autres paramètres atmosphériques, à savoir : la pression atmosphérique, la température ambiante, l'humidité de l'air et enfin, la vitesse et la direction du vent.

Il existe un grand nombre d'appareils, aux dénominations très variées, mesurant ces différentes grandeurs: le *Pyranomètre* mesure le rayonnement solaire global, provenant du Soleil et de la totalité de la voûte céleste; et ceci pour la mesure du rayonnement solaire de courtes longueurs d'onde (0,3 à 5 μm), lorsque la mesure englobe aussi les grandes longueurs d'onde (0,3 à 100 μm) l'appellation est *Pyradiomètre*. Le *Pyrhéliomètre*, mesure le rayonnement solaire direct, provenant seulement du disque solaire. Le *Diffusionmètre* sert à mesurer tous les rayonnements solaires diffusés par l'atmosphère à l'exclusion du rayonnement direct [Brichambaut et Perrin, 1963]. Le *baromètre* indique la valeur de la pression atmosphérique, l'*humidimètre* indique le taux d'humidité en pourcent, ainsi le *thermomètre* donne la valeur du degré de température, l'*anémomètre* est utilisé pour la mesure de la vitesse du vent ainsi, la *girouette* indique sa direction.

Ces appareils doivent être : fidèles, précis, justes, et sensibles, Il faut noté qu'il n'existe pas un appareil de mesure parfait, chaque appareil a sa propre qualité et défauts surtout concernant la mesure des rayonnements qui est difficile à préciser. Certains appareils, les plus précis, sont pris comme appareils de référence pour étalonner d'autres appareils dit secondaires.

Les *Pyranomètres* à thermopile de référence utilisent des thermocouples montés en série et/ou en parallèle dont les soudures chaudes sont à la température de la surface réceptrice.(*pyranomètre* EPPLEY, et *pyranomètre* VOLOCHINE). Ces *pyranometres* coûtent extrêmement chers, et ils sont par conséquent peu utilisés.

Les *pyranomètres* secondaires utilisent d'autres techniques pour pouvoir mesurer les rayonnements solaires comme le *pyranomètre* de ROBITSZCH à bilame et le *pyranomètre* de BELLANI qui consiste à mesurer en 24 heures les niveaux différentiels de volumes de liquide distillé.

Pour la durée d'insolation, elle a été longtemps mesurée par des dispositifs à l'aide de papier photographique (*héliographe* Jordan inventé en 1888) ou bien d'un carton, de

couleur et de composition définies, sur lequel l'image du soleil, focalisée par une boule de verre, laisse des traces brunies ou carbonisées (*héliographe* Campbell inventé en 1853).

II. DESCRIPTION DES CAPTEURS SOLAIRES

La plupart des capteurs de l'énergie solaire peuvent être classés dans l'une des deux catégories : dispositifs *photoélectriques* (dit aussi capteurs quantiques) ou *bolométrique* (thermiques). Le premier groupe inclut des dispositifs contenant des éléments récepteurs dont leurs propriétés électriques changent par l'absorption des photons. On cite principalement [Brichambaut et Perrin, 1963] :

- Les photoconducteurs, constitués de semi-conducteurs homogènes d'un type N ou P, leur réponse au rayonnement n'est pas linéaire et ils sont sensibles à la température.
- Les photodiodes : Il s'agit de cellules photovoltaïques sensiblement différentes de celles utilisées pour les applications de conversion de l'énergie solaire en électricité (photopiles). En effet, leur linéarité est correcte et leur sensibilité est bonne. Leurs applications sont très nombreuses :
 - c'est le capteur photosensible du luxmètre
 - c'est l'élément de base des capteurs CCD qui constituent la zone photosensible des caméscopes et des caméras de TV.
- Les photopiles, la linéarité du débit de courant n'est bonne que pour de très faibles résistances de charge, ils sont destinés à générer de l'électricité à partir du rayonnement solaire avec un rendement énergétique maximal, ils sont pratiques et robustes, mais peu fidèles.

Bien que, ces dispositifs à semi-conducteurs soient durables, compacts, fabriqués à moindre coût, et soient d'une façon minimum affectés par des conditions atmosphériques ambiantes, ils ont, néanmoins, une certaine imperfection principale. D'abord, leur fonction de transfert n'est pas toujours linéaire; beaucoup tendent à se saturer ou se stabiliser aux niveaux d'intensité élevée. En second lieu, les dispositifs photoélectriques n'ont pas une réponse spectrale complète au-dessus du spectre solaire (certains ont une bande passante étroite). En particulier, si un dispositif est sensible seulement au spectre lumineux, évidemment, il ne détectera pas la présence et/ou le changement de l'énergie solaire infrarouge.

La deuxième catégorie inclut les dispositifs bolométriques. Ces instruments généralement absorbent le rayonnement dans un élément absorbeur noir et emploient la chaleur produite pour générer un changement de l'état du récepteur. Ce changement est mesuré et lié au niveau de l'insolation. Ils sont les meilleurs actuellement utilisés, mais leur inconvénient majeur est leur coût élevé.

Le rendement d'un pyranomètre bolométrique dépend de la température et des conditions de vent de l'environnement. En conséquence, des diagrammes de correction sont habituellement exigés quand un pyranomètre est employé dans des conditions environnementales autres que ceux pour lequel l'unité a été à l'origine calibrée. Pour protéger ces éléments, le capteur est généralement couvert d'un dôme (coupole) de verre transparent au rayonnement solaire et opaque au rayonnement thermique. L'espace intérieur est partiellement évacué.

III. CHOIX DES CAPTEURS

III.1 Capteur de rayonnement solaire

Etant donné que les capteurs bolométriques des pyranomètres sont chers et que nous visons la conception d'un système de mesure peu coûteux, nous nous sommes alors intéressés aux capteurs photoélectriques. Les photoconducteurs ne reproduisent pas la linéarité des rayonnements incidents, ils sont par conséquent utilisés, en pratique, comme des détecteurs or, pour les photodiodes et les photopiles, bien qu'elles soient basées sur le même principe, leur objectif est différent. Les photopiles fournissant de l'électricité pour une utilisation de puissance privilégient le rendement sur la plage de rayonnement la plus intense, tandis que les photodiodes sont vouées à la métrologie et ont pour objectif la linéarité de la réponse sur une plage étendue de fréquence. Cela implique donc, d'une part, des dopages différents de leur semi-conducteur et d'autre part, des revêtements superficiels différents puisque les cellules de puissance, devant absorber le maximum de rayonnement, possèdent un revêtement anti-reflet chargé de piéger le maximum de photons sur la surface, alors que les cellules métrologiques doivent avoir un revêtement de protection le plus neutre possible.

L'utilisation des photodiodes pour la mesure du rayonnement solaire est limitée à certaines intensités lumineuses, cela explique leur utilisation exclusive dans certains *héliographes* actuels où le rayonnement solaire est intercepté par une fibre optique, animée d'un mouvement de rotation, qui le conduit vers une photodiode qui sert de détecteur au seuil de 120 W/m^2 qui détermine s'il y a ou non insolation.

En particulier, et malgré leur faible fidélité, les capteurs photopiles ont une réponse spectrale qui englobe la majorité du spectre solaire et leur courant de court circuit est théoriquement linéaire aux intensités du rayonnement incident.

Par conséquent, le capteur que nous avons choisi dans notre étude est de type photopile. La société « CAMPBELL SCIENTIFIC » a développé et amélioré une photopile pour qu'elle soit convenable à la mesure du rayonnement solaire, il s'agit de la SP1110. Cette cellule possède un profil de linéarité et de sensibilité satisfaisant (moins de 1% d'erreur de

linéarité) et son coût est relativement réduit. On trouve dans l'annexe A5 les caractéristiques principales du SP1110. Ce capteur a été calibré par des Pyranomètres étalons (pour chaque 2 ans) pour permettre la mesure du rayonnement solaire global, et évidemment, elle ne sera pas utile pour mesurer d'autres types de rayonnement.

Pour les autres grandeurs météorologiques, de même, il faut choisir les capteurs les plus adéquats sur le plan de la qualité, le prix et surtout de leur disponibilité, il existe une multitude de capteurs que nous avons trouvés sur le marché et qui nous intéressent.

III.2 Capteur de pression atmosphérique

La pression est souvent convertie par une variation de résistance, par une variation de capacité ou bien par effet piézo-électrique. Nous avons opté pour le choix du capteur MPX2200AP de MOTOROLA. Ce capteur a été récemment développé et destiné à l'usage électronique pour la mesure de la pression absolue présente sur son unique entrée, il peut mesurer des pressions allant de 0 jusqu'à 200kP (0 à 2000hP), ce qui permet de couvrir largement toute la gamme de variation de la pression atmosphérique (863 à 1083hP). Il possède une grande sensibilité et une linéarité corrigée et une hystérésis de pression négligeable. Sa réponse est rapide et d'une grande stabilité. On trouve sa courbe de réponse sur l'annexe A6.

III.3 Capteur d'humidité

La mesure de l'humidité a été souvent délicate, les capteurs de cette grandeur sont généralement produits à partir de l'exploitation des caractéristiques résultantes de la variation du taux d'humidité, généralement par effet capacitif ou conducteur. L'un des inconvénients de mesure est l'hystérésis et le faible temps de réponse de ces capteurs. Le fabricant PHILIPS propose un capteur à variation de capacité pour un usage publique (référence 2322-691-90001). Il s'agit d'une feuille constituée d'un matériau isolant entouré d'une couche mince d'or, constituant ainsi un condensateur. La constante de diélectrique de l'isolant rend la capacité résultante variant linéairement avec le taux d'humidité (environ ± 20 pF autour de 122 pF) comme il est montré dans l'annexe A7. Sa sensibilité est de 0,4 pF pour 1% de taux d'humidité (HR) d'une plage de mesure raisonnable entre 10 et 90% de HR.

III.4 Capteur de température

Parmi la grande variété de capteurs de température disponibles dans le commerce, nous avons choisi les circuits à semi-conducteur, qui sont simples à mettre en œuvre et peu onéreux : le LM335 et le LM35DZ. Le premier, est un capteur facile à calibrer et qui délivre entre ses bornes une tension proportionnelle à la température absolue de son voisinage (en degré Kelvin). Sa plage de mesure est comprise entre -40°C et $+100^{\circ}\text{C}$ avec

une erreur inférieure à 1°C pour chaque 100°C. Le deuxième est une version modifiée du premier et qui donne des mesures directement en degré Celsius. Il n'exige aucun calibrage ou réglage externe à celui-ci, pour fournir des valeurs typiques exactes, d'une précision de $\pm \frac{3}{4}^{\circ}\text{C}$ sur toute sa plage de mesure (0 à +100°C).

III.5 Capteur de vitesse et de direction de vent

Les capteurs de la vitesse et de la direction du vent sont des capteurs de mouvement simple. Le principe de ces capteurs peut être optique, magnétique, génératrice de courant ...etc. Nous avons préféré utiliser ceux qui sont optiques vu leur simplicité et leur précision. L'ensemble de mesure du vent est composé, d'une part par une sorte de turbine qui fait tourner un tachymètre (compteur d'impulsion), et d'autre part, par une flèche fixée sur un axe de rotation indiquant la direction du vent, elle est associée par des capteurs de position optiques (infrarouges).

Il faut noter que les capteurs optiques sont sensibles à l'environnement: (poussière, lumière, chocs et vibrations), et doivent être protégés et régulièrement nettoyés.

IV. CONCEPTION DU SYSTEME DE MESURE

IV.1 Synoptique du système de mesure

Comme l'opération de mesure des grandeurs citées ci avant dure longtemps et à des intervalles de temps réguliers, il faut concevoir un dispositif électronique indépendant et automatique, permettant le suivi détaillé de leurs évolutions au cours de la journée.

L'enregistrement des données de mesure en électronique est facilement traité lorsque les données sont peu nombreuses et se produit relativement sur une courte durée. Mais lorsqu'il s'agit d'enregistrer une grande quantité de données et sur une longue durée de mesure, cela impose une autonomie d'enregistrement de l'appareil avant de transmettre et copier ces données vers un dispositif terminal comme l'ordinateur. Le besoin d'une mémoire d'enregistrement incorporé dans l'appareil ou bien disponible dans le voisinage immédiat est vivement souhaitable. Cette autonomie rend l'opération de mesure plus pratique et permet aussi d'éviter la mise sous tension permanente de l'ordinateur et donc d'économiser son énergie.

Cependant, nous distinguons deux sortes de capteurs, ceux qui sont de type analogique : ils ont la caractéristique de fournir des signaux qui nécessitent une amplification, parfois une soustraction et surtout une conversion analogique numérique, et ceux de type numérique, qui délivrent des impulsions, nécessitant un simple système de comptage.

Les nombreuses données obtenues par la suite, nécessitent une gestion et un contrôle des entrées, des sorties, des signaux de commande et des régularités de traitement. On peut trouver des microcontrôleurs qui répondent très bien à ces fonctions et leur puissance de traitement permet de simplifier considérablement l'électronique.

L'architecture du système de mesure, est alors construite autour d'un microcontrôleur de référence 68HC11F1 de MOTOROLA ; celui-ci possède des caractéristiques qui s'adaptent bien à notre application [Lahmissi et al, 2004]. Il constitue le bloc principal qui gère d'une manière directe toutes les opérations de contrôle nécessaires à l'acquisition, et aussi la gestion des entrées/sorties, temporisation et même la transmission des données vers l'ordinateur [Youssef Ettoumi et al, 2004]. Il dispose aussi dans ces spécifications, d'une capacité mémoire RAM intéressante de 1kOctet permettant le stockage temporaire d'une quantité importante de données avant de les transmettre [Ababou et al, 2004].

Une fois que cette chaîne de mesure est réalisée, il apparaît le besoin de l'enregistrement définitif et de l'affichage des résultats de mesure. Comme il a été mentionné, l'utilisation d'un micro-ordinateur est une excellente solution grâce à ses énormes capacités de stockage et de traitement. A cet effet, le système de mesure est subdivisé en une partie électronique essentielle suivie par un traitement par logiciel sur l'ordinateur.

Le système de mesure peut se répartir alors selon les fonctions suivantes :

- Conditionnement des capteurs de mesure.
- Gestion et contrôle de temps des mesures.
- Stockage temporaire des données.
- Transmission des données.
- Traitement, enregistrement et visualisation des mesures.

La Figure.II-1 permet de montrer les différents éléments de système et les opérations suivies avant d'atteindre la forme finale des résultats de mesure sur ordinateur.

En complément, une alimentation électrique de secours peut être mise en oeuvre pour pallier à la rupture ou la dégradation de la source d'énergie principale. Cependant, un onduleur peut être utilisé, ou bien un panneau solaire qui permet d'augmenter considérablement l'autonomie énergétique. En outre, la consommation est réduite par un choix judicieux des composants électroniques en technologie CMOS. On justifie aussi le choix des composants pour une meilleure précision. On a choisi notamment l'amplificateur faible bruit l'OP07 pour sa faible dérive et son fort gain en boucle ouverte.

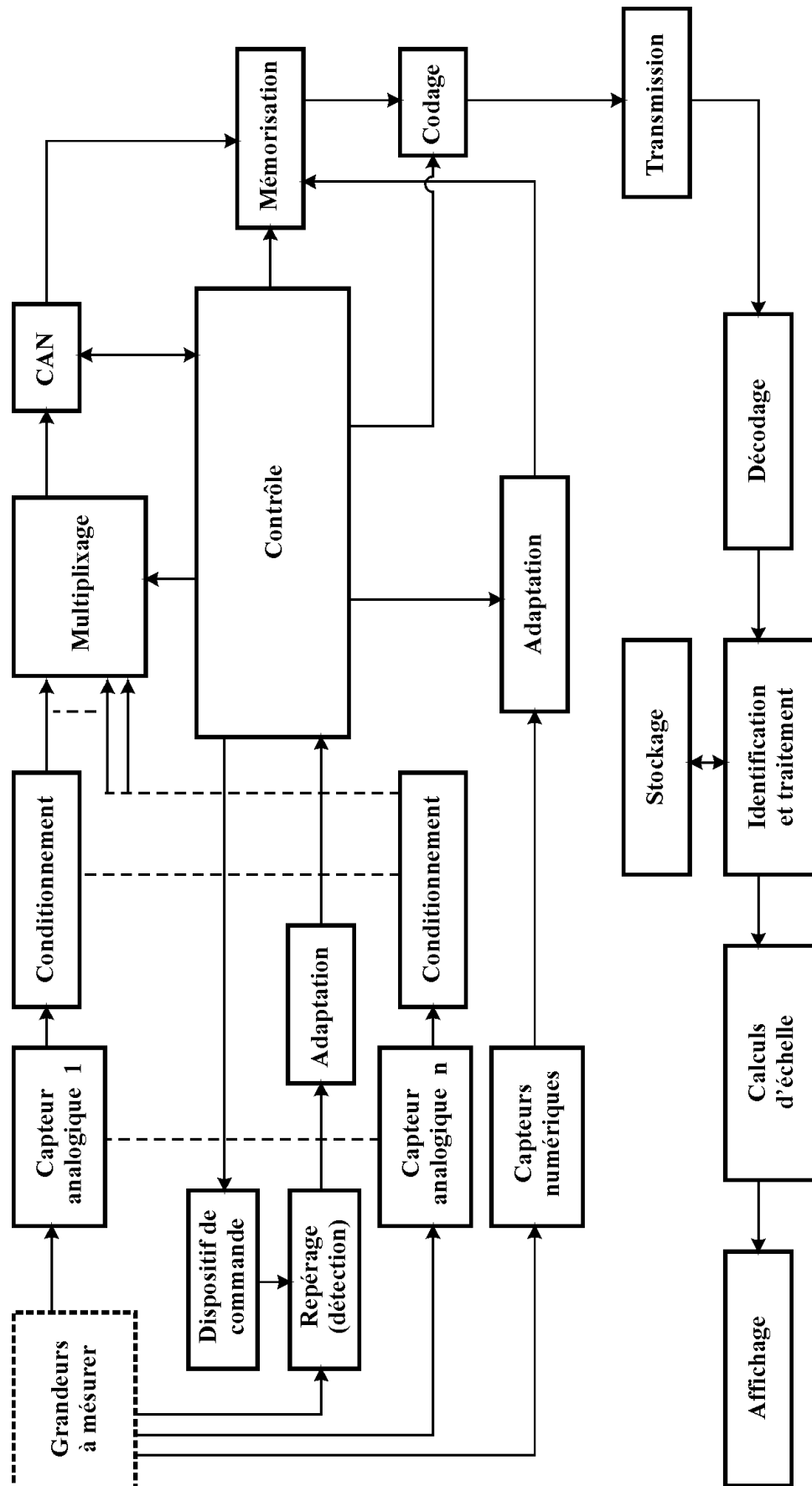


Figure II-1 : Schéma synoptique général de la chaîne de mesure.

IV.2 Conditionnement des différents capteurs

IV.2.1 Mesure de la température

Les capteurs de température choisis sont faciles à utiliser, leur linéarité permet une lecture directe de la température ambiante. En Algérie le maximum de température enregistrée à l'ombre n'atteint pas $+50^{\circ}\text{C}$ et de quelques degrés au dessous de zéro pour les températures les plus basses. Le capteur LM335 permet de mesurer la température entre -40°C et $+100^{\circ}\text{C}$. Ainsi, nous avons aussi utilisé un capteur LM35DZ pour la mesure de la température entre 0°C et $+100^{\circ}\text{C}$ et cela pour observer les variations de la température au-dessous d'une cellule solaire.

IV.2.1.1 Mesure de la température ambiante

D'après le constructeur, le LM335 délivre à sa sortie une tension de 10mV par degré Kelvin. Pour obtenir la température en degré Celsius, il suffit d'éliminer une tension $V_T = 2,632\text{V}$ de cette dernière qui correspond à $273,2^{\circ}\text{K}$ (-10°C). Nous rappelons que :

$$T(^{\circ}\text{K}) = 273,2 + T(^{\circ}\text{C}) \quad (2-1)$$

Le montage de la Figure.II-2 montre comment on peut procéder à la mesure de température en degré Celsius.

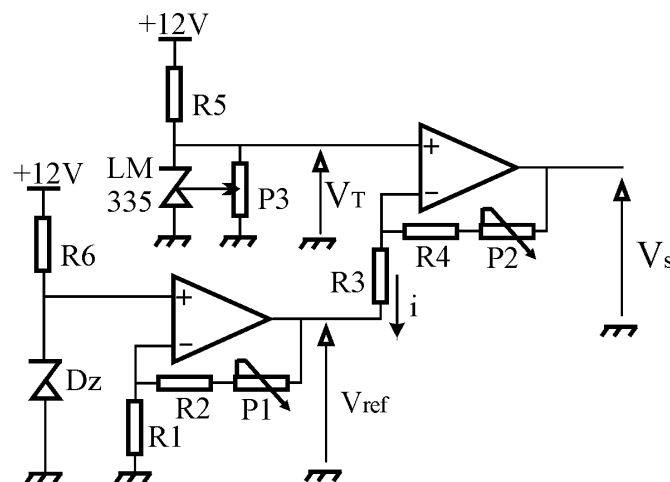


Figure.II-2 : Conditionnement de capteur LM335

Nous avons choisi une plage de mesure comprise entre -10°C et $+54^{\circ}\text{C}$ utilisant un convertisseur analogique- numérique (CAN) de 8 bits. La plage de tension correspondante va être convertie en 256 valeurs par le CAN. On remarque pourquoi nous avons décidé de prolonger le maximum de température mesurable à exactement $+54^{\circ}\text{C}$, c'est pour une

lecture de multiple de $\frac{1}{4}$ de °C. A cet effet, et pour exploiter toute la plage de la tension d'entrée du CAN qui est de 0 à +5V qui englobe toute la plage de mesure retenue (-10 à +54°C), le LM335 doit subir une amplification de gain G tel que :

$$V_s = V_T \times G \quad (2-2)$$

$$V_s = (10 + 54) \times 0,01 \times G = +5Volts \Rightarrow G = 7,81$$

Le calcul suivant conduit à ajuster une tension de +3V à Vref pour bien étalonner le montage. La tension de la sortie Vs est :

$$V_s = (R_3 + R_4 + P_2) \cdot i + V_{ref} \quad (2-3)$$

$$V_T = R_3 \cdot i + V_{ref} \quad (2-4)$$

à partir de l'équation (2-4) le courant i vaut :

$$i = \frac{(V_T - V_{ref})}{R_3} \quad (2-5)$$

On remplace l'équation (2-4) et (2-5) dans l'équation (2-3), on aura :

$$V_s = V_T + \frac{(R_4 + P_2)}{R_3} \cdot (V_T - V_{ref}) \quad (2-6)$$

Finalement, on obtient :

$$V_s = V_T \left(1 + \frac{(R_4 + P_2)}{R_3} \right) - \frac{(R_4 + P_2)}{R_3} V_{ref} \quad (2-7)$$

Si on prend Vref=0 à T= -10°C, la tension de sortie du capteur sera VT = 2,632V et la tension Vs sera alors :

$$V_s = V_T \times G = 2,632 \times 7,81 = 20,55V$$

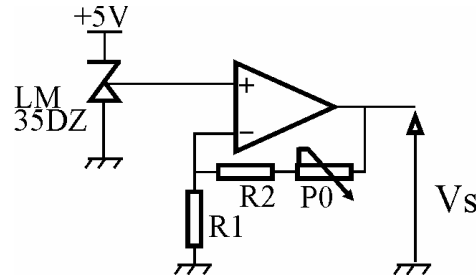
Pour rendre Vs=0 il faut donc :

$$(G - 1) \times V_{ref} = 20,55$$

Finalement :

$$\boxed{V_{ref} = +3,02V}$$

IV.2.1.2 Mesure de la température d'une cellule solaire

**Figure.II-3.** Conditionnement du capteur LM35DZ

Pour le LM35DZ nous avons utilisé le schéma de la Figure.II-3. Le gain est fixé pour lire directement des multiples de $0,5^{\circ}\text{C}$ sur toute la plage de mesure qui est de 0 à 100°C qui correspond à la plage 0 à +5V sur l'entrée du CAN.

Le gain du montage est :

$$G = \left(1 + \frac{(R2 + P0)}{R1} \right) \quad (2-8)$$

Le quantum q du CAN est :

$$q = \frac{5}{2^8} = 19,53\text{mV}$$

Le capteur délivre 5mV pour chaque $0,5^{\circ}\text{C}$, on déduit le gain d'amplification pour ce montage :

$$G = \left(1 + \frac{(R2 + P0)}{R1} \right) = \frac{q}{0,005} = 3,9$$

IV.2.2 Mesure de Rayonnement solaire

Le capteur SP1110 délivre 1mV pour chaque $100\text{W}/\text{m}^2$. L'intensité du rayonnement solaire n'atteint jamais la valeur de la constante solaire à un AM0 ($1353\text{W}/\text{m}^2$), en effet à un AM1,5 en ciel clair le maximum n'excède pas $1000\text{W}/\text{m}^2$ [Nicholas, 1999]. Dans notre cas, le maximum mesurable sera évidemment à un AM1, nous étions satisfaits par une plage de mesure entre 0 à $1280\text{W}/\text{m}^2$ pour acquérir, d'une manière simple des multiples de $5\text{W}/\text{m}^2$ pour 256 valeurs du CAN (0 à +5V). Le gain du montage est donc :

$$G = \frac{5}{1280 \times 0,01 \cdot 10^{-3}} = 390,6$$

Ce gain est appliqué pour chaque capteur SP1110, donc l'un mesure le rayonnement globale et l'autre mesure soit le diffus ou bien le direct selon notre choix. Le schéma utilisé de l'amplificateur est identique à celui présenté sur la Figure.II-3. Nous trouvons plus de détails sur ces mesures dans le chapitre qui suit.

IV.2.3 La mesure de pression atmosphérique

La pression atmosphérique varie en fonction de plusieurs paramètres notamment la température et l'altitude du lieu par rapport au niveau de la mer. Le maximum mesuré est de 1083mb (en Sibérie) et le minimum mesuré est de 863mb (à l'océan pacifique). Nous avons choisi un écart de mesure de 256 valeurs (sur 8 bits) pour une étendue de mesure entre 844 et 1100mb, celle-ci couvre toute la plage de mesure de pression atmosphérique.

Le principe de fonctionnement du capteur MPX2200AP est basé sur la piézoélectricité. Le capteur fournit une composante constante du signal de sortie qui résulte de la présence de la partie invariante de la pression atmosphérique. On note qu'il est beaucoup plus difficile de mesurer un écart de $1\mu\text{V}$ autour d'une tension voisine de 1 volt que de mesurer le même écart autour de tensions voisines du millivolt. C'est pour cette raison que la tension de sortie du capteur nécessite une soustraction de la composante continue avant d'amplifier la composante variable. Le schéma électrique est présenté sur la Figure.II-4.

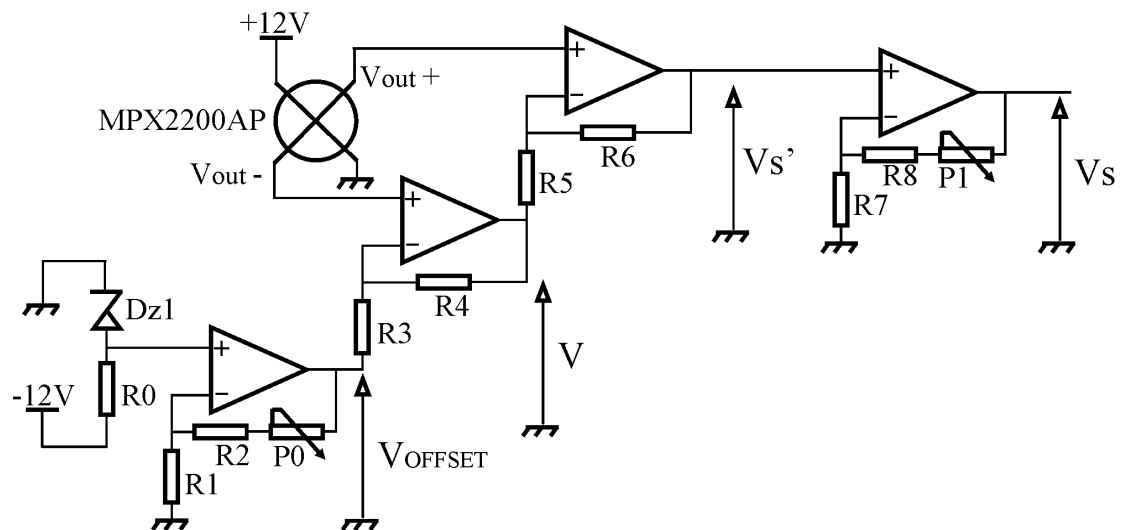


Figure.II-4 : Conditionnement de capteur de pression

Le calcul suivant conduit à ajuster une tension $V_{\text{OFFSET}} = -1,7\text{V}$ pour bien étalonner le capteur.

La tension de sortie V_s du montage est :

$$V_s = \left(1 + \frac{(R8 + P1)}{R7}\right) \times V_{s'} \quad (2-9)$$

Par analogie du résultat obtenu par l'équation (2-7) on peut écrire :

$$V_{s'} = V_{out+} \left(1 + \frac{R6}{R5}\right) - \frac{R6}{R5} \cdot V \quad (2-10)$$

et :

$$V = V_{out-} \left(1 + \frac{R4}{R3}\right) - \frac{R4}{R3} \cdot V_{OFFSET} \quad (2-11)$$

On remplace l'équation (2-11) dans (2-10), on obtient :

$$V_{s'} = V_{out+} \left(1 + \frac{R6}{R5}\right) - \frac{R6}{R5} \cdot \left[V_{out-} \left(1 + \frac{R4}{R3}\right) - \frac{R4}{R3} \cdot V_{OFFSET} \right] \quad (2-12)$$

Si on assure l'égalité suivante :

$$\frac{R6}{R5} = \frac{R3}{R4} \quad (2-13)$$

On peut exprimer la tension $V_{s'}$ en fonction de $(V_{out+} - V_{out-})$:

$$V_{s'} = (V_{out+} - V_{out-}) \times \left(1 + \frac{R6}{R5}\right) + V_{OFFSET} \quad (2-14)$$

On remplace dans l'équation (2-9), on obtient finalement la tension de sortie du montage :

$$V_s = \left((V_{out+} - V_{out-}) \times \left(1 + \frac{R6}{R5}\right) + V_{OFFSET} \right) \times \left(1 + \frac{(R8 + P1)}{R7}\right) \quad (2-15)$$

On peut écrire encore :

$$V_s = (V_{out+} - V_{out-}) \times G_1 \times G_2 + V_{OFFSET} \times G_2 \quad (2-16)$$

Avec :

$$G_1 = 1 + \frac{R6}{R5}$$

et :

$$G_2 = 1 + \frac{(R8 + P1)}{R7}$$

Les résistances R3, R4, R5 et R6 doivent être très précises pour que ce montage fonctionne correctement, les résistances que nous avons utilisées ont une précision de 1% avec les valeurs suivantes : R6=900k Ω et R5 = 9k Ω , ce qui permet d'obtenir un gain $G_1=101$ avant de procéder à une amplification définitive G_2 pour atteindre +5V à 1100 hecto Pascal (hP).

Le montage amplifie uniquement la plage de variation de la pression atmosphérique ce qui exige qu'à une pression de 844hP, la tension de sortie Vs' doit être nulle. Sachant que le capteur délivre 0,02mV pour chaque 1hP et à partir de l'équation (2-13) on peut déduire la valeur de V_{OFFSET} .

$$V_{OFFSET} = -844 \times 0,02 \cdot 10^{-3} \times G_1 = -1,7V$$

$$\boxed{V_{OFFSET} = -1,7V}$$

Cette tension est obtenue à l'aide d'une diode Zéner de 1,5V amplifiée à exactement -1,7V utilisant un amplificateur non inverseur avec un ajustement précis grâce au potentiomètre multi tours P0.

L'équation (2-15) conduit à déduire un gain G_2 de 9,67 pour la deuxième amplification. L'ajustement exact du gain est atteint moyennant l'utilisation du potentiomètre multi tours P1.

On a :

$$Vs = (1100 - 844) \times 0,02 \cdot 10^{-3} \times G_1 \times G_2 = +5V$$

On déduit le gain G_2 :

$$G_2 = \frac{5}{(1100 - 844) \times 0,02 \cdot 10^{-3} \times 101} = 9,67$$

IV.2.4 Mesure du taux d'humidité

Pour la mesure d'humidité relative nous avons utilisé le capteur de référence 2322-691-90001 de la société PHILIPS qui se caractérise - d'après le constructeur- par une variation linéaire de sa capacité C en fonction de taux d'humidité RH (Rapport d'Humidité) ($\Delta C = 0,4\text{pF}$ pour chaque $1\%RH$, entre 12 et 75%), elle est de 122pF à un taux $RH = 43\%$. Ce capteur peut fonctionner sur une gamme de fréquence de 1 kHz à 1 MHz .

Ces variations de la capacité sont transformées en des variations de fréquence utilisant un oscillateur à base de portes logiques comme il est présenté sur la Figure.II-5. La période T des oscillations du montage est :

$$T = 2 \cdot R \cdot C \cdot \ln 3 \quad (2-17)$$

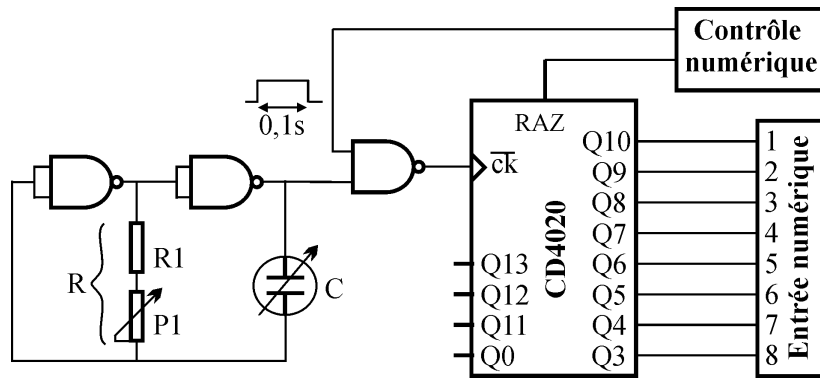


Figure.II-5 : Conditionnement de capteur d'humidité relative

Un compteur binaire est utilisé pour distinguer les changements de fréquence dans un intervalle de temps fixé à 100ms . En outre, nous avons préféré acquérir le taux d'humidité directement en pourcent (de 0 à 100%). Nous avons une capacité qui varie de $\Delta C = \pm 20\text{pF}$ autour de $C_0 = 122\text{pF}$ ($C = C_0 \pm \Delta C$).

à $C = C_0 + \Delta C$, la fréquence des oscillations est :

$$f_1 = \frac{1}{2 \times R \times (C_0 + \Delta C) \times \ln 3} \quad (2-18)$$

à $C = C_0 - \Delta C$, la fréquence des oscillations est :

$$f_2 = \frac{1}{2 \times R \times (C_0 - \Delta C) \times \ln 3} \quad (2-19)$$

Pour obtenir, une excursion de fréquence de ± 500 Hz (ou bien de ± 50 périodes sur une durée de 100ms) nous allons déterminer la valeur de la résistance R.

On a alors :

$$f_2 - f_1 = 500 = \frac{1}{2 \times R \times \ln 3} \times \left(\frac{1}{(C_0 - \Delta C)} - \frac{1}{(C_0 + \Delta C)} \right) \quad (2-20)$$

Se qui conduit à :

$$R = \frac{2 \cdot \Delta C \cdot \ln 3}{500 \times [(2 \cdot C_0 \cdot \ln 3)^2 - (2 \cdot \Delta C \cdot \ln 3)^2]} \quad (2-21)$$

On peut écrire :

$$R = \frac{B}{500 \times (A^2 - B^2)} \quad (2-22)$$

$$\text{Avec : } \begin{cases} A = 2 \cdot C_0 \cdot \ln 3 \\ \text{et} \\ B = 2 \cdot \Delta C \cdot \ln 3 \end{cases}$$

Nous avons aussi pris la sortie du compteur binaire en commençant par Q3 - et cela pour réduire un peu la valeur de la résistance R à quelques centaines de kilo Ohms-, L'excursion de fréquence sera alors multipliée par 8.

L'équation (2-22) devient donc :

$$R = \frac{B}{8 \times 500 \times (A^2 - B^2)} \quad (2-23)$$

En fin, le calcul de la résistance R nous donne :

$$\boxed{R = 157,11 \text{ k}\Omega}$$

En pratique, cette valeur est difficile à obtenir avec exactitude. Pour plus de précision, nous allons ajuster précisément la valeur du potentiomètre multi-tours P1. Les résultats obtenus sont aussi étalonnés par un appareil humidimètre (type PM6303 –RCL METER).

IV.2.5 Mesure de Vitesse et de direction de vent

La mesure du vent concerne deux grandeurs : la vitesse de vent et sa direction. Dans le domaine de la météorologie. La mesure de ces deux derniers nécessite l'emplacement de leurs capteurs appropriés dans un endroit dégagé. L'opération de mesure ne doit pas être affectée par des obstacles proches agissant sur l'écoulement du vent. Les capteurs du vent doivent pour cela se situer à une distance au moins égale à 10 fois la hauteur de tout obstacle situé à l'intérieur d'un cercle centré sur un pylône de 300 m de rayon. Généralement les capteurs sont installés à une hauteur de 10 mètres pour mesurer la vitesse de vent moyenne sur 10 minutes. Pour certains besoins la mesure du vent peut être effectuée sur d'autres hauteurs. Par exemple, les agronomes s'intéressent à la mesure de vitesse de vent sur une hauteur de 2 mètre seulement.

Pour la mesure de direction du vent, on utilise des capteurs de position simples généralement des potentiomètres ou bien capteurs optiques. La Figure.II-6 montre le principe de mesure que nous avons utilisé. Le dispositif est basé sur un codeur optique monté sur un disque tournant. L'utilisation des photodiodes émettrices et réceptrices permet de déterminer la position angulaire du disque par l'identification du code déjà tracé sur le disque. Le code est tracé sur trois cercles dont chaque une présente une piste sur laquelle une photodiode poursuit sa continuité. Le dispositif est fixé sur une girouette et l'ensemble constitue un capteur de direction de vent. Les enregistrements peuvent se présenter en coordonnées polaires constituant ce qui est appelé par les météorologues « la rose de vent ».

La girouette doit s'orienter vers la direction de vent avec fidélité ; l'inertie et les frottements doivent être minimisés tandis que la sensibilité aux vents faibles, doit être maximale. Ces contraintes peuvent être contradictoires quant à leurs solutions technologiques, un compromis doit être trouvé afin d'optimiser les qualités de la girouette

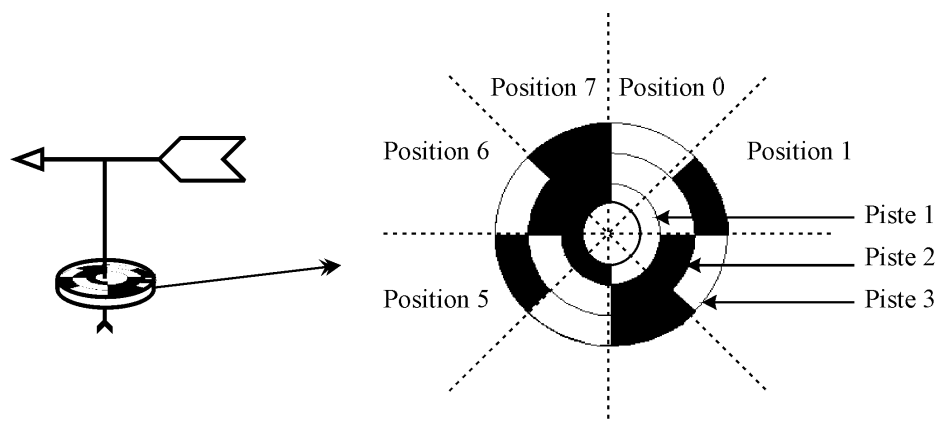


Figure.II-6 : présentation du capteur de direction de vent

Pour la mesure de vitesse de vent, on utilise généralement, trois coupelles hémisphériques montées autour d'un axe verticale. Cette géométrie permet à ce dispositif de tourner quelle que soit la direction de vent. Pour que ce mécanisme soit utile pour la mesure, il faut respecter certains règles physiques et mécaniques. La vitesse de rotation est mesurée par un capteur optique (ou bien magnétique) qui délivre une impulsion électrique pour chaque passage d'un repère fixé sur le disque. Cette description est présentée sur la Figure.II-7.

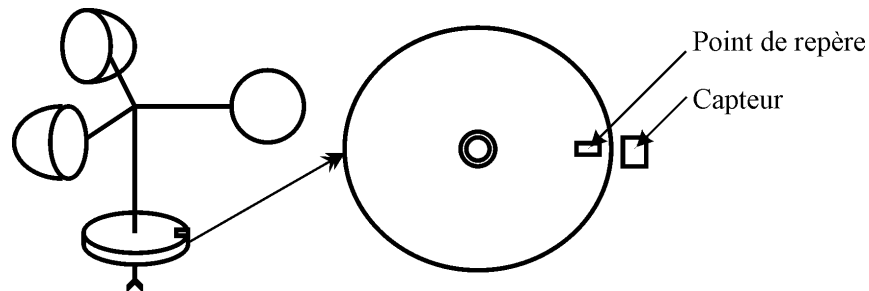


Figure.II-7 : présentation du capteur de vitesse de vent

Ce capteur sera connecté directement à un compteur de sorte que ce dernier ne dépasse pas son maximum sur une durée de 10mn pour une vitesse de vent maximale.

IV.3 EXPLOITATION D'UNE CELLULE SOLAIRE POUR LA MESURE

La conversion photovoltaïque nécessite l'utilisation d'une couche photoconductrice, dite couche absorbante, qui transforme le rayonnement lumineux en paires électrons trous. Par la suite, ces porteurs créés sont collectés réalisant une jonction à la surface de cette couche absorbante.

Cette jonction peut être soit une homojonction, c'est le cas classique de silicium cristallin, soit une hétérojonction, c'est à dire une jonction avec deux semi-conducteurs différents, soit une jonction Schottky, c'est à dire un contact métal- semi-conducteur.

Une cellule solaire simple consiste à une jonction p-n construite à partir d'un semi-conducteur cristallin. On trouve différents types de cellule solaire : de Silicium, monocristallin, multi cristallin et amorphe.

En réalité, on trouve plusieurs formules de modélisations qui caractérisent le comportement d'une cellule solaire. Communément, la cellule possède des résistances parasites présentées par une résistance série R_s de faible valeur provient de contact métal semi-conducteur et une autre résistance parallèle (shunt) R_{sh} de grande valeur du substrat.

D'une manière générale, le modèle qui caractérise une cellule solaire est réduit à une diode (jonction) et un générateur de courant. On peut présenter le schéma électrique équivalent comme le montre la Figure.II-8 [Charles et al, 2000 ; Radziemska, 2005].

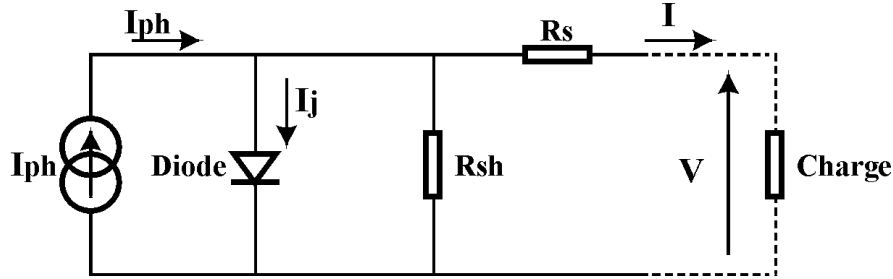


Figure.II-8 : Schéma électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque

Le courant I aux bornes de la cellule est :

$$I = I_{ph} - I_j \quad (2-24)$$

Avec : I_{ph} : est le photo courant

I_j : courant d'obscurité de la jonction

Le courant I_j peut s'exprimer par l'équation de Shockley. Sous éclairement, ce courant est négligeable devant le photo courant I_{ph} . Dans ce cas, le courant de court circuit de la cellule sera considéré égal à I_{ph} .

La densité du courant de court-circuit peut se calculer directement par l'intégrale suivant: [David, 2003]

$$I_{cc} = q \int_0^{\infty} F(\lambda) \cdot QE(\lambda) d\lambda \quad (2-25)$$

Ou: $F(\lambda)$ est le spectre solaire en unité $W \cdot m^{-2} \cdot s^{-1} \cdot nm^{-1}$.

$QE(\lambda)$ est le rendement quantique de la cellule.

q : la charge d'électron

En effet, le nombre de charges qui passent dans la cellule photovoltaïque dépend de la quantité des photons de rayonnement qui y parvient, or le courant se définit comme le nombre de charges par unité de temps. Ainsi, plus il y a des photons, plus il y a de charges et plus l'intensité de courant est grande. On constate que l'intensité du courant de court-circuit est proportionnelle à l'intensité de rayonnement [Hishikawa et al, 2000].

Une expérimentation a montré que la valeur de la résistance série de la cellule influe fortement sur l'augmentation initiale de la courbe de linéarité. En addition, des influences secondaires, de l'épaisseur de la jonction, de dopage et de la réflectivité de la surface de la cellule sont observées [Zirkle et al, 1989].

Une cellule solaire ordinaire peut délivrer une tension et un courant qui sont relativement liés à l'impédance de la charge et au rayonnement reçu. On doit donc mesurer un courant qui sera le courant de court-circuit, cette mesure peut être obtenue par la mesure du champ magnétique délivré par une bobine connectée aux bornes de la cellule ou bien de mesurer la tension aux bornes d'une résistance de très faible valeur qui va donner pratiquement la valeur de courant de court-circuit. Pour cela nous avons utilisé une charge de 8 mΩ suivie par une amplification de la tension qui en résulte à ces bornes.

Le gain d'amplification n'est pas à préciser mais il doit être réglable. Il suffit juste d'atteindre des valeurs qui s'approchent du +5Volts à fort ensoleillement. L'étalonnage et la correspondance de ces mesures seront vérifiés et effectués après plusieurs acquisitions.

Pour observer la réponse de courant de court –circuit sur une large plage de variation de l'intensité de rayonnement solaire, L'expérimentation doit se faire dans une journée bien ensoleillée et sans nuages.

IV.4 Gestion des mesures par microcontrôleur

Après le conditionnement des différents capteurs, il vient le rôle du microcontrôleur pour gérer l'acquisition des signaux obtenus. Le schéma bloc interne du microcontrôleur utilisé est représenté sur la Figure.II-9. Ce composant est constitué de 7 ports numériques, de 8 lignes chacun, repérés de port A à port G. On peut trouver différents ouvrages qui expliquent avec plus de détail l'architecture et le fonctionnement du microcontrôleur 68HC11 [Beghyn, 1997].

Le microcontrôleur 68HC11F1 dispose aussi d'un convertisseur analogique – numérique (CAN) de 8 bits avec un multiplexeur qui permet de traiter successivement 8 entrées analogiques. On trouve aussi un bloc TIMER qui constitue une référence pour gérer les opérations temporaires, un bloc de communication série et une mémoire RAM de 1 k Octets.

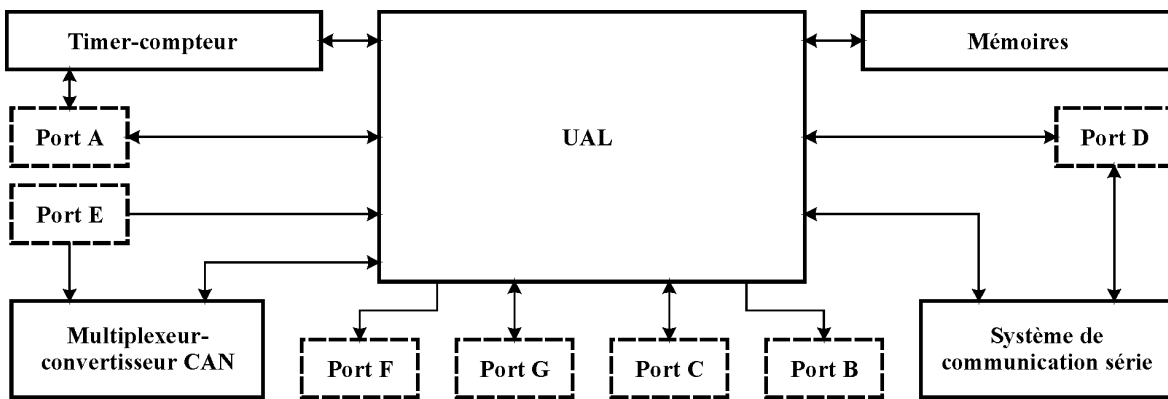


Figure.II-9 : Schéma bloc du microcontrôleur 68HC11F1

Les opérations de mesure sont instantanées pour la température, l'éclairement solaire, l'humidité et la pression, tandis que la mesure de la vitesse de vent est effectuée pour donner une valeur moyenne obtenue sur 10 minutes.

Le schéma électrique de conditionnement de tous les capteurs décrit précédemment est présentée sur la Figure.II-11. Trois photodiodes réceptrices de type PBW34 ont été choisies pour détecter la moindre déviation du soleil à son mouvement par l'effet d'ombre, on trouvera plus d'explication de l'utilité de ceci dans le chapitre 3. Le niveau d'insolation reçu par les photodiodes est comparé à un seuil fixé par l'ajustable P14 pour détecter l'apparition ou non du soleil. Cette information est utilisée pour actionner les moteurs et diriger le capteur vers le soleil. Le circuit de commande des moteurs pas à pas utilisé est présenté sur la Figure.II-12. Nous avons utilisé une paire de circuits conçus pour faciliter la commande des moteurs pas à pas. Le premier le 'L297' est conçu pour prendre en charge la constitution de processus numérique nécessaire pour alimenter périodiquement le bobinage du moteur. Il possède plusieurs entrées numériques, nous citons essentiellement : une entrée '*CLOCK*' pour tourner le moteur d'un pas par impulsion, '*CW/CCW*' pour choisir la direction de rotation et '*ENABLE*' pour autoriser la commande. Le deuxième, le 'L298' est un simple circuit d'augmentation de puissance, utilisé ici pour augmenter les courants délivrés par le premier circuit. Les schémas internes des deux circuits sont présentés sur l'annexe A8.

Sur la Figure.II-10 nous montrons le schéma de circuit associé pour le fonctionnement du microcontrôleur dont tous les ports sont accessibles par des connecteurs 16 broches. Cette carte sera connectée aux différentes cartes pour gérer entièrement l'opération de mesure. On trouve aussi sur la Figure.II-13 le schéma de l'alimentation électrique des différentes cartes citées. Le choix des régulateurs LM317 est justifié par le besoin d'une forte intensité de courant pour alimenter les moteurs pas à pas. L'ensemble des cartes avec l'ordinateur constitue un système de mesure complet.

Le port A du microcontrôleur, est configuré en sortie pour effectuer le contrôle des opérations de mesure sur la carte de conditionnement et le port E reçoit les signaux analogiques pour les acheminer vers le CAN du microcontrôleur. Les ports G et C sont configuré en entrées pour acquérir respectivement les grandeurs du vent et celle d'humidité.

Les port B et F son des port de sortie et ils sont utilisés pour la commande des deux moteurs pas à pas pour les mouvement en site et azimuth.

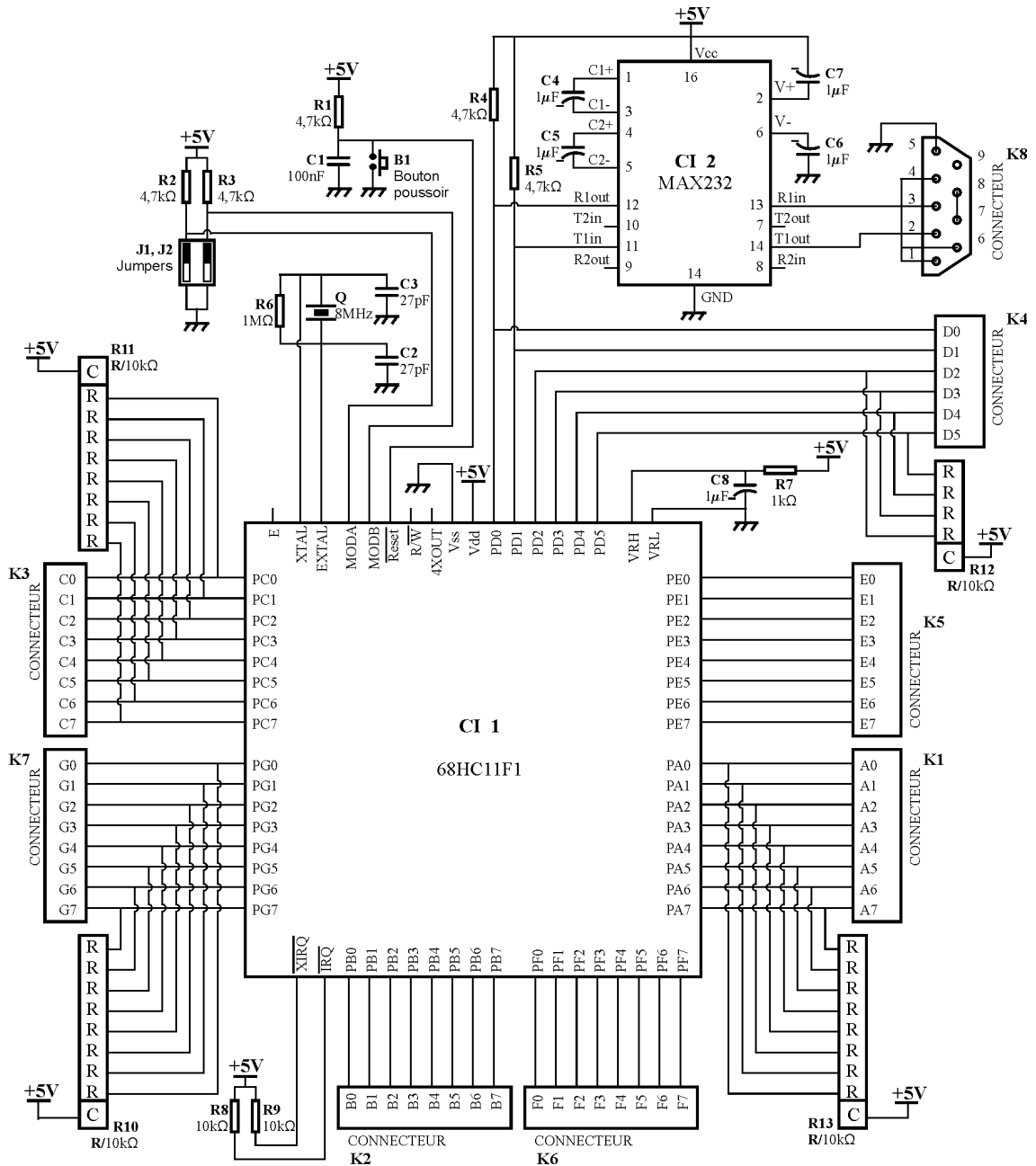


Figure.II-10 : Schéma électrique de la carte de contrôle.

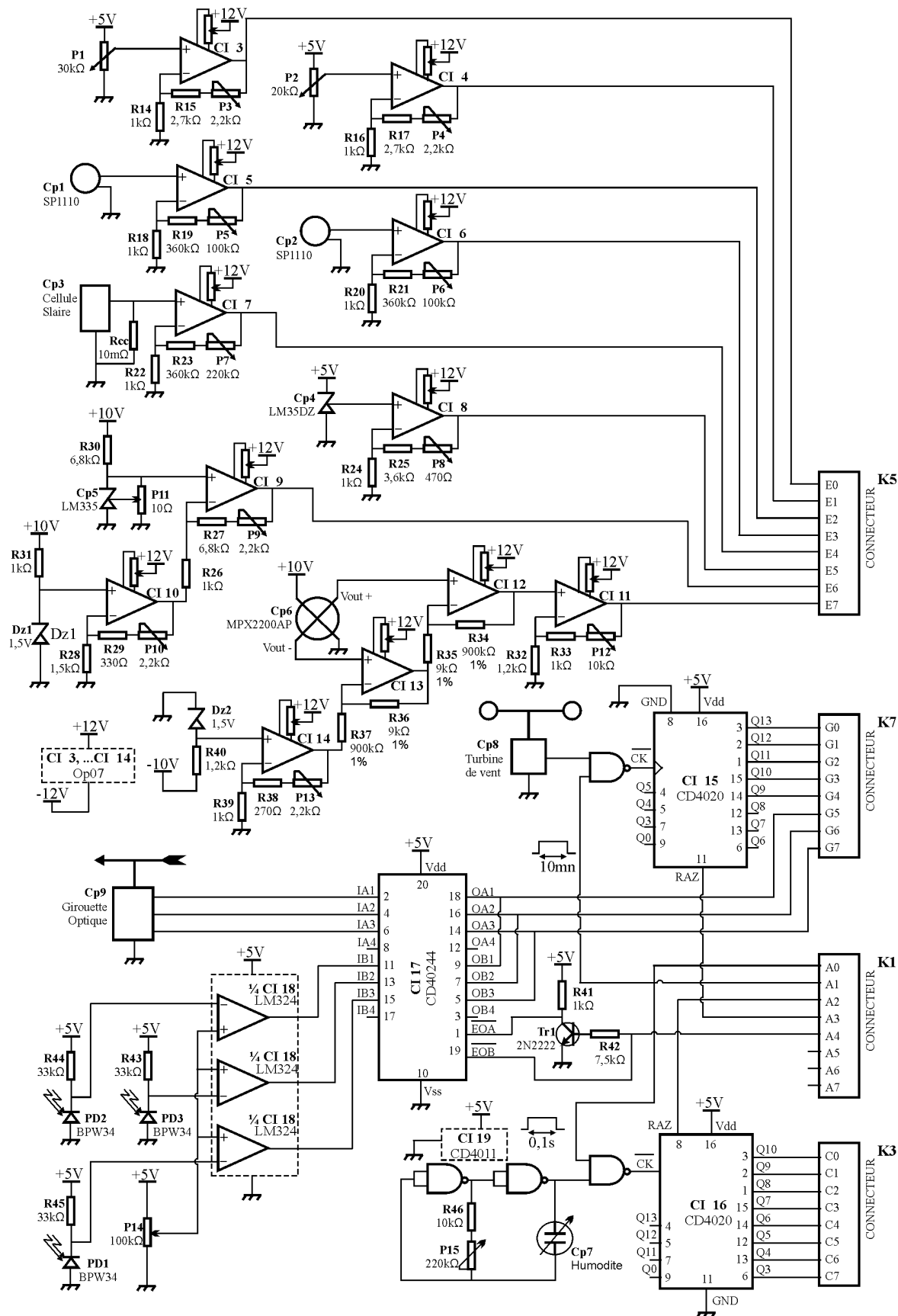


Figure.II-11 : Schéma électrique de la carte de conditionnement des capteurs

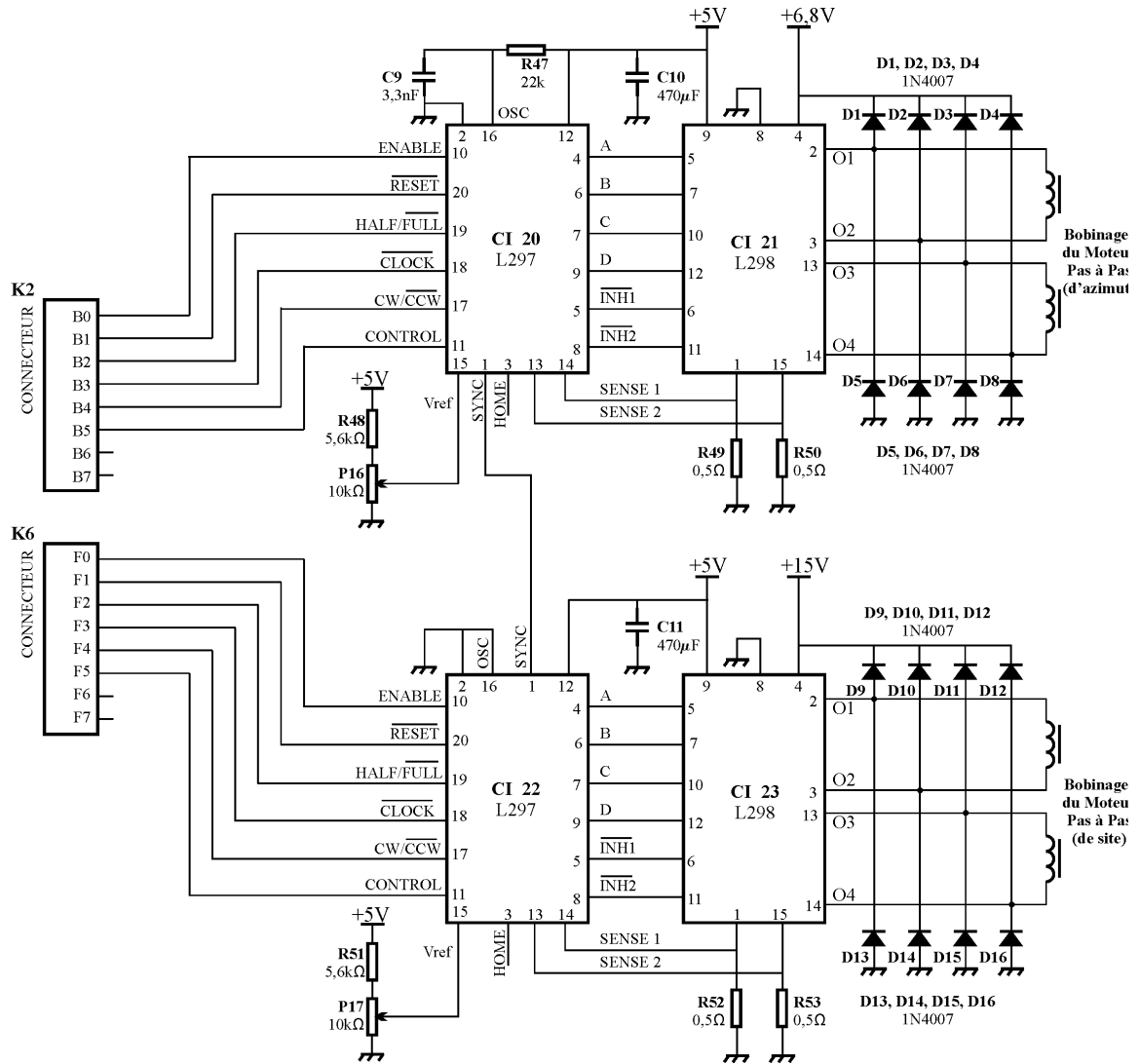


Figure.II-12 : Schéma électrique de la carte de commande des moteurs pas à pas

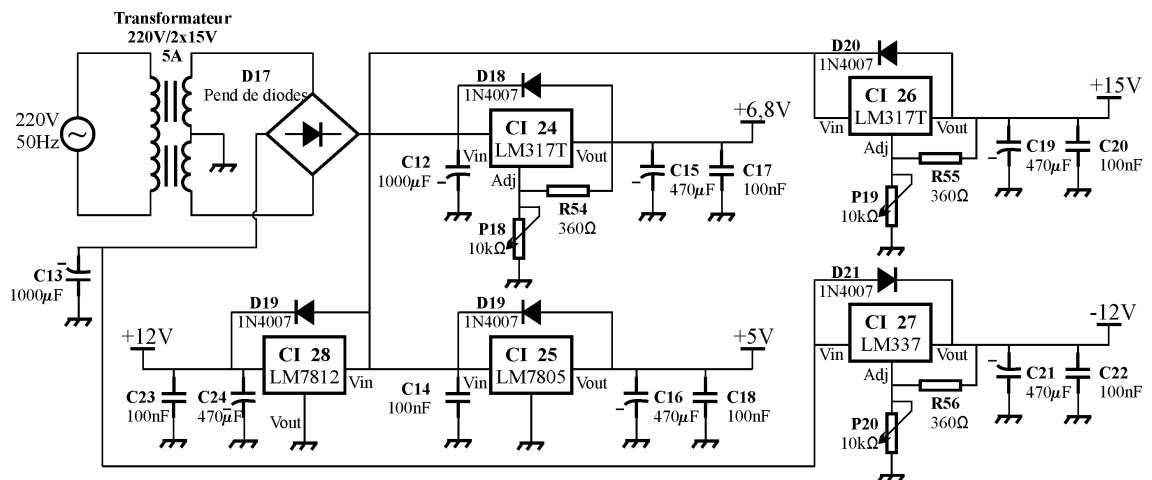


Figure.II-13 : Schéma électrique de l'alimentation générale

Conception de la partie mécanique et Réalisation du système de mesure.

Dans le présent chapitre, nous présentons la réalisation. C'est le complément du chapitre précédent, il décrit la conception de la partie mécanique et les démarches entreprises pour que les mesures soient réglementaires. Nous allons, par la suite, expliquer les programmes de gestion qui permettent d'acquérir convenablement les signaux des mesures.

I. INTRODUCTION

La mesure du rayonnement solaire nécessite un certain nombre de précautions à prendre pour satisfaire les conditions physiques appropriées à cette opération de mesure. Nous citons notamment, le mécanisme de la poursuite du soleil. Il est à noter aussi, que les capteurs doivent être bien placés pour un meilleur accès à l'environnement des grandeurs à mesurer et éviter toute source de perturbation qui peut résulter d'une mauvaise implantation ou un échauffement de certaines parties du système.

II. METHODES DE MESURE DU RAYONNEMENT SOLAIRE

II.1 Mesure des composantes du rayonnement solaire

On a vu dans le premier chapitre, que le rayonnement solaire possède deux composantes : directe et diffuse. La mesure de ces deux composants est utile dans plusieurs domaines et applications qui interfèrent avec l'énergie solaire, citons par exemple les concentrateurs solaire, l'agriculture,etc. Il existe des *Pyranomètres* destinés spécialement à la mesure de la partie spectrale responsable de la photosynthèse des plants [Mottus et al, 2001].

Dans la plupart des stations météorologiques, les mesures de l'insolation (ou d'ensoleillement) se font en permanence alors que celles de l'irradiation solaire sont plutôt rares. Cependant différentes approches stochastiques permettent d'estimer approximativement le flux d'irradiation solaire à partir des données d'insolation mais ces estimations ne sont pas précises [Khiredine et Benmahammed, 2001].

Etant donné que les appareils de mesure de rayonnement solaire coûtent chers, le plus souvent, la mesure de ses composantes se fait par une des deux méthodes qui consiste à mesurer seulement une seule composante avec le rayonnement global et l'autre sera déduite à partir de la relation (1-19).

La méthode la plus simple consiste à utiliser deux *Pyranomètres* en même temps; un pour mesurer le rayonnement global et l'autre pour mesurer le diffus utilisant un ombrage du rayonnement direct (*Diffusiomètre*). L'ombre peut être obtenue simplement par un anneau d'épaisseur suffisante comme le montre la Figure.III-1. Pour plus de précision, la part du rayonnement diffus occulté par ce mode de mesure, exige une correction pour compenser les radiations solaires interceptées par l'anneau. L'annexe A9 montre un exemple des valeurs du facteur de correction au cours de l'année [warfield, 1983]. On peut calculer par la suite le rayonnement direct. Il est important de mentionner que les

Pyranomètres doivent être correctement orientés pour être parfaitement horizontales et qu'ils soient à 1 mètre d'altitude au dessus de la surface terrestre.

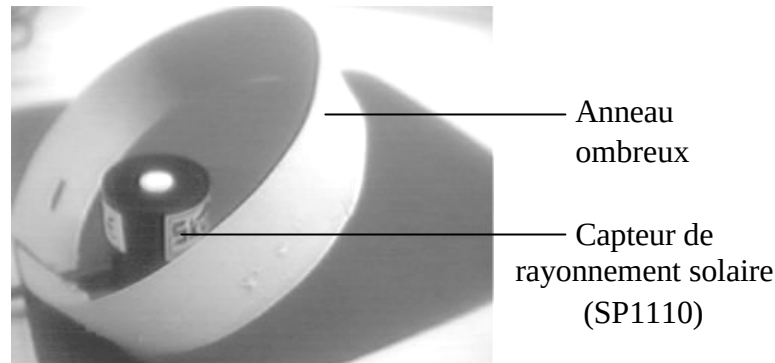


Figure.III-1 : méthode de mesure du rayonnement diffus
(*Diffusiomètre*)

La deuxième méthode est meilleure comparée à la précédente. Elle consiste à utiliser en même temps, un *Pyrhéliomètre* et un *Pyranomètre* pour mesurer le rayonnement direct et le global et de calculer, par la suite, le diffus. Cette méthode possède l'inconvénient qu'elle nécessite une poursuite permanente du mouvement de soleil par le *Pyrhéliomètre*.

II.2 mécanisme de poursuite du mouvement de soleil

Nous nous sommes intéressés à la méthode la plus précise pour la mesure des composantes du rayonnement solaire. Pour cela, nous sommes obligés de construire un mécanisme de poursuite de mouvement du soleil pour la mesure du rayonnement solaire direct. Des mécanisme similaire ont été déjà construits dans différents laboratoires de recherche [Georgiev et al, 2004 ; Roth et al, 2004].

Le mécanisme que nous avons réalisé est présenté dans la Figure.III-2. Il est constitué essentiellement par deux blocs mécaniques mobiles grâce à deux moteurs pas à pas (unipolaire 48 pas et bipolaire 400 pas), les mouvements de rotation des moteurs sont ralentis par des engrenages. En effet, le moteur de 48 pas (utilisé pour les mouvements en site) nécessite 18 tours pour que la direction d'orientation effectue un mouvement de rotation de 90°, ce qui permet d'obtenir une très grande précision de degré du pas des mouvements angulaires (0,1°/pas pour le site).

$$\frac{90^\circ}{48 \times 18} = 0,1^\circ / \text{pas}$$

L'ensemble du mécanisme de mouvement site est porté par le deuxième bloc qui sert aux mouvements azimutaux (mouvements d'angle sur le plan horizontal).

Ce bloc est actionné par le deuxième moteur qui possède 400 pas. L'affaiblissement de mouvement de rotation par les engrenages oblige ce moteur d'effectuer 5,25 tours pour que le mécanisme horizontal effectue un mouvement de rotation de 360°, ce qui donne une précision de 0,17°/pas. On a donc une excellente directivité verticale et horizontale vers le soleil.

$$\frac{360^\circ}{400 \times 5,25} = 0,17^\circ / \text{pas}$$

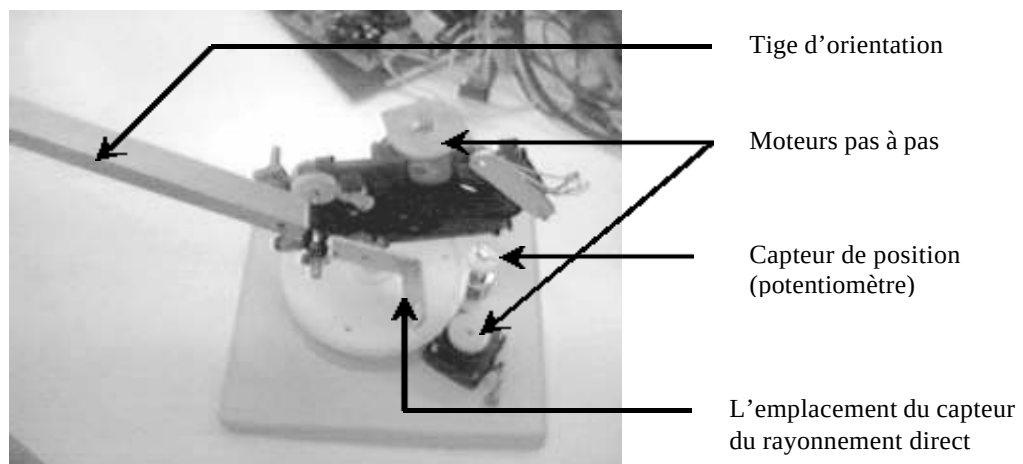


Figure.1II-2 : le système mécanique de la poursuite de soleil (pyrhéliomètre)

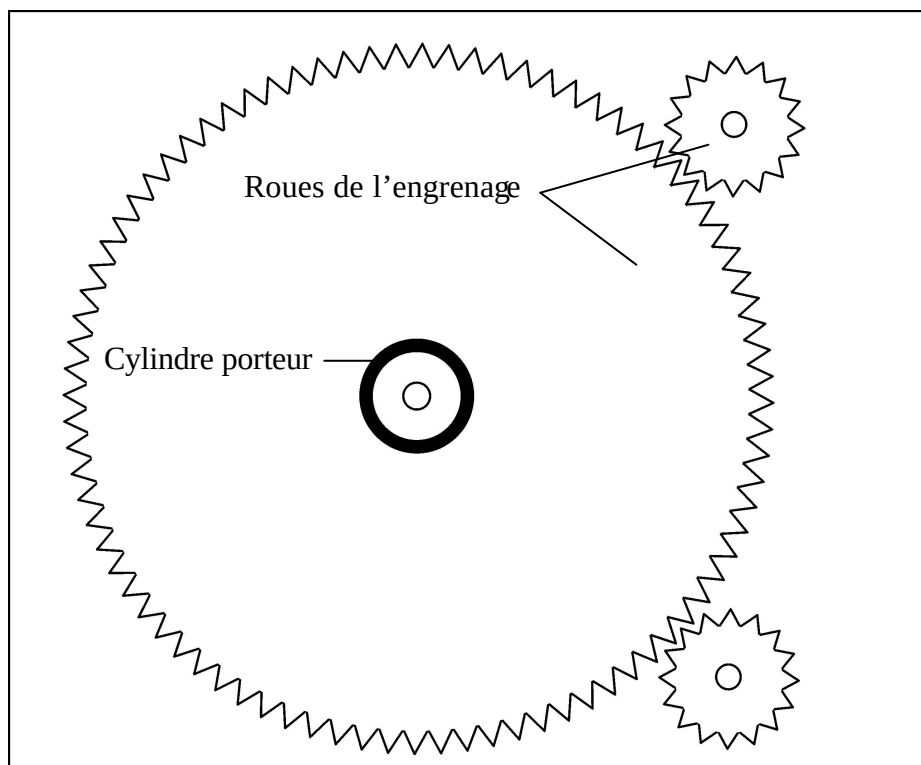
Trois photodiodes réceptrices de type PBW34 ont été utilisées pour détecter la moindre déviation du soleil dans ses mouvements. En raison de leur réponse angulaire qui n'est pas très directive comme il est montré dans l'annexe A10, nous avons rajouté une tige de direction pour plus de précision d'orientation. Leur sensibilité spectrale couvre la majeure partie du spectre solaire, raison pour laquelle ce type de diode est choisi. Ces photodiodes sont montées deux à deux pour chaque plan de rotation (site et azimut).

La tige d'orientation est de format L, de 60 cm de longueur. Elle est utilisée pour produire une ombre d'environ 2mm pour chaque 0,2° de rotation, et ceci sur l'une des deux photodiodes pour chaque plan de rotation (photodiode A et AS sur le plan azimut, S et AS sur le plan site), comme le montre la Figure.III-3. De cette manière les trois photodiodes permettent deux à deux de détecter les mouvements en site et en azimut du soleil.

Le microcontrôleur reçoit les détections effectuées par les photodiodes et envoie les signaux de commande pour actionner les moteurs pas à pas. L'extinction des moteurs est possible sans aucune influence sur la position courante de l'orientation.



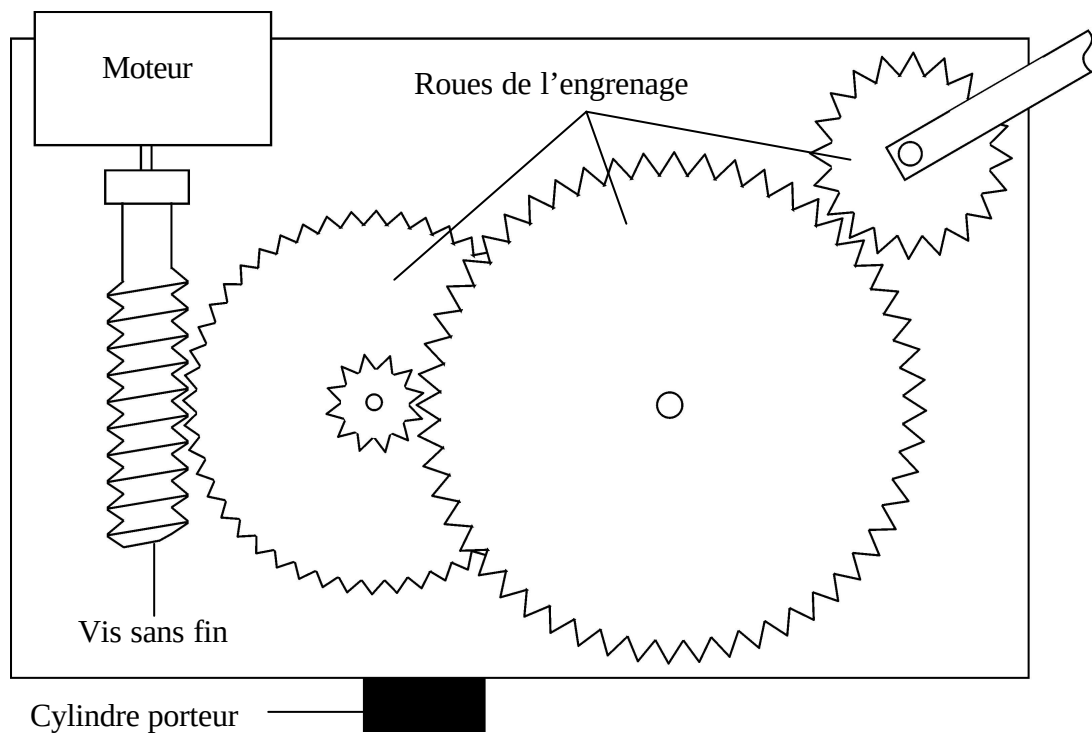
La photo du mécanisme de mouvement horizontal



Détail du mécanisme de mouvement horizontal



La photo du mécanisme de mouvement vertical



Détail mécanique du mécanisme de mouvement vertical

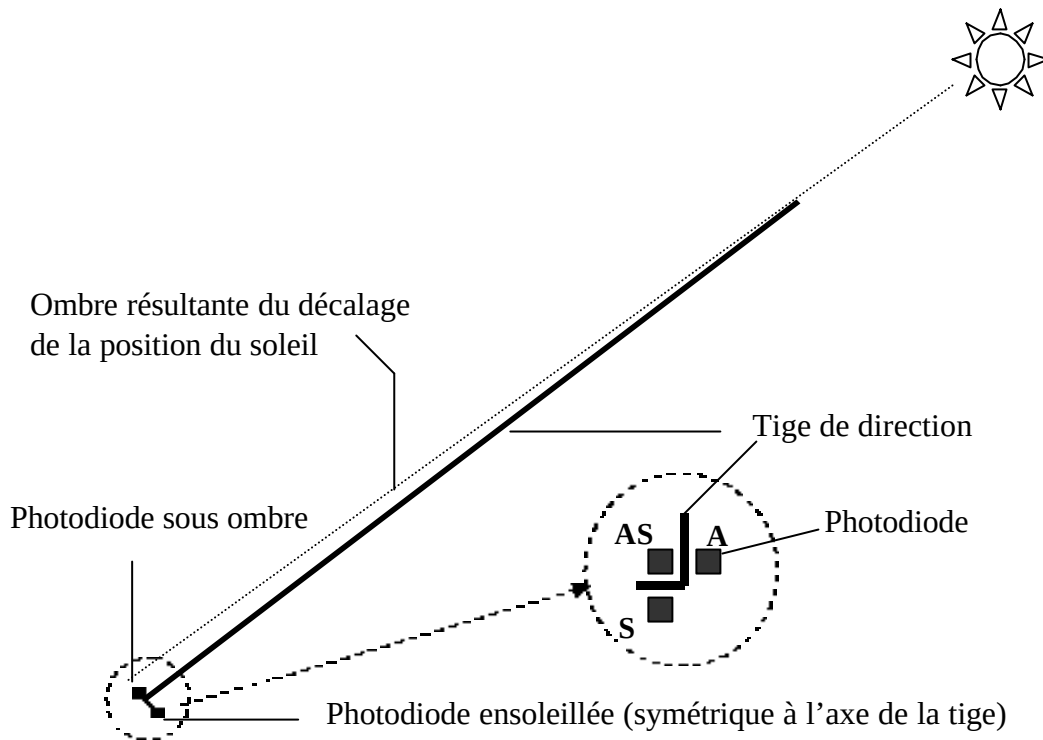


Figure.1II-3 : Schéma explicatif du principe d'orientation vers le soleil

Il reste l'élimination du rayonnement diffus c'est-à-dire, ne laisser passer que le rayonnement direct vers la surface réceptrice du capteur (le SP1110). Nous savons que l'angle solide du soleil vu par un observateur terrestre est de $0,53^\circ$. Ce qui est très directif. La Figure.III-4 montre qu'il est possible de distinguer le rayonnement solaire direct du rayonnant diffus vers une surface réceptrice, si on met sur cette surface, un collimateur conique utilisé pour obscurcir la composante diffuse, le dispositif constitue un pyrhéliomètre.

Le collimateur conique qu'on a utilisé est un tube de 69mm de longueur et d'un diamètre haut de 9,6 mm et d'un diamètre bas de 9 mm. C'est à dire qu'il possède un angle solide de $0,5^\circ$.

$$2 \times \arctg \frac{0,3}{69} = 0,5^\circ$$

Enfin, il faut mesurer la hauteur du soleil par un potentiomètre monté sur la tige d'orientation pour que l'on puisse terminer la dernière étape de cette opération de mesure et obtenir le rayonnement direct par la relation (1-18).

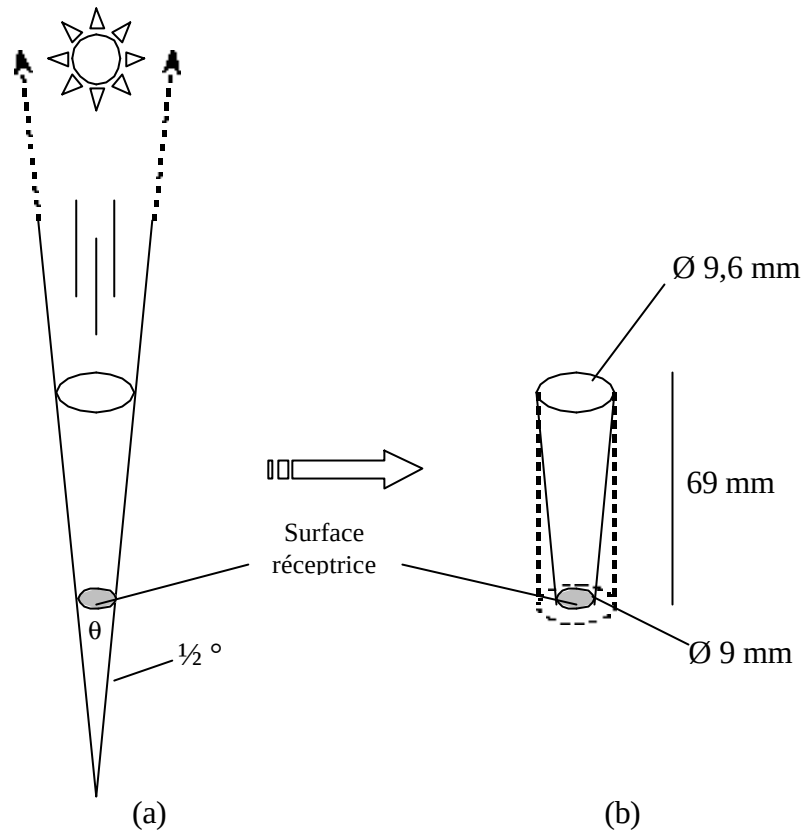


Figure.III-4 : Principe de séparation du rayonnement direct et le diffus

- (a) un collimateur conique utilisé pour obscurcir la composante diffusée du rayonnement solaire
- (b) collimateur cylindrique équivalent utilisé dans notre Pyrhéliomètre.

II.3 Mesure de la durée d'insolation (l'héliographe)

Les photodiodes réceptrices que nous avons utilisées ont la caractéristique de délivrer un signal saturé en présence des rayons solaires directs. A cet effet, nous pouvons enregistrer la durée d'ensoleillement par le microcontrôleur. Néanmoins, la détection d'ensoleillement se fait instantanément par le microcontrôleur et nécessite une période élémentaire de vérification, la plus courte possible pour une meilleure précision.

III. REALISATION DES DIFFERENTES CARTES DU SYSTEME

La réalisation est composée par : une carte microcontrôleurs, une carte de conditionnement des capteurs, un système mécanique de guidage associé à une carte de commande et enfin, une carte d'alimentation générale. Pour effectuer les connexions électroniques, nous avons utilisé des circuits imprimés simple face en verre époxy.

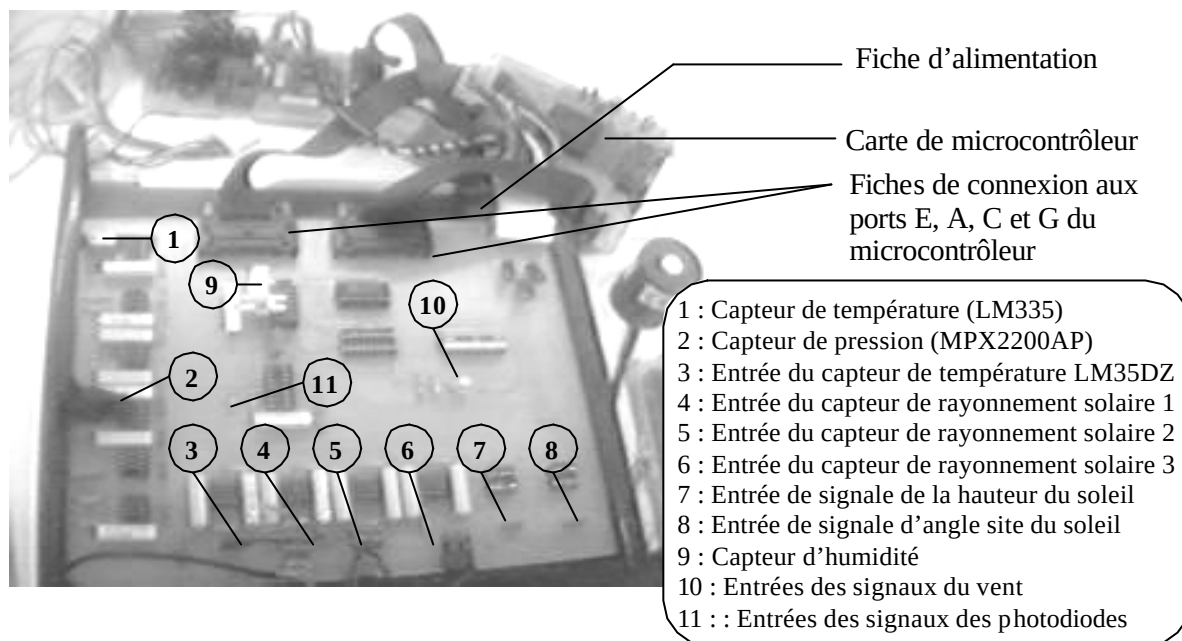


Figure.III-5 : La carte de conditionnement des capteurs utilisés.

Les composants qui dissipent la chaleur (régulateurs de tension, circuits de commande de puissance des moteurs pas à pas) sont regroupés dans d'autres cartes séparément pour ne pas influencer les vraies valeurs des grandeurs à mesurer autour de la carte de conditionnement qui est présentée sur la Figure.III-5. Pour éviter des échauffements excessifs des circuits de puissance dans la carte de commande des moteurs et les régulateurs de tension dans la carte d'alimentation, ces circuits sont équipés par des radiateurs pour évacuer la chaleur par convection, comme il est présenté sur la Figure.III-6 et la Figure.III-7

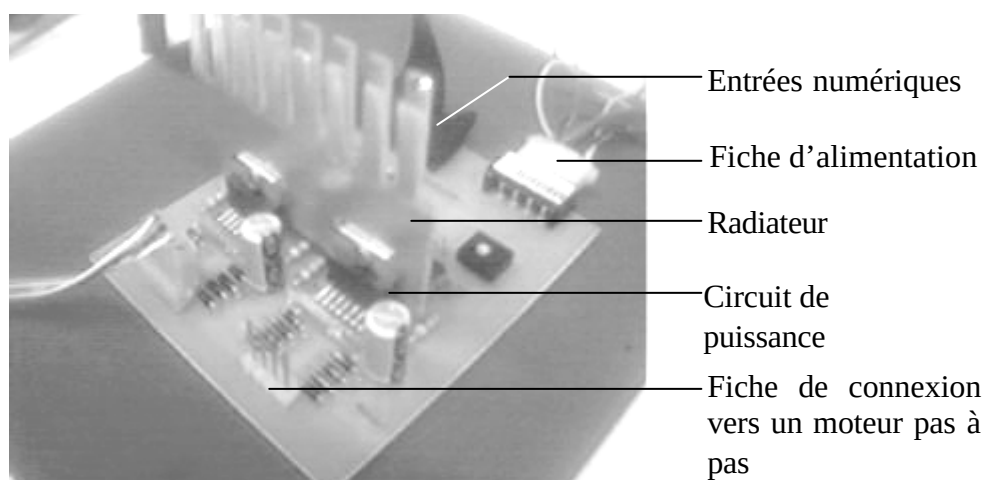


Figure.III-6 : carte de commande des moteurs pas à pas

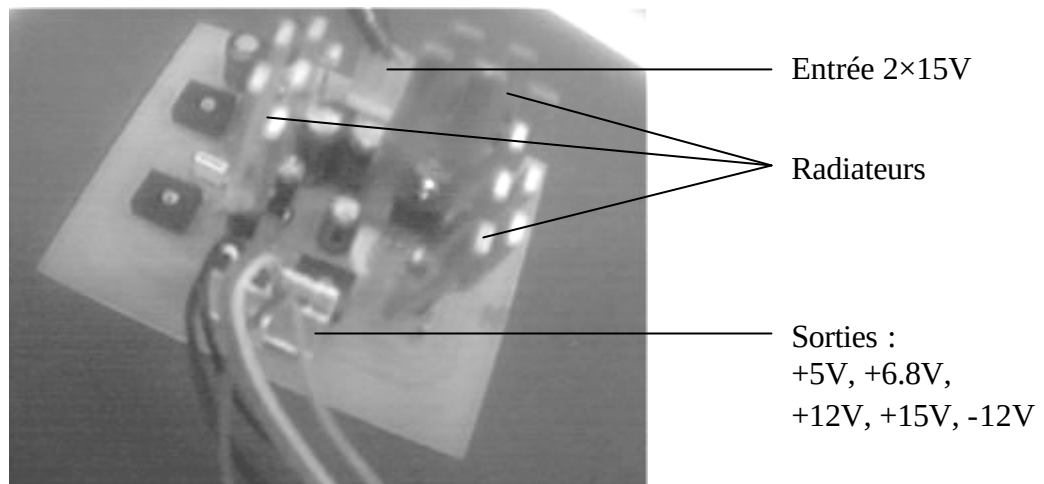


Figure.III-7 : Carte de l'alimentation générale

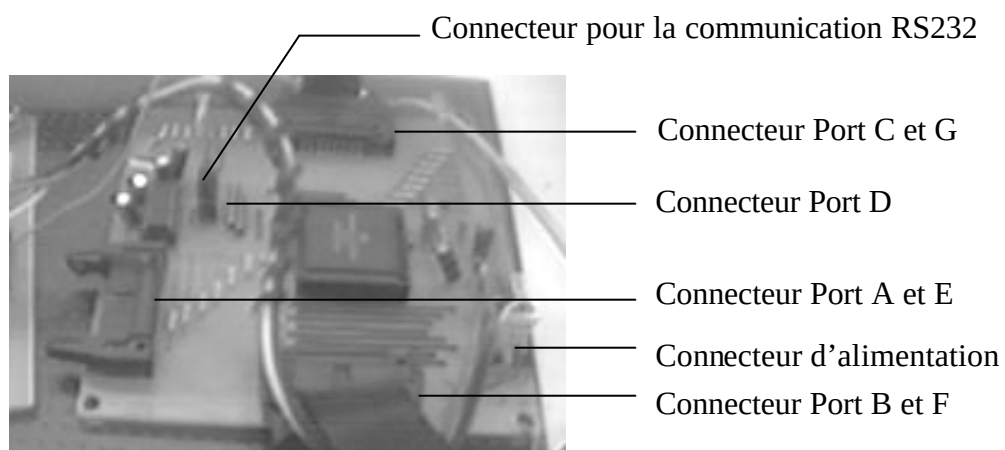


Figure.III-8 : Carte du microcontrôleur

La carte de contrôle présentée sur la Figure.III-8, est constituée essentiellement par le microcontrôleur 68HC11F1 du MOTOROLA avec tous les accessoires nécessaires pour son fonctionnement. On trouve un circuit MAX232 pour convertir les signaux de communication série (de norme RS232), un quartz de 8MHz qui sert comme horloge de référence pour le microcontrôleur et divers connecteurs. Les fiches de connexions permettent d'accéder aux différentes entrées / sorties du microcontrôleur vers les autres cartes électroniques.

IV. FONCTIONNEMENT GENERAL DU SYSTEME DE MESURE

IV.1 Programme de gestion du microcontrôleur

Le micro- contrôleur est programmé pour gérer les différentes opérations de contrôle à l'intérieur ainsi qu'à l'extérieur du microcontrôleur. Toutes les fonctions disponibles sur le microcontrôleur sont exploitées pour un minimum d'encombrement des composants dans le système, et en respectant le temps de fonctionnement de chaque élément.

Le programme est fait selon les fonctions et les capacités avantageuses du Microcontrôleur 68HC11F1. Nous avons représenté sur la Figure.III-9, les différentes étapes suivies dans ce programme, et nous présentons par la suite un organigramme détaillé correspondant à l'opération d'orientation vers le soleil.

Avant tout, le programme commence par une initialisation des registres et une mise en état de marche de tous les éléments internes indispensables pour l'opération de mesure (unité de communication série et le CAN). Il définit également les délais et l'espace mémoire réservé pour cette opération.

Par la suite, et dans un premier temps, le programme devra respecter un délai d'attente. L'acquisition ne doit être activée que lorsque tous les capteurs ont fonctionné pendant au moins trois minutes. Ce délai est important car les capteurs fonctionnent dans leur phase de stabilisation après leur mise sous tension. Dans le but d'éviter cette erreur de stabilité, le délai d'attente est fixé à cinq minutes pour qu'il soit supérieur au maximum des temps de stabilités, nécessaires pour chaque capteur (le maximum est de 3 minutes pour le capteur d'humidité). Après cela, le programme commence à sélectionner chacune des voies de mesure. Dans cette phase, l'acquisition et le prétraitement seront effectués conformément au type de grandeur implantée, avant de procéder au rangement en RAM les résultats obtenus. L'adresse de rangement va dépendre de l'ordre des voies et l'heure et la minute en cours, d'où la nécessité de consulter au préalable l'horloge temps réel disponible dans le microcontrôleur. Durant cette phase d'acquisition, les relevées des grandeurs se fait à rythme uniforme et à chaque dix minutes jusqu'à 14 heures d'acquisition.

Après avoir terminé tous les relevés au cours de toute la journée (14 heures d'acquisition), le programme procède à la sélection successive des différentes données stockées dans la RAM, pour construire un des paquets qu'il constitue et le transmettre vers le PC. La transmission numérique des paquets est possible grâce aux terminaux de transmission de type RS232 disponibles sur le microcontrôleur et sur le PC. L'ensemble des paquets créés et transmises caractérise un protocole prédéfinie et préparé pour l'envoi de toutes les données de mesures. Vu que l'acquisition des mesures est extrêmement lente,

cela, nous a obligé d'effectuer le stockage des données dans la RAM avant de les transmettre, pour éviter l'allumage permanent du PC pendant toute la journée.

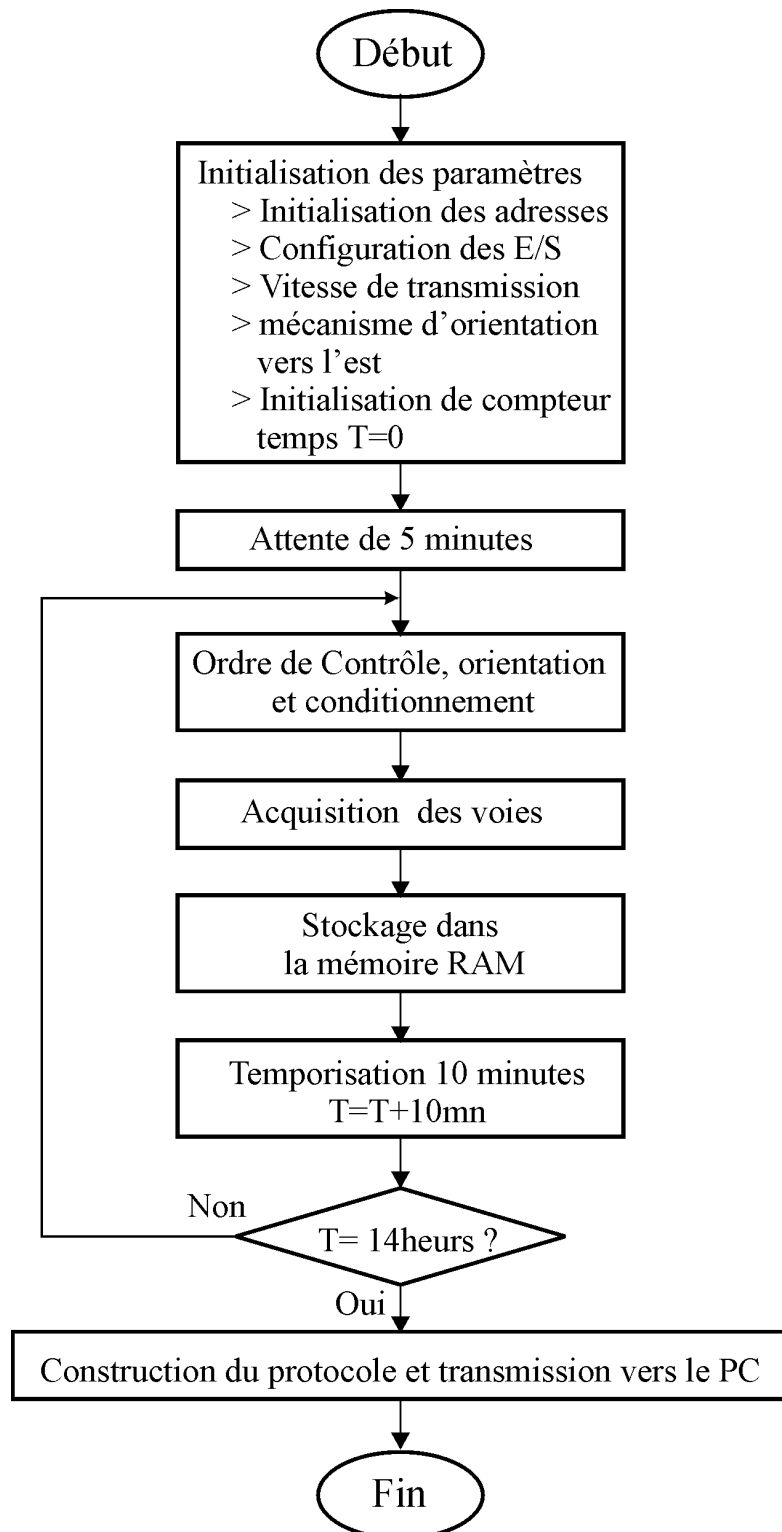


Figure.III-9 : Organigramme du programme de gestion du microcontrôleur

La valeur instantanée de chaque grandeur peut être lue et enregistrée pour permettre de suivre leur évolution comparée dans le temps. Pour certaines mesures, ce ne sont pas les valeurs instantanées qui importent, mais plutôt la valeur moyenne sur une période. Cela exige l'intégration par rapport au temps de la grandeur reçue. Cette intégration est possible soit d'après les enregistrements, soit directement par conditionnement. Nous avons effectué la mesure des valeurs moyennes par conditionnement électronique durant 100ms pour la mesure d'humidité et de 10 minutes pour la mesure de vitesse du vent, le reste des mesures sont toutes instantanées et échantillonnées sur 10 minutes.

Il est à noter que le microcontrôleur a une capacité mémoire RAM de 1kOctets ce qui permet de stocker une donnée de 8 bits à chaque minute, ou bien une donnée de 12 bits (ou 16 bits) à chaque deux minutes, et cela pendant plus de 16 heures.

Pendant la phase d'acquisition, le microcontrôleur fait appel à un sous programme qui est chargé d'orienter le capteur de rayonnement solaire direct vers le soleil. Cette procédure est présentée sur l'organigramme de la Figure.III-10.

Dans cette opération, le microcontrôleur doit d'abord alimenter les moteurs pour qu'ils soient opérationnels. Selon les signaux délivrés par les photo - détecteurs A et AS (**A**zimet et **A**zimet -**S**ite) sur le plan Azimet, le moteur chargé des mouvements d'angle azimet est actionné d'un pas vers le haut ou bien vers le bas, selon l'état des deux photodiodes, jusqu'à une position de stabilité, c'est-à-dire jusqu'à l'obtention d'une même situation de présence ou d'absence des rayons solaires sur les photo -détecteurs A et AS.

De la même manière l'opération sera faite sur le plan site avec les photo -détecteurs S et AS (**S**ite et **A**zimet -**S**ite). Le positionnement de la photodiode AS sur les deux plans, permet d'utiliser trois photo -diodes au lieu de quatre. A la fin des deux opérations, c'est-à-dire que le capteur est bien dirigé vers le soleil, les moteurs sont alors éteints par le microcontrôleur pour économiser l'énergie et diminuer la dissipation de la chaleur autour du montage électronique. Pendant l'extinction des moteurs, la position d'orientation obtenue est maintenue fixe grâce à la bonne conception du système mécanique.

Sa structure est simple et permet une présentation claire de tous les relevés au cours de la journée ou bien même au cours des semaines et des mois et même des dizaines d'années, grâce à la capacité d'enregistrement de l'ordinateur. Le logiciel offre aussi une multitude de formes de présentation par des tableaux de valeurs ou bien par des graphes. La collecte des mesures se fait par une interface de configuration, selon l'intervalle de temps d'échantillonnage, le nombre de grandeurs mesurées, la durée de l'opération de mesure et la vitesse de transmission utilisée, qui sont tous au choix de l'utilisateur. Cette configuration est indispensable pour permettre au logiciel d'identifier et d'analyser les données reçues. Les données sont ensuite emmagasinées dans la mémoire vive de l'ordinateur et peuvent être traitées et affichées sur demande de l'utilisateur. Le logiciel permet aussi l'enregistrement des mesures dans un fichier de petite taille sur disquette ou bien sur le disque dur de l'ordinateur.

Nous avons représenté sur la Figure.III-11, les différentes étapes de traitement suivies par le programme d'acquisition sous forme d'un organigramme. Il possède les principales fonctions qui sont les suivantes :

- Après la configuration du protocole, le logiciel va effectuer le rangement des données en fonction de la date et l'heure d'acquisition. Pour ce faire, le logiciel va identifier octet par octet de chaque paquet du protocole.
- Après avoir relevé la date, l'heure et les minutes, le logiciel procède à la sélection successive des différentes voies de mesure, ce qui permet de connaître, le type de capteur implanté dans chaque voie et le traitement à effectuer conformément à la grandeur que mesure ce capteur. De cette manière, tous les relevés de l'opération de mesure sont traités individuellement.
- Après cela le logiciel doit procéder à la sauvegarde de ces données, en un fichier numérique contenant toutes les informations obtenues. Les sauvegardes doivent permettre de reconstituer les relevées parmi plusieurs jours d'enregistrement d'où la nécessité de lier l'heure et la date des acquisitions aux enregistrements.
- Pour la présentation des mesures, il est nécessaire d'utiliser différentes formes d'affichage, selon le type de grandeur à afficher. Nous utilisons alors un sous-programme, qui va calculer les échelles et les transformations adéquates pour chaque grandeur. les mesures recueillies peuvent être affichées à l'intérieur d'une fenêtre individuelle.

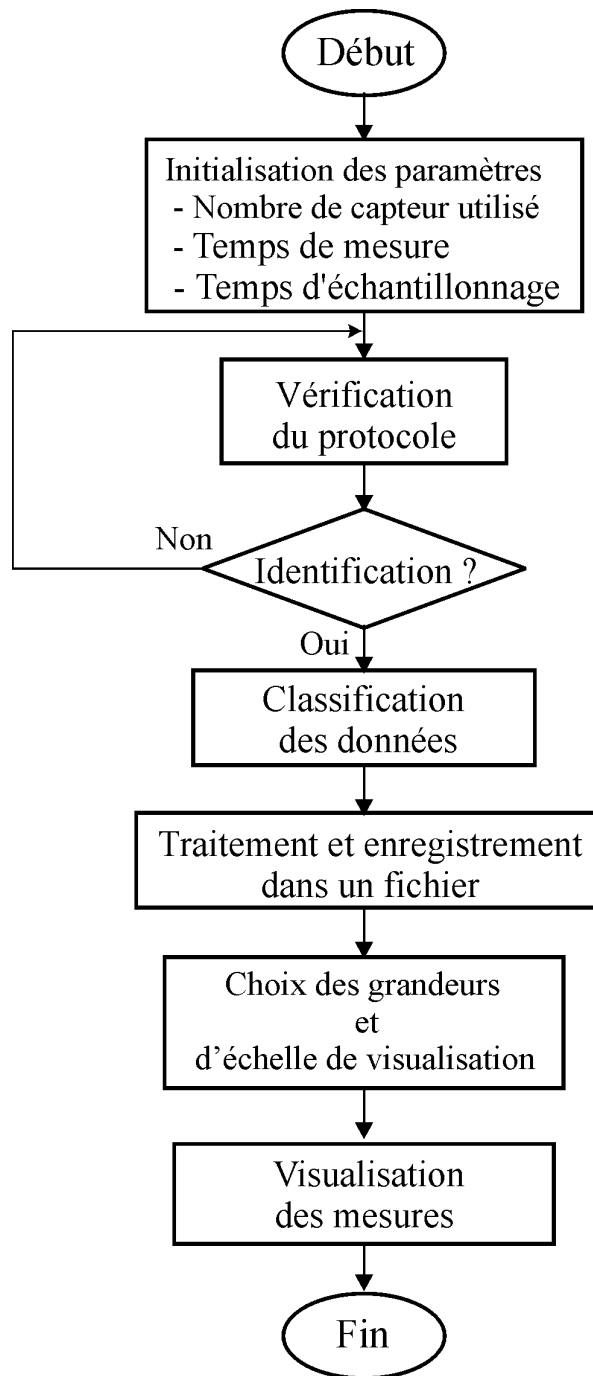


Figure.III-11 : Organigramme du fonctionnement de logiciel SCI_VIEW

V. PRESENTATION DU LOGICIEL SCI_VIEW

Fenêtre principale

La fenêtre principale du logiciel comprend une barre de menu, une barre d'outils, une barre d'état et une palette de configuration composée de deux onglets : un pour la configuration et l'autre pour l'acquisition.

La barre d'outils comprend plusieurs boutons qui permettent une activation rapide des fonctions les plus importantes grâce à l'utilisation de la souris.

La barre d'état, qui se trouve au bas de la fenêtre principale, fournit des informations sur les icônes, les options du menu et les fonctions d'aide.

La palette de configuration, présentée sur la Figure.III-12 et III-13, est le premier élément à manipuler avant de commencer l'opération de réception des données. Dans l'onglet de configuration, on peut indiquer au logiciel les termes choisis et définis dans le protocole de transmission utilisés par le microcontrôleur, précisément: la vitesse de transmission, nombre de grandeurs envoyées, temps d'échantillonnage, la durée de l'acquisition et en fin, indiquer le port série du PC qui est connecté à la carte microcontrôleur.

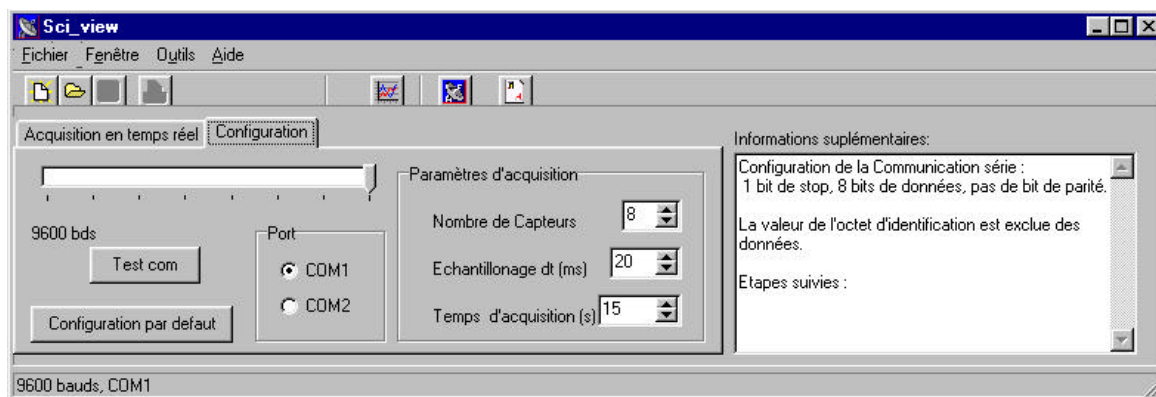


Figure.III-12 : L'onglet de configuration de la palette de la fenêtre principale du logiciel SCI_VIEW

La Figure.III-13 montre la composition de l'onglet d'acquisition. On trouve des critères de choix pour la prévision des grandeurs reçues. A cette phase, Il est demandé à l'utilisateur d'activer l'opération de réception des données en cliquant sur le bouton « Activer ». A ce moment, le logiciel affiche des diagrammes des données reçues au cours de cette opération selon les critères choisis dans l'onglet. Les courbes sont affichées dans une fenêtre supplémentaire, avec le code de couleur identifiant chaque voie. Le nombre de voies affichées peut être sélectionné par l'utilisateur.

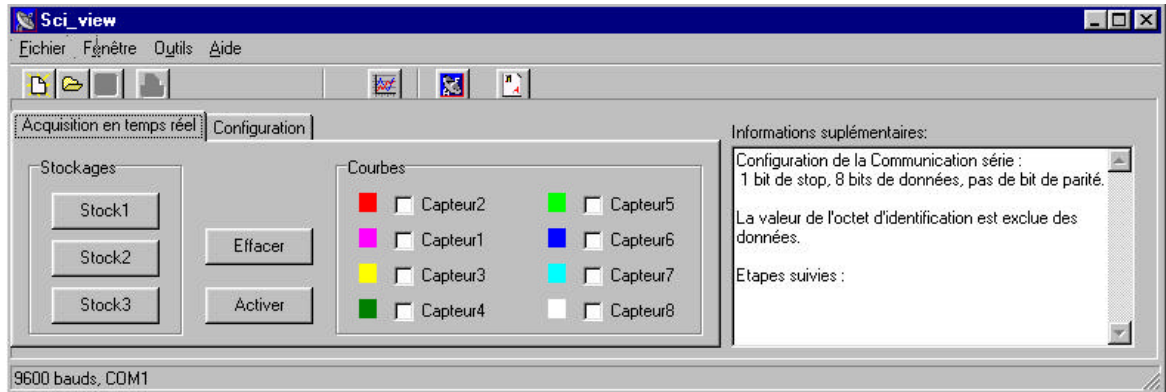


Figure.III-13 : L'onglet d'acquisition de la palette de la fenêtre principale du logiciel SCI_VIEW

La barre de menu comprend toutes les fonctionnalités de logiciel. Elle contient des groupes de commande organisés dans des menus séparés selon la nature des commandes à effectuer.

Menu Fichier

Menu utilisé pour ouvrir des fichiers de données déjà sauvegardés, enregistrer un nouveau fichier et procéder aux opérations d'impression. Ce menu permet aussi de sortir du programme.

Menu Fenêtre

Ce menu est utilisé pour sélectionner les signaux de mesure à visualiser avec choix. Il permet aussi, d'accéder directement aux autres fenêtres du logiciel.

Menu Outils

Il permet d'activer la réception, d'effacer les visualisations et de stocker plusieurs acquisitions pour les comparer. IL permet aussi d'accéder à toutes les fonctionnalités de l'onglet d'acquisition.

Menu Aide (Help)

Ce menu comprend les options d'aide « *aide pour l'utilisation* et *A propos* ». La commande « *utilisation* » permet de décrire les diverses étapes à suivre pour la mise en oeuvre du logiciel et la commande « *A propos* » fournit des informations sur la version du logiciel.

Fenêtre d'affichage graphique

Vu l'importance de la représentation des données de mesure, la fonction d'affichage a été conçue séparément dans une fenêtre indépendante. Elle est présentée sur la Figure.III-14. La zone droite de cette fenêtre possède des « *Radio Buttons* » qui permettent de sélectionner la grandeur à visualiser parmi les autres grandeurs acquises et stockées dans la mémoire. On trouve aussi des « *check Buttons* » qui servent à sélectionner plusieurs acquisitions pour comparés les écarts entre les mesures.

L'échelle des coordonnées permet de représenter les mesures en fonction de temps. Il est automatiquement calculé et limité pour représenter tous les relevés sur toute la durée d'acquisition et selon leur période d'échantillonnage. Pour les abscisses, l'échelle a été laissé libre à modifié d'une manière très simple à partir d'un petit éditeur numérique pour laisser l'utilisateur faire rentré la valeur correspondante au maximum des abscisses voulue pour chaque grandeur prise séparément.

A l'intérieur de chaque graphique, il suffit de pointer la souris sur un point précis de la courbe affichée pour que le temps correspondant se trouve affiché en bas et à droite de la fenêtre avec la valeur de mesure correspondante sur l'échelle des abscisses.

Sur le champ de graphique, une option de zoom se produit également, en faisant une sélection dans le sens gauche à droite de la zone voulu avec le bouton droit de la souris. La sélection en sens inverse permet de revenir à l'état initial. Dans le cas de zoom, la plage affichée du graphique peut être déplacée vers la gauche ou vers la droite, simplement en cliquant à l'intérieur du graphique par le bouton droit de la souris et de maintenir appuyer et glisser vers le sens désiré (droite, gauche, haut ou bas).

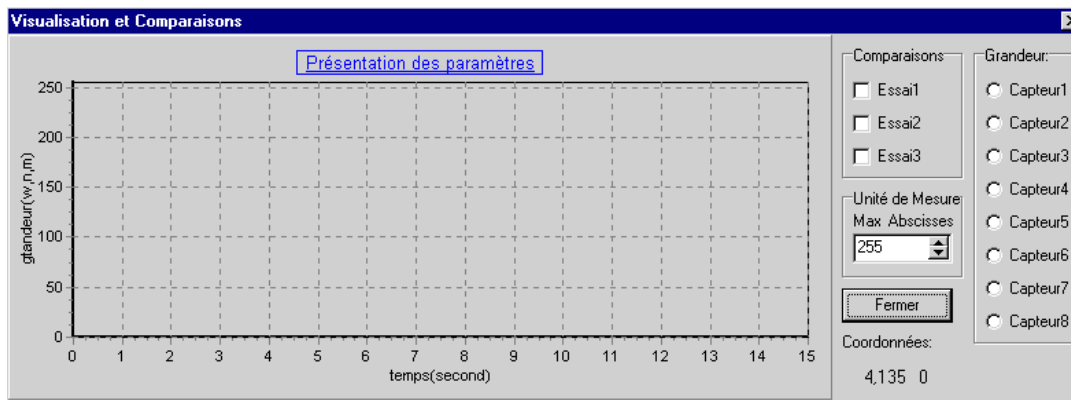


Figure.III-14 : La fenêtre d'affichage graphique du logiciel SCI_VIEW

Résultats et discussions

Dans ce dernier chapitre, nous présentons les résultats obtenus expérimentalement par le système réalisé. Par la suite, nous essayons d'expliquer les allures des courbes et chercher les relations entre les grandeurs mesurées. A la fin de ce chapitre, nous allons terminer par la déduction des avantages et des inconvénients du système.

I. INTRODUCTION

Le rayonnement solaire varie à la fois périodiquement et aléatoirement durant l'année. Les variations périodiques se font au rythme des saisons et des jours qui sont dues aux variations respectivement de la déclinaison et de la hauteur du soleil au dessus de l'horizon, tandis que les fluctuations aléatoires sont surtout causées par les troubles atmosphériques. Le système que nous avons réalisé est capable de mesurer le rayonnement solaire global et ces composantes à chaque 10 minutes, et sur une durée journalière de 16 heures. Nous avons accompagné ces mesures par les mesures des grandeurs atmosphériques mentionnées dans les chapitres précédents. L'enregistrement des mesures permet de comparer les résultats de mesure sur différents jours.

II. PRESENTATION ET INTERPRETATION DES MESURES

II.1 Mesure du rayonnement solaire

La densité du rayonnement solaire dépend de la latitude, saison, conditions climatiques et de l'albédo du sol au voisinage de l'endroit où s'effectue la mesure. La Figure.IV-1 montre la mesure d'une journée bien ensoleillée, en ciel clair.

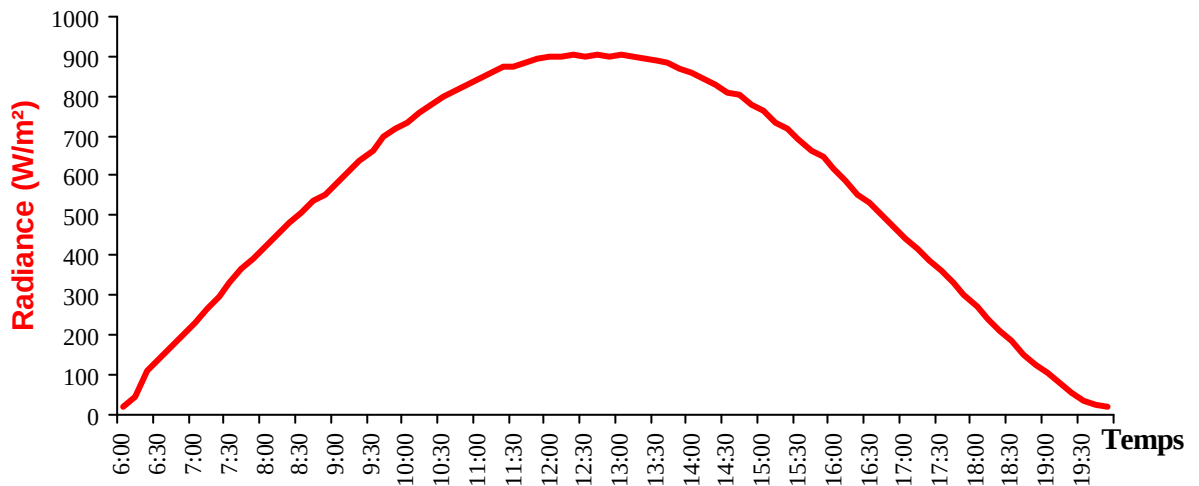


Figure.IV-1 : Le rayonnement solaire global en ciel clair (mesuré le 01 Juin 2004)

Lorsque le ciel est couvert par des nuages, ces derniers sont des forts atténuateurs de rayonnement solaire, toutes les radiations qui parviennent à travers ces nuages, apparaissent comme une énergie diffusée. Cette atténuation varie en fonction du type de nuage (cirrus : nuage de haute altitude, cumulonimbus : nuage très noire d'une grande épaisseur verticale,...etc.). La partie inférieure des nuages réfléchit le rayonnement solaire vers la terre, qui était lui-même réfléchi vers les nuages à partir de la surface du sol: Cette

réflexion multiple augmente l'intensité du rayonnement diffus. Pour un ciel très nuageux, la totalité des radiations solaires est diffusée.

La Figure.IV-2, montre une atténuation due au passage d'un nuage Stratocumulus (qui s'étendent en une vaste couche horizontale). La Figure.IV-3, montre un autre passage d'un nuage de même type. On remarque ici, la grande atténuation du rayonnement solaire direct par rapport à celle observée dans le rayonnement diffus. On remarque aussi, sur le même graphe, un pic qui apparaît juste après le passage de nuage. L'apparition du pic implique que le capteur SP1110 possède un défaut de mesure lors d'une variation rapide de l'intensité de rayonnement.

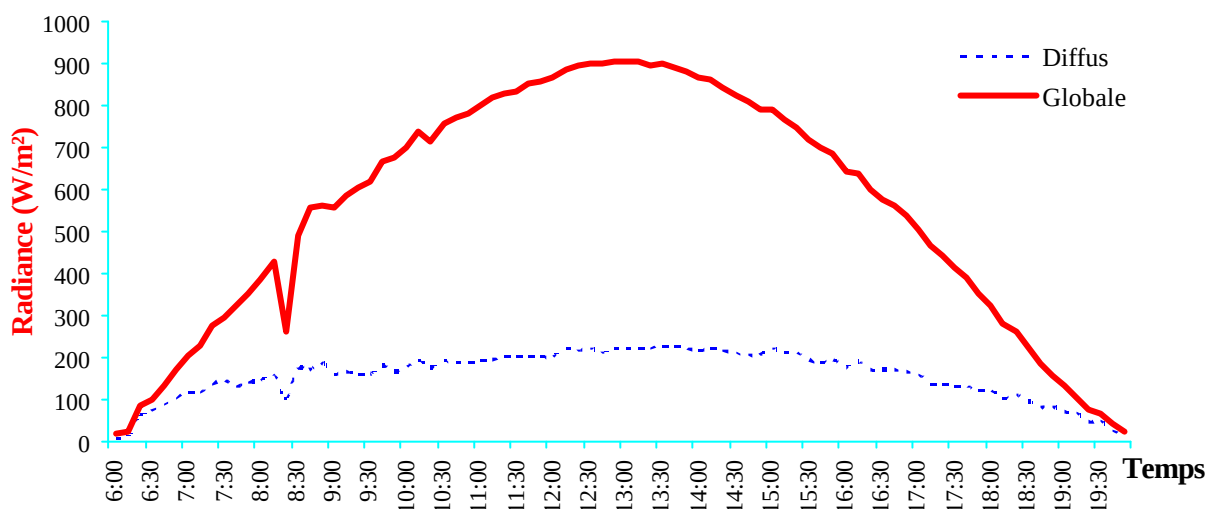


Figure.IV-2 : Variation de Rayonnement diffus et global (mesuré le 06 Juin 2004)

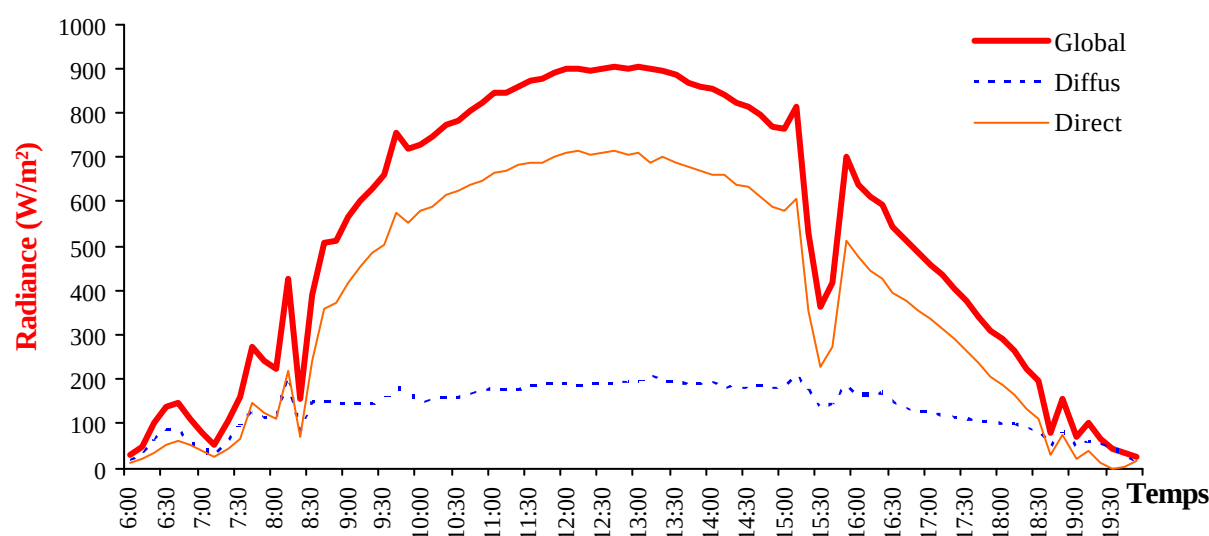


Figure.IV-3 le Rayonnement direct, diffus et global (mesuré le 03 Juin 2004)

II.2 Influence des autres grandeurs mesurées

La mesure de quelques grandeurs atmosphériques, permet d'observer leur évolution et de surveiller leur influence sur le rayonnement solaire au cours de la journée.

L'humidité dans l'atmosphère agit fortement sur l'absorption et la diffusion de rayonnement solaire. La Figure.IV-4 montre que le taux d'humidité peut être élevé dans le bon matin ou à la fin du soir ce qui affaiblit l'intensité du rayonnement solaire direct et augmente le rayonnement diffus. L'air devient moins saturé dans le midi quand le jour est bien ensoleillé à cause de l'élévation de la température.

En réalité, le taux d'humidité ne dépend pas seulement de la température mais aussi de la présence des grandes surfaces d'eau (Mer, océan, lac, ...etc.) et plus considérablement encore par l'air porté par le vent.

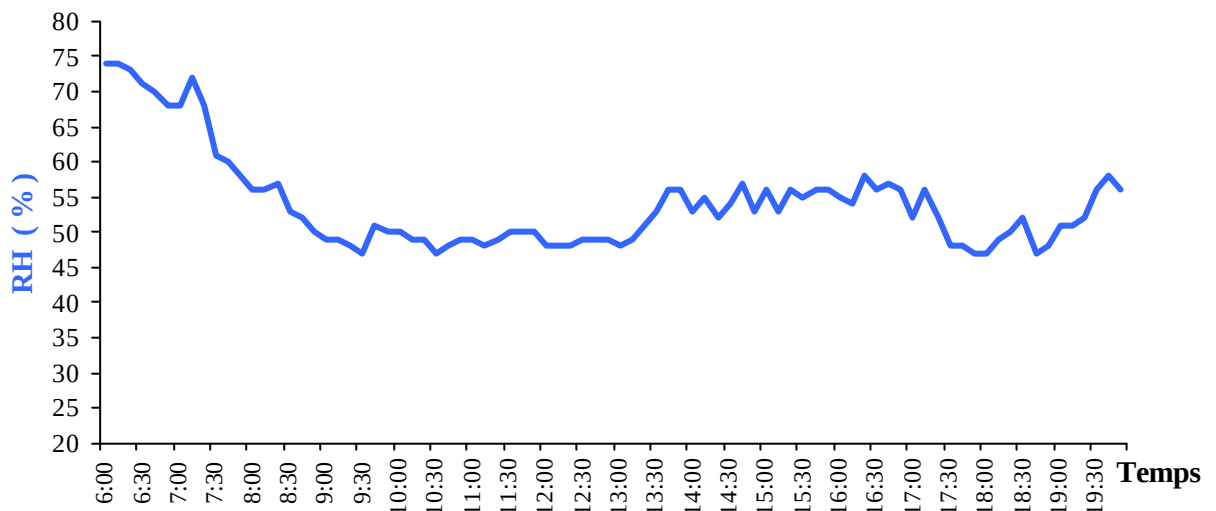


Figure.IV-4 : Variation de taux d'humidité de l'air (mesuré le 06 Juin 2004)

La pression atmosphérique exprime la densité de l'air dans l'atmosphère, c'est-à-dire la quantité des molécules d'air présent sur un volume donné. Les mesures de la Figure.IV-5 avec celles du rayonnement montrent plutôt qu'une élévation d'intensité du rayonnement implique une élévation de pression. En réalité c'est le rayonnement solaire qui influe d'une manière indirecte sur la pression atmosphérique. Dans la Figure.IV-6 on observe l'augmentation de la température ambiante dû par la croissance d'intensité de rayonnement solaire sur la même journée. Comme il est connu dans les lois physiques l'élévation de température est la cause directe des changements de pression de l'air. La Figure.IV-7 montre clairement la dépendance de la pression atmosphérique avec la température de l'air.

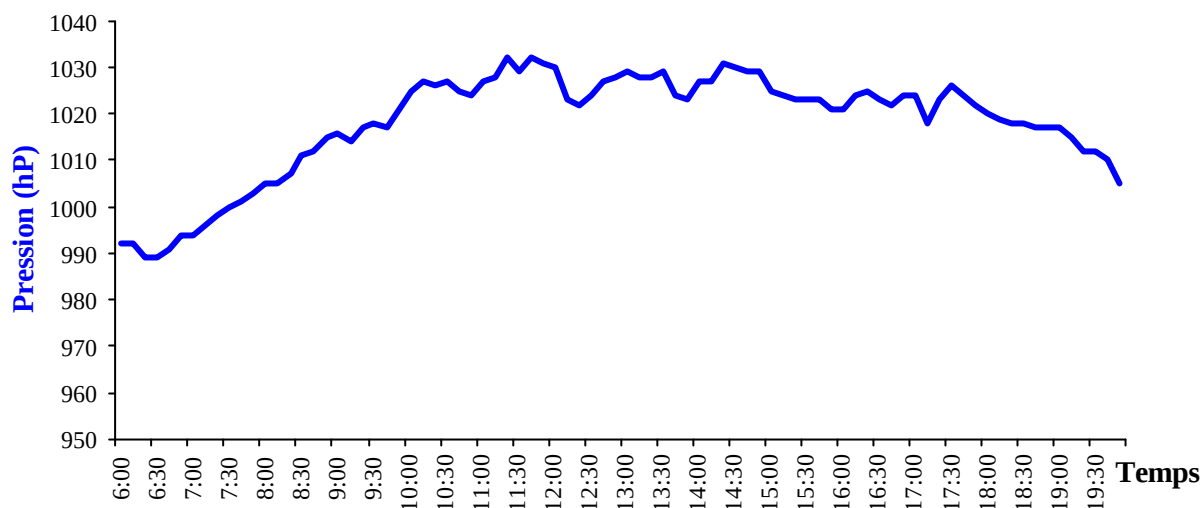


Figure.IV-5 : Variation de la pression atmosphérique (mesurée le 06 Juin 2004)

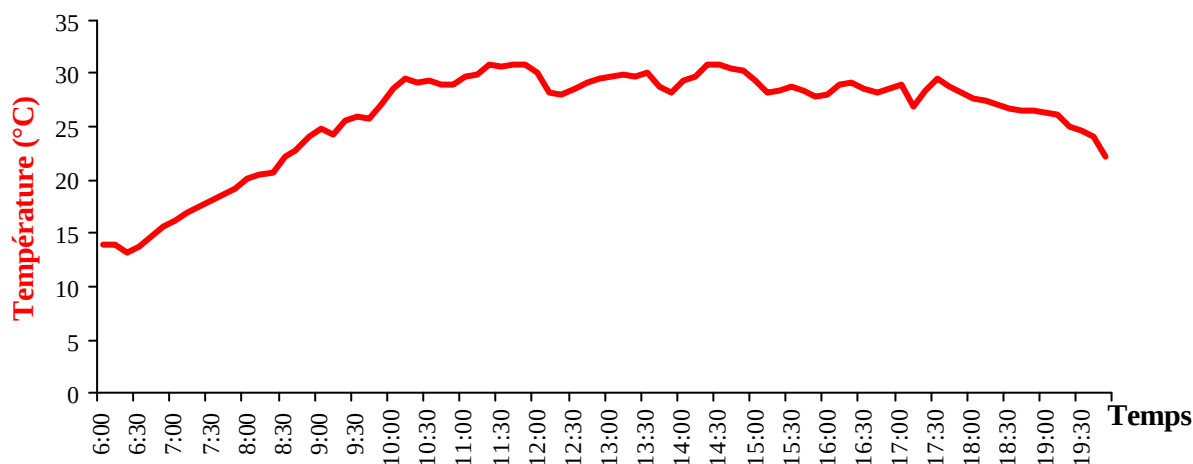


Figure.IV-6 : Variation de la température ambiante (mesurée le 06 Juin 2004)

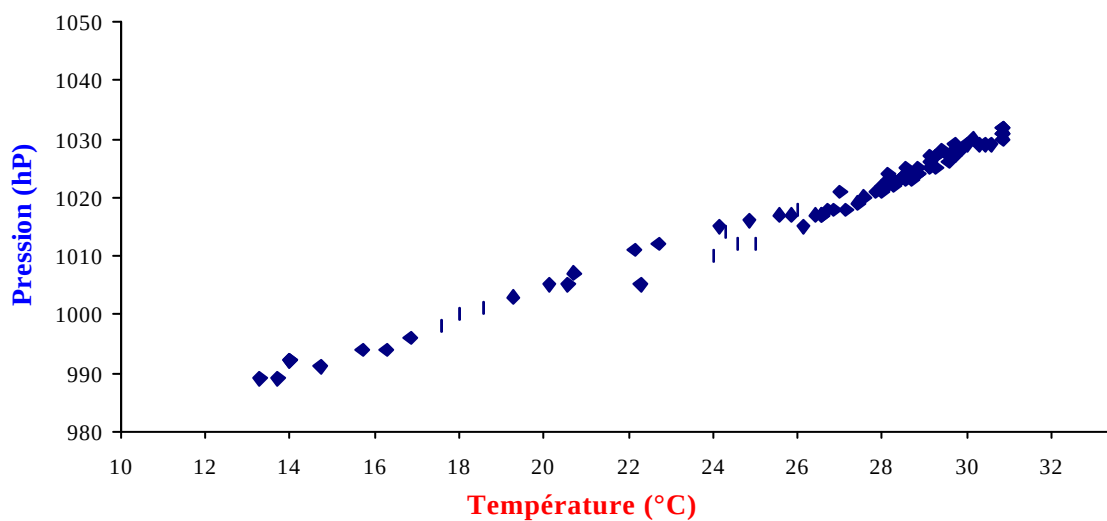


Figure.IV-7 : Variation de la température ambiante en fonction de la pression atmosphérique (mesuré le 06 Juin 2004)

Le rayonnement solaire n'est que peu atténué par une augmentation de pression atmosphérique. Par contre, si l'air est plein des aérosols et poussière, l'atténuation des irradiances solaires, est sensible.

La vitesse du vent mesuré par un appareil «PM6303 - RCL meter » et observée parallèlement avec les mesures précédentes. Elle été très faible et ne dépasse pas 0,5 m/s.

III. QUALITE DES MESURES

Les mesures d'humidité et de température ont été comparées avec celles effectués par un appareil (humidimètre- thermomètre type PM6303 – RCL meter) à des instants bien définis dans la journée. Et cela pour vérifier la fidélité des mesures. Et si nécessaire, l'ajustement des mesures est possible par les potentiomètres multi- tours de la carte.

L'erreur systématique due par les défauts de l'instrument de mesure (capteurs + chaîne de traitement) est une erreur globale et reproductible dans des conditions expérimentales identiques. L'utilisation des appareils robustes pour l'étalonnage est fortement souhaitable.

Le capteur et toute la chaîne de traitement de la mesure introduisent des erreurs : bruit, dérive, référence, linéarité...etc. L'erreur globale de mesure ne peut être calculée. En revanche, L'opération de mesure se termine par l'obtention d'un nombre, il est plus facile de connaître la perte d'information. On peut rapportées des barres d'erreurs sur les profils qui peuvent être déduites de l'écart type calculé entre les mesures obtenues et celles d'un appareil étalon sur les même instants.

Les sources de ces erreurs sont multiples, nous citons principalement l'influence de la température qui est souvent importante, les dérives produit dans la chaîne de mesure liée à la stabilité et la précision des composants utilisés, erreur de conversion analogique / numérique, l'effet hystérésis des capteurs utilisés et leur vieillissement qui dégrade leur caractéristique.

En Electronique il est plus important de concevoir où d'utiliser un capteur de faible bruit que d'utiliser une chaîne de mesure (amplification) de faible bruit. Les capteurs utilisés dans notre système de mesure possèdent une forte sensibilité à la grandeur mesurée vis à vis leur bruit interne, se qui satisfait une bonne précision de mesure sans remédié au influence de ce bruit.

Pour la mesure du rayonnement, celle-ci est toujours délicate, plusieurs sortes d'absorptions, filtres et réflexions peuvent imposés leur effet sur la mesure, la couche extérieur du capteur doit être étudiée et analysée notamment sur sa sélectivité spectrale.

Il existe d'autre source d'erreur qui on résulte de la partie mécanique de système principalement due aux erreurs de liaisons : les jeux et les frottements.

Toutes ces causes d'erreurs limitent la précision des mesures. Les techniques mécaniques et la conception exigeant des manipulations délicates et un entretien soigneux.

La précision des mesures comparées aux celles obtenues par l'appareil « PM6303-RCL meter » est satisfaisante. En outre les grandeurs atmosphériques varient lentement et en permanence, la haute précision des mesures en météorologie, est généralement n'est pas exigée.

IV. LA MESURE DU RAYONNEMENT PAR UNE CELLULE SOLAIRE

Nous avons vu dans le chapitre II, que théoriquement le courant de court circuit d'une cellule solaire suit linéairement les variations de l'intensité d'irradiation solaire au dessus de sa surface. Nous avons effectué la mesure de courant de court circuit I_{cc} d'une cellule solaire monocristallin de type BPX42. La Figure.IV-8 montre le résultat de mesure de ce modèle de cellule solaire

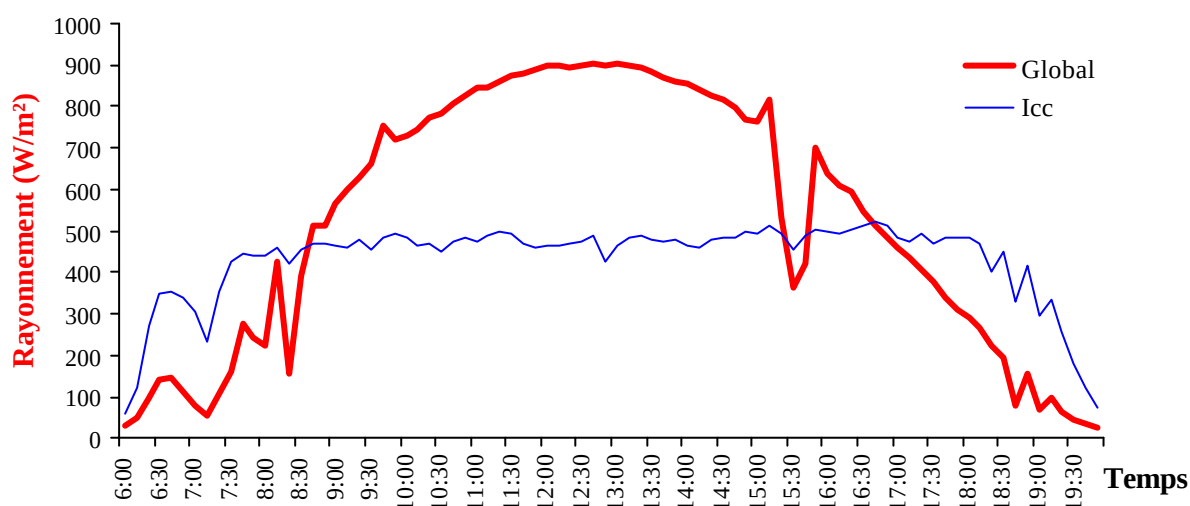


Figure.IV-8 : Variation de courant de court circuit avec l'intensité de rayonnement solaire global (mesuré le 03 Juin 2004)

Le graphe de courant de court-circuit de la cellule, montre aussi une légère dissymétrie de la courbe (matin – après-midi), celle ci peut être due aux influences des autres paramètres météorologiques qui diffèrent entre le matin et l'après-midi.

Cette dépendance du courant de court-circuit n'est pas parfaite comme le montre la Figure.IV-9, d'autre cellule répond différemment que la cellule utilisée [Youcef Ettoumi, 2002]. Il y a plusieurs influences qui dégradent cette linéarité dont nous citons :

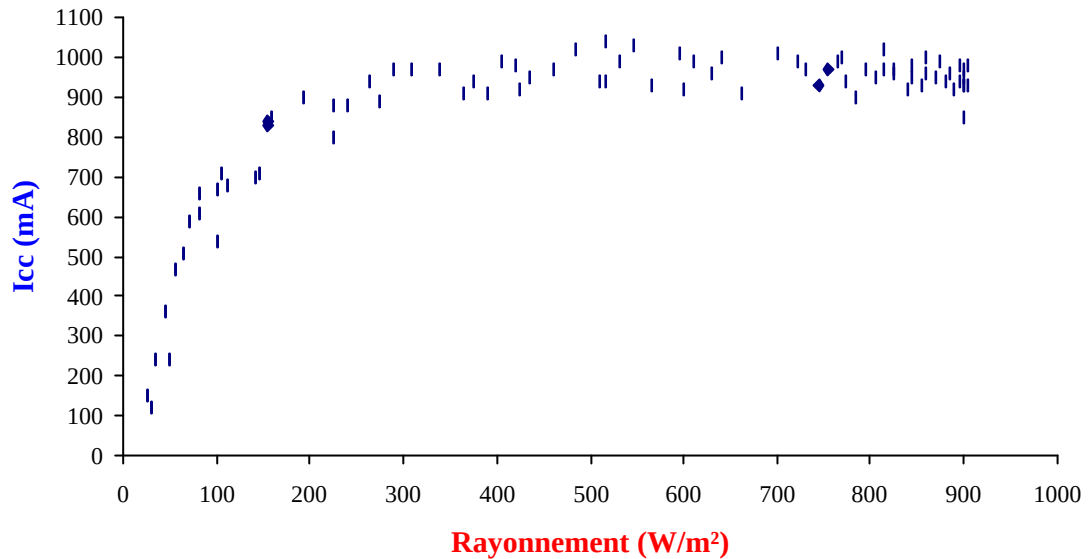


Figure.IV-9 : Variation de courant de court circuit en fonction de l'intensité de rayonnement solaire global (mesuré le 03 Juin 2004)

⇒ *Effet de la sensibilité spectrale*

Une connaissance précise de la distribution de l'énergie contenant dans le rayonnement solaire est importante dans le domaine de l'énergie solaire. C'est parce que les cellules solaires répondent différemment à différentes longueurs d'onde de spectre. Ceci signifie que des quantités égales d'énergie solaire arrivant dans différentes régions spectrales produisent différents signaux pour une même cellule. Ainsi, comme la distribution spectrale est différente pour différente masse d'air (plus d'atténuation de rayonnement dans certaines longueurs d'onde), la cellule produit des erreurs relatives à ces changements dans le spectre.

La sensibilité des mesures varie selon la distribution de l'énergie dans la bande spectrale de la cellule solaire. Ainsi, la distribution spectrale de rayonnement solaire incident dépend de la hauteur du soleil au dessus de l'horizon et aussi de la composition de l'atmosphère. Les nuages modifie le spectre solaire notamment l'ultraviolet et l'infrarouge, et cela selon le nombre des nuages et leur épaisseur [Nann et Riordan, 1990 ; Chenlo et al, 1990 ; Harry et al, 1998].

Pour améliorer l'erreur due par la réponse spectrale de la cellule solaire, il se peut introduire un facteur de correction en fonction des conditions environnementales (poussière, humidité, ...etc.) [Field, 1997].

L'atténuation des rayonnements solaires dans l'atmosphère, dépend alors fortement du facteur « AM ». L'équation (1-16) montre comment déterminer la valeur de la masse d'air (AM), néanmoins, la méthode la plus simple pour estimer cette valeur est de mesurer la longueur d'ombre L_0 d'une structure verticale d'une hauteur z :

$$AM = \sqrt{1 + \left(\frac{L_0}{z} \right)^2} \quad (4-1)$$

Si on veut convertir la mesure de l' « AM » en des valeurs énergétiques en W/m^2 , les conversions ne seront pas exactes. Cela est notablement dépendu au nombre de molécules turbides (atténuantes) dans l'atmosphérique. Par exemple, le standard scientifique accord que l'AM1,5 est de $1000W/m^2$ à $25^\circ C$. Cette valeur est artificielle, des mesure plus réalistes pour l'AM1,5 donnent $768W/m^2$ pour le rayonnement direct (sans le diffus) et $963W/m^2$ pour le global [Nicholas et Ekins, 1999; Emery et al, 2002 ; Faiman et al, 2002].

⇒ *Effet de l'angle d'incidence*

La réponse angulaire d'une cellule solaire, est le paramètre le plus important qui fait sensiblement la différence entre la mesure d'une cellule solaire et celle d'un Pyranomètre étalon. Ce paramètre n'est pas forcément symétrique [King et al, 1997; Balenzategui et F.chenlo, 2005].

Il est clair que l'irradiation reçue dans une surface, varie en fonction de cosinus de l'angle de la direction de faisceau d'irradiation et la normale de la surface. Dans le cas d'une cellule solaire placée horizontalement sur la surface terrestre, la dépendance de courant de court circuit I_{cc} en fonction de l'éclairement peut s'exprimer par la relation suivante :

$$I_{cc} = \frac{I_0}{E_0} \cdot E \quad (4-2)$$

Où : I_0 est le courant de court circuit mesuré à une irradiation E_0 à 90° ,

Si l'angle d'incidence (hauteur de soleil h) varie, le courant suit la loi de sinus :

$$I_{cc} = \frac{I_0}{E_0} \cdot E \cdot \sin(h) \quad (4-3)$$

Il se peut que cette réponse en sinus, soit modifiée par les propriétés optiques de la surface de la cellule. Il est bien clair qu'il y a plusieurs sources de déformation de cette variation en sinus. Certain sont liées à la morphologie de la structure du surface de la cellule et d'autres liées aux pertes par réflexion. La surface de la cellule est un facteur considérable qui influe sur les propriétés opto- électrique et la réponse angulaire de la cellule [Beltowska-Lehman et al, 2000 ; Saha et al, 1992 ; Jianming et al, 2005]

⇒ *Effet du vent*

Le vent est facteur important pour protéger les Pyranomètre à thermocouple, car ce dernier refroidit le voisinage du capteur et par conséquent modifie les vraies valeurs de mesure. Mais pour une cellule solaire, l'effet du vent est très négligeable, on se satisfait de préférence, par l'étude de l'influence de la température sur la cellule.

⇒ *Effet de la température*

Le changement de température est une cause primordiale de l'erreur de calibration des appareils de mesure de rayonnement. Pour les cellule photovoltaïque mono et multi cristallin de silicium, le coefficient de température (en % / °C) est positive pour le courant de court circuit mais avec de faible valeurs (<0,2%/°C). Par conséquence, la pente de la droite des variations du courant de court-circuit avec le rayonnement solaire augmente avec la température de la cellule [Whitaker et al, 1991].

Pour mesurer la température de la cellule (la température de jonction) nous pouvons employer un procédé, connu sous le nom de NOCT « normal operating cell temperature ». Le NOCT est mesuré à une température de fonctionnement dite 'nominale' de la cellule. Il est généralement donné par le constructeur. De ce procédé, on utilise la température ambiante T_a et le rayonnement solaire global G^* pour estimer la température de Jonction de la cellule solaire [Youcef Ettoumi et Adane, 2000 ; Benatlallah et Mostefaoui, 2002] :

$$T_j = T_a + \left(\frac{Noct - 25}{1000} \right) \cdot G^* \quad (4-4)$$

La Figure.IV-10 présente les variations de la température au-dessous de la cellule solaire, et la Figure.IV-11 montre les variations de cette dernière en fonction de courant de court circuit de la cellule. On peut déduire la valeur du NOCT à partir des mesures expérimentales qui déterminent les autres paramètres de l'équation (4-4).

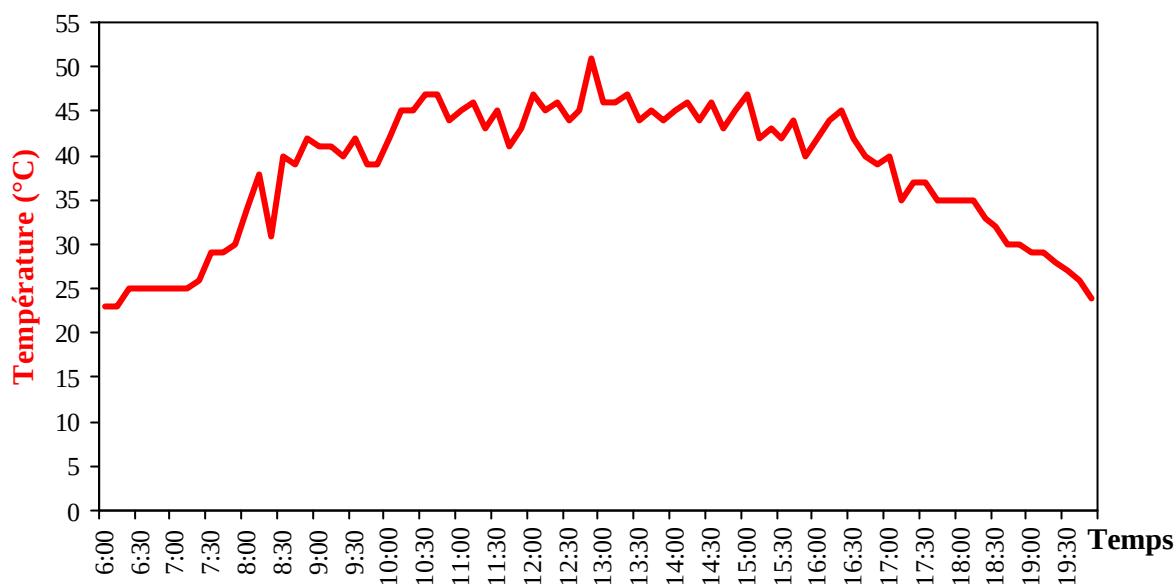


Figure.IV-10 : Variation de la température au dessous de la cellule solaire (mesurée le 03 Juin 2004)

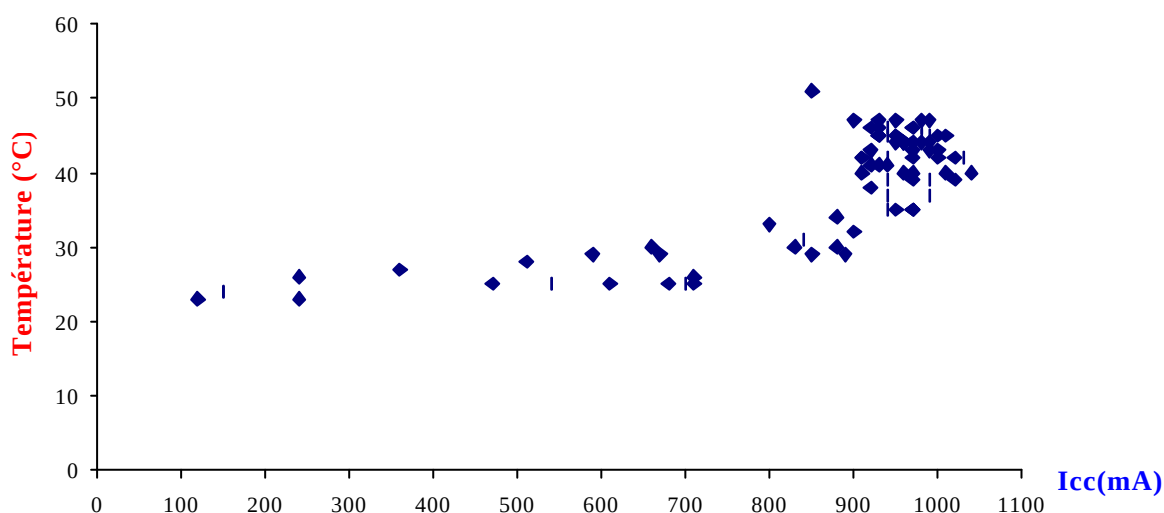


Figure.IV-11 : Variation de la température avec le courant de court circuit de la cellule (mesuré le 03 Juin 2004)

⇒ *Effet de l'Albédo de la terre*

Autre facteur qui peut fausser l'étalonnage des mesures, non seulement pour la cellule solaire, mais aussi pour les Pyranomètres étalonnés. La réponse de la cellule solaire dépend de degré et de la nature de réflectivité de la surface terrestre (albédo). En modifiant le spectre réfléchi par la terre, l'albédo influe sur la densité du rayonnement notamment le diffus, et indirectement sur la réponse de la cellule. Cette erreur est due par la sensibilité spectrale qui été déjà expliquée précédemment.

V. CONCLUSION

Le système a été réalisé dans le but de caractériser une structure générant moins de perturbations sur les capteurs, dont l'acquisition est simultanée sur toutes les grandeurs. L'utilisation d'une structure ayant ces propriétés est importante pour réduire les sources d'erreur de mesure. On a observé des fortes dépendances du rayonnement solaire avec les divers paramètres essentiellement atmosphériques. En outre le fait que, l'énergie du rayonnement solaire est distribuée sur plusieurs longueurs d'ondes, évidemment, il est difficile à mesurer les changements énergétiques de l'ensemble des ondes de spectre solaire. On ne peut le faire qu'avec un capteur qui possède parfaitement la même réponse linéaire sur toutes les longueurs d'ondes du spectre, et qui satisfait d'autre part, certaines conditions physiques liées à la directivité des rayons solaires. Il est quasiment impossible et inexistant à temps actuel de trouver un capteur photoélectrique qui possède parfaitement ces caractéristiques.

La mesure du rayonnement solaire par une cellule photoélectrique, nécessite plusieurs expérimentations et tests sous différentes conditions naturelles. Les principales sources de dégradation du signal de mesure d'une cellule photoélectrique sont celles de température, angle d'incidence et la réponse spectrale de la cellule. En fin, et pour plus de satisfaction, il est vivement souhaitable d'effectuer des tests sur différents modèles de cellule solaires.

CONCLUSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVES

L'objectif de ce travail est de découvrir les techniques et les procédés utilisés pour la mesure du rayonnement solaire et de certaines grandeurs météorologiques.

Après avoir passé en revue, dans le chapitre 1, les différents aspects et notions utilisés pour la description du rayonnement solaire ainsi que les phénomènes qui se produisent lorsqu'ils traversent la couche atmosphérique. Nous avons décrit dans le chapitre 2 et 3, la conception puis la réalisation d'un système d'acquisition à base de microcontrôleur, pour mesurer plusieurs grandeurs en même temps.

Le système de mesure réalisé est composé par des capteurs étalons et des périphériques électroniques et informatiques pouvant recueillir, traiter et afficher les mesures sur une longue durée. Il nous a permis de mesurer les composantes directe, diffuse et globale du rayonnement solaire, ainsi que quelques paramètres météorologiques.

Les capteurs utilisés, sont fiables et de une bonne précision. Le circuit électronique réalisé, nous a permis de faire les tests de laboratoire pour étudier la faisabilité et la fidélité du système dans les conditions réelles. Les mesures ainsi obtenues ont une bonne précision puisqu'elles sont en accord avec celles obtenues par un appareil étalon (RCL meter).

Comme nous l'avons vu au chapitre 4, les grandeurs mesurées varient sans cesse au cours de la journée. La corrélation entre différentes grandeurs est une caractéristique visible sur les courbes obtenues. La plus forte corrélation observée est celle de la température avec la pression atmosphérique ce qui est en corroboration avec les principes de la science physique.

La mesure du rayonnement solaire à l'aide d'une cellule solaire associée à une très faible résistance de charge, est une solution auxiliaire qui nécessite plusieurs expérimentations pour préciser les erreurs de mesures résultantes essentiellement de la température, de l'angle d'incidence des rayonnements et des changements sur le spectre solaire.

Cependant les cellules solaires sont fabriquées selon une technologie très variée, mais aucune cellule solaire commercialisée n'est à l'heure actuelle capable de fonctionner avec des performances robustes.

En plus, les capteurs de rayonnements d'une manière générale, souffre de certains problèmes liés aux phénomènes de condensation, d'absorption, de sensibilité à la poussière, de vieillissement et d'inertie qui ne sont pas encore résolus d'une manière parfaite.

Le système a permis d'observer l'évolution des grandeurs mesurées sur plusieurs jours. Les observations ont été interprétées pour différentes conditions météorologiques. Néanmoins, il est parfois, difficile d'expliquer certaines allures et leurs origines, car en réalité ces grandeurs résultent de plusieurs autres phénomènes météorologiques compliqués et difficiles à caractériser.

L'association de l'électronique et de l'informatique a permis de créer des fonctionnalités d'acquisition et de traitement impressionnantes pour l'analyse rapide des travaux de recherches. Cette association fait, elle-même, un objet de recherche afin de proposer des systèmes offrant de meilleures performances que les systèmes d'acquisitions actuels.

La chaîne d'acquisition que nous avons réalisé, peut être amélioré pour augmenter la capacité d'acquisition, réduire le temps d'échantillonnage et prolonger la durée globale d'acquisition. Ainsi, on peut atteindre une année d'acquisition sans intervention humaine, si on utilise une puce de mémoire de quelques dizaines de Méga Octets.

A la suite de cette expérimentation, notre réalisation est proposée pour effectuer des mesures au sud algérien à Tamanrasset, ce qui permettrait d'examiner encore les résultats obtenus sur d'autres conditions, et de construire une base de données sur différents endroits.

Il est à noter que notre système d'acquisition est un système dynamique puisque ces différentes parties peuvent être modifiées étant donné qu'elles sont construites séparément. A partir des résultats exposés, nous espérons améliorer encore l'optimisation de notre prototype et concevoir des instruments similaires plus autonomes et qui répondent aux besoins de la recherche scientifique. Enfin, il est nécessaire de préciser que ce travail constitue une base pour d'autres travaux tels que l'exploitation de nos données dans l'étude des systèmes énergétiques.

RÉFÉRENCES

- N. Ababou, **A. Lahmissi**, A. Ababou, et A. Belloula.
« **Chaîne de mesure a micro-contrôleur pour des peaux artificiels piezo-résistives** »
La 3^{ème} conférence sur le Génie Electrique, Bordj EL Bahri 15 – 16 Février 2004.
Ecole Militaire Polytechnique de Bordj EL Bahri, Alger.
- K.-M. Aye, P.M. Chadwick, C. Hadjichristidis, M.K. Daniel 1 , I.J. Latham, R. Le Gallou, J.C. Mansfield, T.J.L. McComb, J.M. McKenny, A. Noutsos, K.J. Orford, J.L. Osborne, and S.M. Rayner.
« **Atmospheric Monitoring For The H.E.S.S. Project** »
The 28th International Cosmic Ray Conference, 2003.
© 2003 by Universal Academy Press, Inc. pp. 1–4.
- J.L.Balenzategui, F.chenlo.
“**Measurement and analysis of angular response of bare and encapsulated silicon solar cells**”.
Solar Energy Materials and Solar Cells, Volume 86, Issue 1, 15 February 2005, Pages 53-83.
- Beghyn, B.
« **Le microcontrôleur 68HC11** »
Editions : Hermès -1997.
- E. Beltowska-Lehman, Z. Swiatek, M. Lipinski, P. Panek, T. Zdanowicz, F. Krok, R. Ciach.
« **The influence of surface modification on optoelectronic properties of monocrystalline silicon solar cells** »
Photovoltaic Specialists Conference, 2000. Conference Record of the Twenty-Eighth IEEE , 15-22 Sept. 2000, Pages:85 – 88.
- A. Benatlallah, R. Mostefaoui.
« **Logiciel de Simulation P.V** »
Revue des Energies Renouvelables. Zones Arides (2002), pages : 55-61

- R. Bernard, G. Mengue, M. Schwartz.
« **Le rayonnement solaire – conversion thermique et applications** »
TECHNIQUE & DOCUMENTATION LAVOISIER, 2^{ème} EDITION, 1980.
- Brichambaut. Ch.Perrin.
« **Rayonnement solaire et échanges radiatifs naturels** »
GAUTHIER-VILLARS, Paris VI, 1963.
- Charles, J, P ; Haddi, A; Maouad,A ; Bakhtiar, H ; Zerga, A ; Hoffmann, A ; Mialhe, P.
« **La jonction, du solaire à la Microélectronique** »
Revue des Energies Renouvelables. Volume : .3 (2000) Pages : 1-16.
- F. Chenlo, N. Vela, J. Olivares.
« **Comparison between pyranometers and encapsulated solar cells as reference PV sensors-outdoor measurements in real conditions** »
Photovoltaic Specialists Conference, 1990. Conference Record of the Twenty First IEEE, 21-25 May 1990, pages: 1099 – 1104.
- J.T. Coutts, J.D. Meakin.
« **Current topics in photovoltaics. VOLUME 4** »
ACADEMIC PRESS - Harcourt Brace Jovanovich, Publishers, New York, 1990.
- A. J. Cox, Alan J. DeWeerd, and Jennifer Linden.
« **An experiment to measure Mie and Rayleigh total scattering cross sections** »
© 2002 American Association of Physics Teachers. *Am. J. Phys.*, Vol. 70, No. 6, June 2002, page 620 - 625.
- B. David.
« **Optimisation of strain-compensated multi-quantum well solar cells** »
Thesis Submitted for the degree of Doctor of Philosophy of the University of London Imperial College of Science, Technology and Medicine, January 2003
- K. Emery, J. Delcueto and w. zaaiman
« **Spectral corrections based on optical Air Mass** »
Photovoltaic Specialists Conference, 2002. Conference Record of the Twenty-Ninth IEEE , 19-24 May 2002. Pages: 1725 - 1728
- D. Faiman, A. Kamiell, N. Ninari, V. Melnichak and S. Jacob.
« **Using a natural AM1.5G spectrum to help define an AM1.5D spectrum appropriate for CPV purposes** »
Photovoltaic Specialists Conference, 2002. Conference Record, Pages: 927 – 930

- H. Field.
« Solar cell spectral response measurement errors related to spectral band width and chopped light waveform »
Photovoltaic Specialists Conference, 1997. Conference Record of the Twenty-Sixth IEEE , 29 Sept.-3 Oct. 1997, pages:1113 – 1116
- A. Georgiev, P. Roth and A. Olivares.
« Sun following system adjustment at the UTFSM »
Energy Conversion and Management, Volume 45, Issues 11 -12, July 2004, Pages 1795-1806,
- A. Halimi.
« Rayonnement solaire et observation Météorologique »
Office des publications universitaires, Alger, 1986.
- A.M. Green.
« Solar cell : Operating principles, technology, and system application».
Prentice, Inc. 1982. Englrwood Cliffs, N.J. 07632.hotosynthetically Active Radiation
- Harry D. Kambezidis and Anastassios D. Adamopoulos.
« A comparison of spectral total atmospheric transmission between summer and winter in Athens, Greece ».
National Observatory of Athens, 1998.
- Y. Hishikawa, Y. Imura, T. Oshiro.
« Irradiance-dependence and translation of the I-V characteristics of crystalline silicon solar cells »
Photovoltaic Specialists Conference, 2000. Conference Record of the Twenty-Eighth IEEE , 15-22 Sept. 2000. Pages:1464 – 1467
- Jianming Li, Ming Chong, Liqing Yang, Jiadong Xu, Xiao-Feng Duan, Min Gao, Feng-Lian Wang, Haitao Liu, Li Bian, Xun Chi and Yonghui Zhai
« A new technique for boosting efficiency of silicon solar cells »
Solar Energy Materials and Solar Cells, Volume 86, Issue 4, 1 April 2005, Pages 585-591
- King, D, L.; Kratochvil, J, A.; Boyson, W, E.
« Measuring solar spectral and angle-of-incidence effects on photovoltaic modules and solar irradiance sensors »
Photovoltaic Specialists Conference, 1997, Conference Record of the Twenty-Sixth IEEE , 29 Sept.-3 Oct. 1997, pages:1725 – 1728.

- A. Khireddine, K. Benmahammed.
« **Méthodologie de Correction de Rayonnement Solaire** »
Revue des Energies Renouvelables. Volume : .4 (2001), pages 79-87.
- A. Lahmissi, F. Youcef Ettoum, N. Ababou et A. Ababou.
« **Banc didactique pour étudier le climat dans des TP de physique** »
Symposium national sur la recherche et l'innovation en éducation.
INRE 24-26 Février 2004
- M. Mottus, J. Ross, M. Sulev.
« **Experimental study of ratio of PAR to direct integral solar radiation under cloudless conditions** ». (PAR) : Photosynthetically Active Radiation
Agricultural and Forest Meteorology, Volume 109, Issue 3, 3 September 2001, Pages 161-170
- S. Nann, C. Riordan.
« **Solar spectral irradiance under overcast skies [solar cell performance effects]** »
Photovoltaic Specialists Conference, 1990. Conference Record of the Twenty First IEEE , 21-25 May 1990. Pages:1110 - 1115 vol.2
- Nicholas, J Ekins-Daukes.
« **An investigation into the efficiency of strained and strain-balanced quantum well solar cells** ».
Thesis Submitted for the degree of Doctor of Philosophy of the University of London.
Imperial College 1999.
- J. Olivier.
« **Mesure des rayonnements en météorologie** »
Notice technique et d'utilisation des radiomètres. Météo France SETIM/QMR/CR.
- E. Radziemska.
« **Dark I-U-T measurements of single crystalline silicon solar cells** »
Energy Conversion and Management, Volume 46, Issues 9-10, June 2005, Pages 1485-1494.
- Robert Sadourny.
« **L'influence du soleil sur le climat** »
C. R. Académie des Sciences. Paris, t. 319, série II, p. 1325 à 1342, 1994.
- P. Roth, A. Georgiev and H. Boudinov.
« **Design and construction of a system for sun-tracking** »
Renewable Energy, Volume 29, Issue 3, March 2004, Pages 393-402.

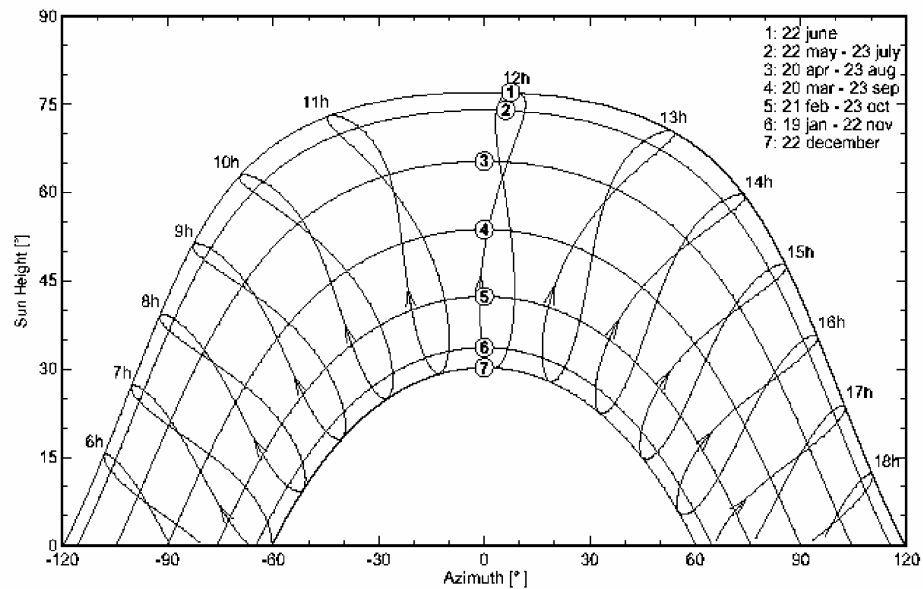
- H. Saha, S. K. Datta, K. Mukhopadhyay, S. Banerjee, M. K. Mukherjee.
« Influence of surface texturization on the light trapping and spectral response of silicon solar cells »
 Electron Devices, IEEE Transactions on , Volume: 39 , Issue: 5 , May 1992. Pages: 1100 - 1107
- Satheesh S.K.
« ATMOSPHERIC RADIATION »
 Article de “Centre of Atmospheric & Oceanic Sciences”, Indian Institute of Science Bangalore, India, 2003.
- A. Sfeir, G. Guarracino.
« Ingénierie des systèmes solaires »
Technique et Education – Paris, 1981.
- G. Warfield.
« Solar Electric Systems »
Hemisphere Publishing Corporation. Springer-Verlag. 1983.
- C. M. Whitaker, T. U. Townsend, H. J. Wenger, A. Iliceto, G. Chimento, F. Paletta.
« Effects of irradiance and other factors on PV temperature coefficients »
 Photovoltaic Specialists Conference, 1991., Conference Record of the Twenty Second IEEE , 7-11 Oct. 1991. Pages: 608 - 613 vol.1
- J. Wiley.
« An Introduction to Solar Energy for Scientists and Engineers »
Library of Congress Cataloging in Publication Data.
Fairleigh Dickinson University, USA, 1982.
- F. Youcef Ettoumi.
« Analyse et modélisation multi -paramètres en météorologie : Evaluation des énergies renouvelables en Algérie »
Thèse de doctorat en Electronique U.S.T.H.B-2002.
- F. Youcef Ettoumi et A. Adane.
« Outdoor experimentation on a polycrystalline photovoltaic module in Algiers »
Rural Energy Applications and Deployment (REA)
Symposium international: WREC : Word Renewable Energy Congress, USA 2000.

- F. Youcef Ettoumi, A. Adane, et **A. Lahmissi**.
« A data acquisition system with photodiode sensors suitable for solar energy measurement »
Rural Energy Applications and Deployment (REA)
International Symposium: WREC : Word Renewable Energy Congress, USA 2004.
- T. E. Zirkle, D. K. Schroder, C. E. Backus.
« The superlinearity of the short-circuit current of low-resistivity-concentration solar cells »
Electron Devices, IEEE Transactions on, Volume: 36, Issue: 7, July 1989, pages: 1286 -1294 vol.1

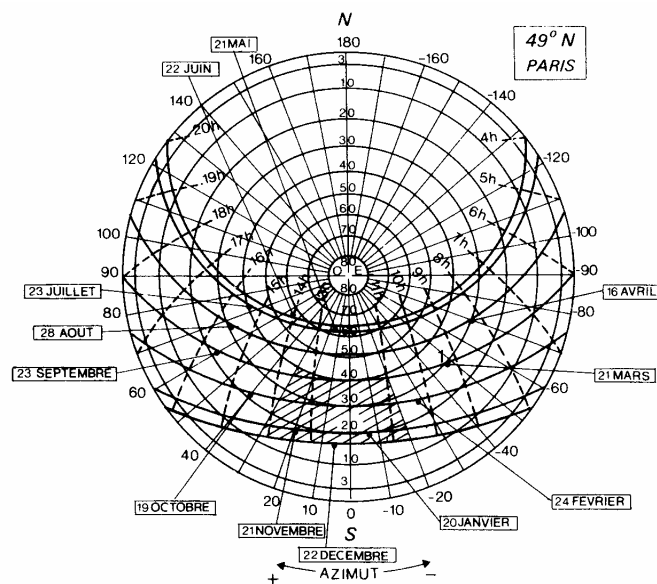
ANNEXE A1 : Diagrammes solaires

Latitude 37° Nord (Alger)

Solar paths at **Alger**, (Lat. 36.3°N, long. 2.6°E, alt. 5 m)



Latitude 49° Nord (Paris)

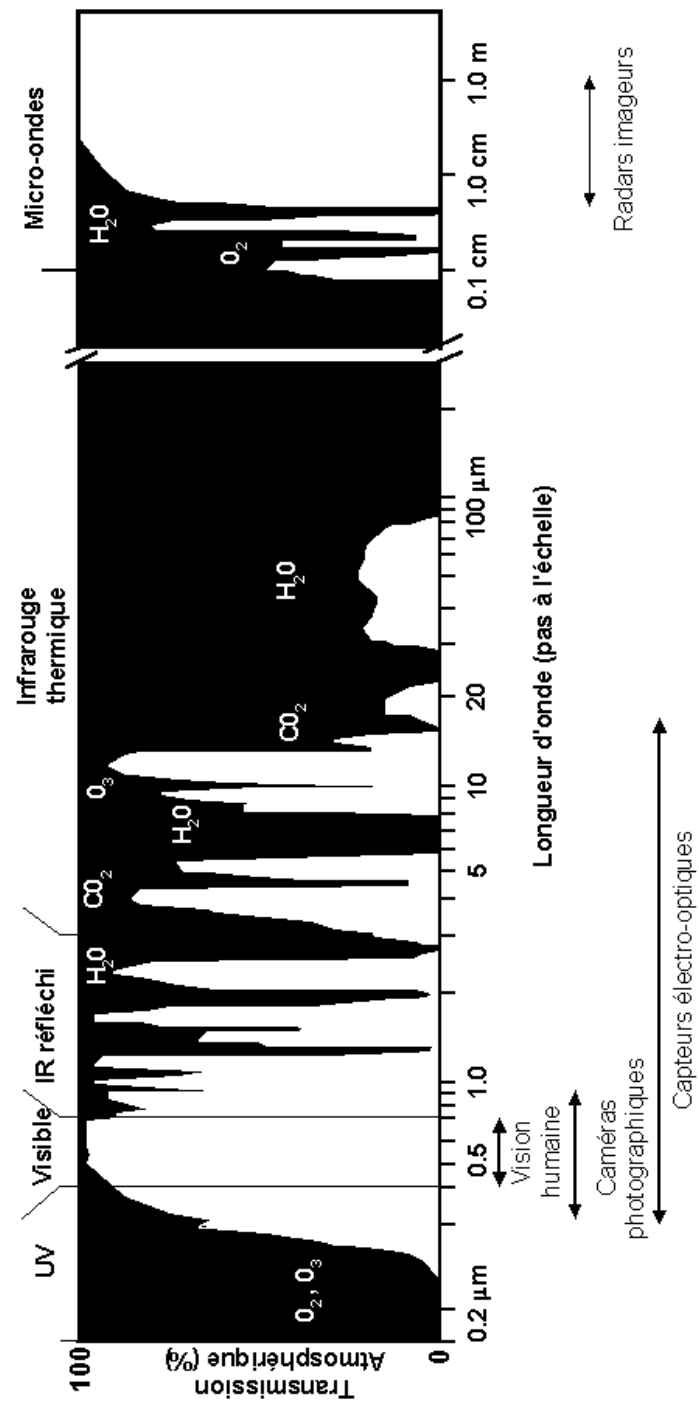


ANNEXE A2 : Valeurs de l' « Air Masse » (AM)

Tableau : Masse atmosphérique en fonction de la hauteur du soleil mesuré pour
P=1000mb (en ciel clair).

H	$\frac{1}{\sinh}$	AM vrai	H	$\frac{1}{\sinh}$	AM vrai
90°	1,000	1,000	20°	2,924	2,904
80°	1,015	1,015	19°	3,072	3,049
75°	1,035	1,035	18°	3,236	3,209
70°	1,064	1,064	17°	3,420	3,388
65°	1,103	1,103	16°	3,628	3,588
60°	1,155	1,154	15°	3,864	3,816
55°	1,221	1,220	14°	4,134	4,075
50°	1,305	1,304	13°	4,445	4,372
45°	1,414	1,413	12°	4,810	4,716
40°	1,556	1,553	11°	5,241	5,120
35°	1,743	1,740	10°	5,76	5,60
30°	2,000	1,995	9°	6,39	6,18
25°	2,366	2,357	8°	7,19	6,88
20°	2,924	2,904	7°	8,21	7,77
15°	3,864	3,816	6°	9,57	8,90
-	-	-	5°	11,47	10,40
-	-	-	4°	14,34	12,44

ANNEXE A3 : Absorption Atmosphérique sélective

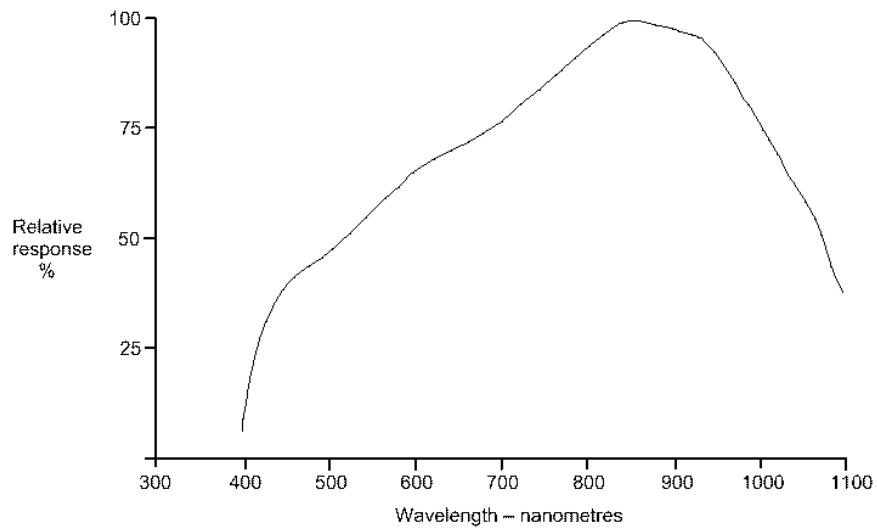


ANNEXE A4 : Valeurs de l'Albédo

Valeurs de l'albédo pour le rayonnement solaire global

	Albédo
TERRE (Planète)	0,20 à 0,60
SOL	
Couverture de neige fraîche	0,80 à 0,90
Couverture de neige tassée et vieillie	0,50 à 0,70
Terre cultivée nue	0,08 à 0,25
Prairie et herbages verts	0,12 à 0,25
Terre sableuse	0,15 à 0,25
Sable clair, sec ou mouillé	0,25 à 0,45
Forêts d'arbres à feuilles caduques en été	0,10 à 0,20
Forêts d'arbres à feuillage persistant en été	0,05 à 0,15
Forêt et neige	0,25 à 0,50
Herbe et végétation sèche	0,28 à 0,33
ETENDUES D'EAU (MERS, LACS)	
Eau parfaitement calme, $h > 30^\circ$	0,006 à 0,02
Eau parfaitement calme, $h < 10^\circ$	0,35 à 0,60
Mers et Océans, $h > 30^\circ$	0,02 à 0,05
Mers et Océans, $h < 10^\circ$	0,02 à 0,20
Vastes surfaces glacées	0,25 à 0,40
MATERIAUX DIVERS	
Argent poli	0,94
Argent oxydé	0,50
Aluminium poli	0,97
Aluminium oxydé	0,85
Béton	0,50
Charbon	0,15
Graviers	0,25
Asphalte	0,18
Chaux blanche	0,75
Papier blanc	0,85
Peintures blanches	0,90
Peinture noire mates	0,07
Verre à vitres	0,10
Plâtre blanc sec	0,90
Fibrociment	0,20
NUAGES	
Stratiformes	0,40 à 0,75
Cumuliformes	0,60 à 0,85

ANNEXE A5 : Caractéristiques principales du capteur SP1110



La sensibilité spectrale typique du capteur SP1110

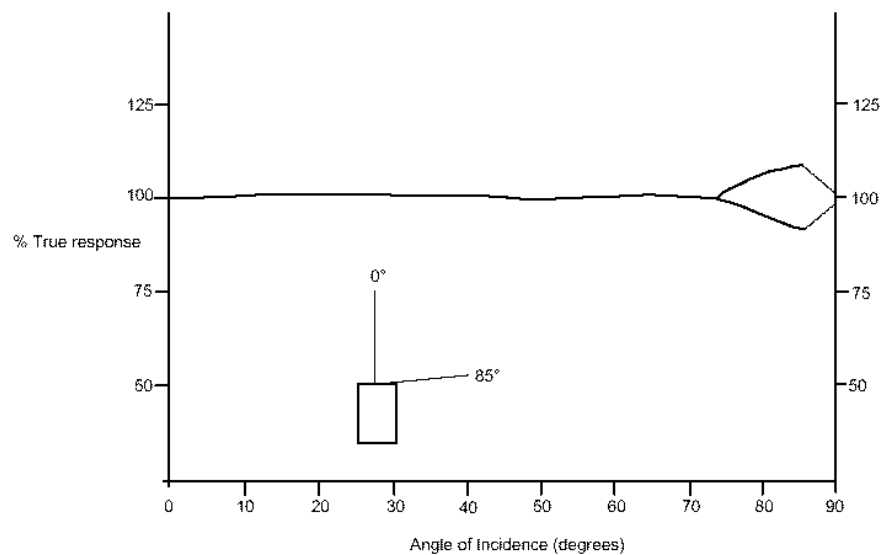
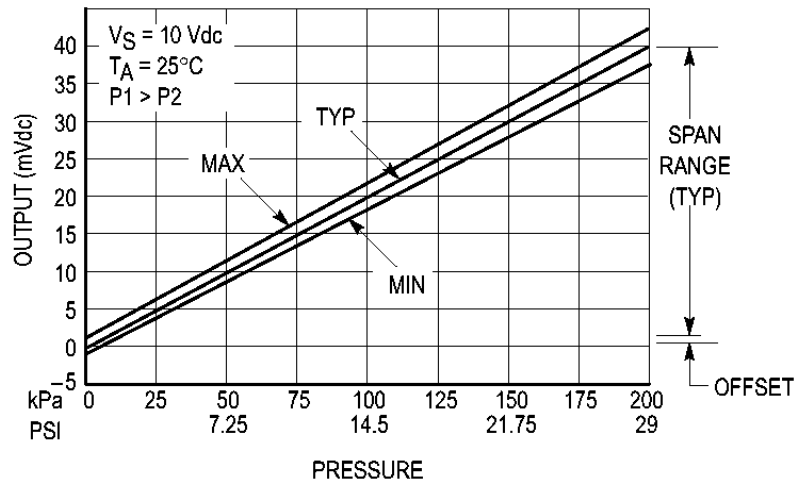


Figure 2 Typical Cosine Response Error for SP1110

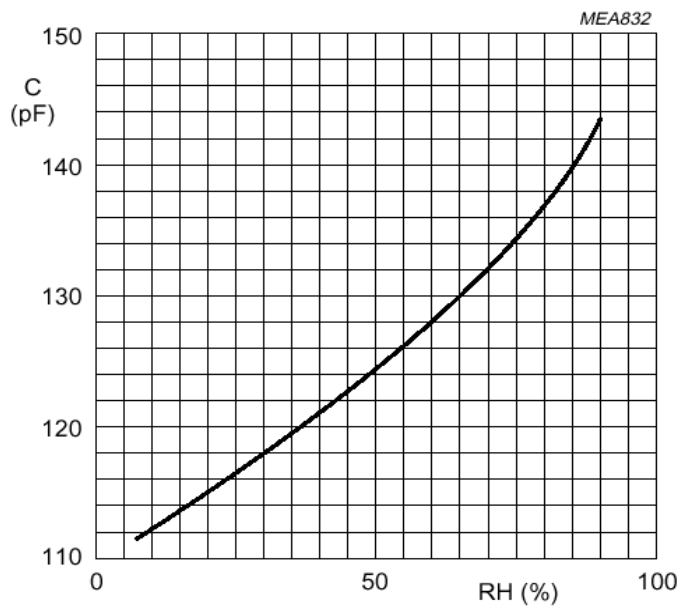
L'erreur typique de réponse angulaire du capteur SP1110

ANNEXE A6 : Caractéristique principale du capteur MPX2200AP de pression



Caractéristique du signal de sortie du capteur MPX2200AP

ANNEXE A7 : Caractéristique principale du capteur d'humidité (PHILIPS)



Capacité typique en fonction d'humidité relative du capteur d'humidité
(référence 2322-691-90001 PHILIPS)

ANNEXE A8 : Schémas Internes des Circuits L297 et L298.

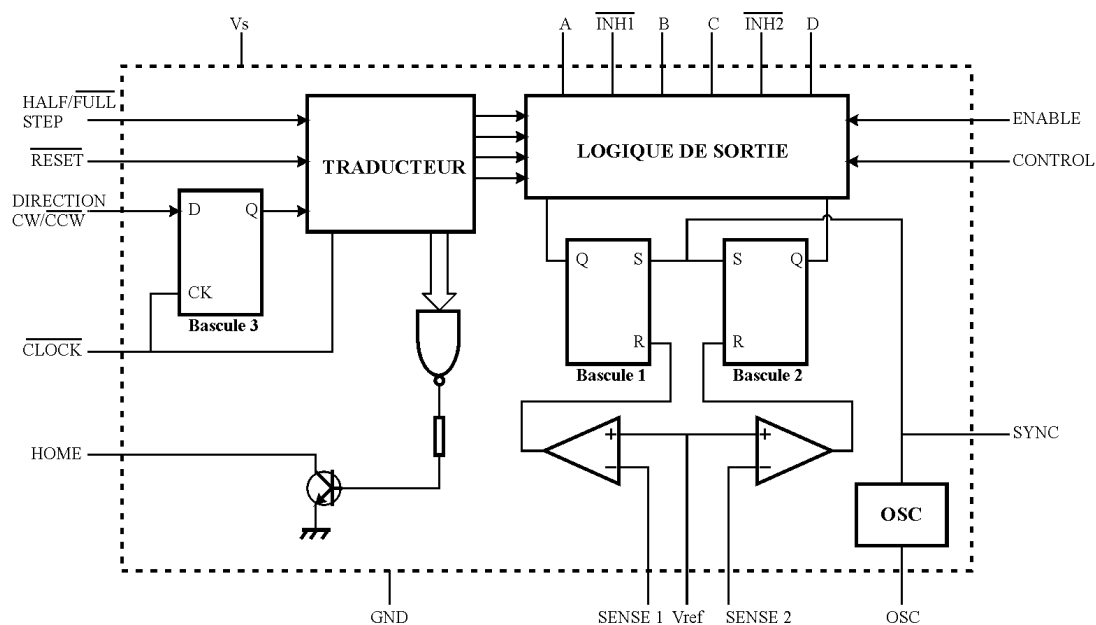


Schéma interne du circuit L297

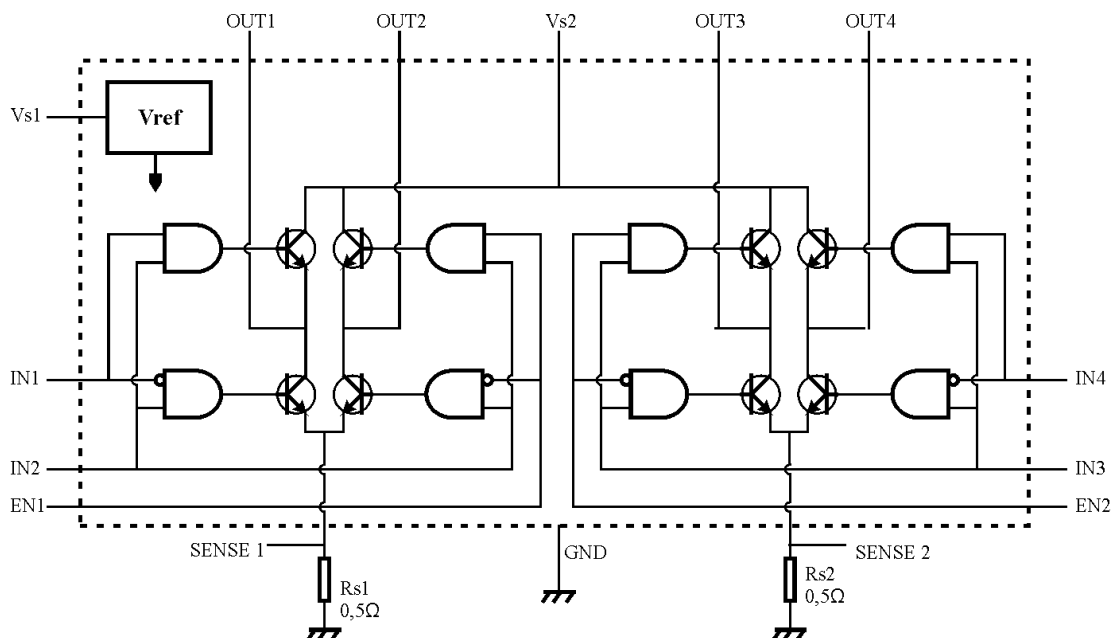
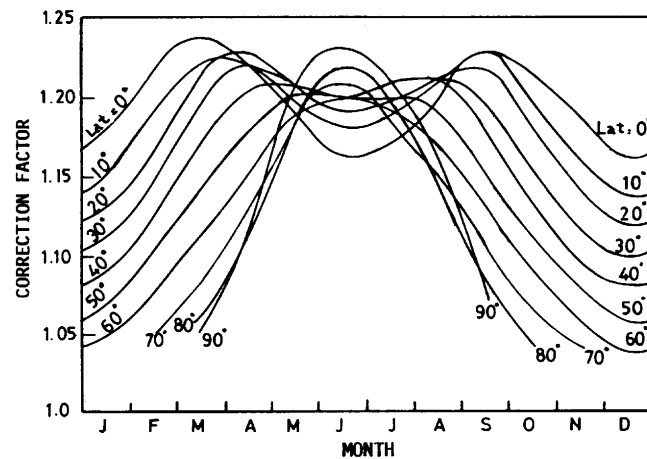


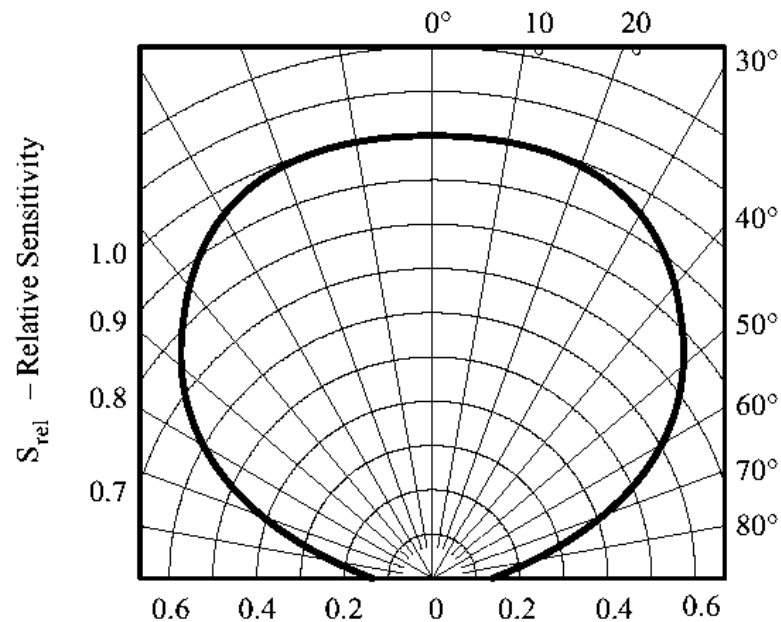
Schéma interne du circuit L298

ANNEXE A9 : Facteur de correction d'un diffusiomètre



Facteur de correction à employer à différentes latitudes et à différent temps de l'année pour récupérer le rayonnement diffus intercepté par l'anneau d'ombre.

ANNEXE A10 : Sensibilité angulaire du photodiode BPW34



La réponse angulaire de la photodiode BPW34.