Université Libanaise

Faculté des Sciences II

Département de physique

Mémoire de Maîtrise

Option : Physique

Titre de mémoire :

Gisement Solaire : Irradiation solaire globale et durée d'insolation

Préparé sous la direction de Dr. Sami DIB et présenté par :

Elie MATAR

Charbel GHAITH

Joe AOUN

Soutenu le : 15/07/2004

Devant le jury composé de :

Pr. Joseph BÉCHARA

Pr. Noël KALLAS

Dr. Sami DIB

Fanar – Liban

2004

Dédicacions

A ceux qui ont consacré généreusement
leur vie à leurs enfants,
A ceux qui nous ont donné
l'enthousiasme de la recherche,
A ceux sans lesquels,
ces lignes n'auraient jamais étaient écrites,
A nos parents,
Avec notre vive gratitude
Et notre entière reconnaissance
Nous exprimons notre amour
Et notre sentiment
De profond respect filial.

Elie
Charbel
Joe

REMERCIEMENTS

Nous voudrons en cette occasion exprimer notre profonde reconnaissance envers vous, notre directeur, notre chef de département, et tous nos professeurs qui ont été là, pour nous, dans notre trajet universitaire, ainsi que Pr. KALLAS et Pr. BÉCHARA qui ont accepté d'être dans notre jury.

Nous nous adressons en l'occurrence à Dr. Sami DIB qui, grâce à son esprit rénovateur et créatif, nous a guidés de près dans nos travaux de recherches.

Enfin, nous remercions également les divers organismes qui ont collaboré à matérialiser ce projet et qui ont permis l'utilisation de documents pour l'illustration, en particulier la direction de la station météorologique de l'aéroport international de Beyrouth.

TABLES DES MATIERES

Titre	Page
Remerciements	**3**
Table de matières	**4**
Notations	**6**
Introduction	**7**
Chapitre I : Coordonnées et mouvements apparents célestes	**8**
A- Systèmes de coordonnées :	8
1- Système de coordonnées horaires	9
2- Système de coordonnées horizontales	9
B- Périodicité :	12
1- Première période : le jour	12
2- Deuxième période : l'année	12
3- Troisième période : quatre ans	13
C- Étude théorique :	13
D- Graphiques	14
Chapitre II : Irradiation solaire globale	**18**
A- Détermination de l'irradiation globale à la limite de l'atmosphère	18
B- Irradiation globale et atmosphère terrestre:	21
1- Constante solaire	21
2- Irradiation solaire globale au sol	21
3- Facteurs dont dépend l'irradiation solaire :	24
a- Durée d'insolation	24
b- Hauteur du soleil	24
c- Masse atmosphérique	26
d- Albédo dans les régions polaires	27

C- Instruments de mesures : 28

1- Instruments de mesures : 28

a- Héliographe 28

b- Pyranomètre 29

2- D'autres instruments observés : 30

a- Pluviomètre 30

b- Girouette et anémomètre 30

Chapitre III : Étude et contrôles des mesures expérimentales 31

A- Introduction 31

B- Données solaires : 31

1- Durée d'insolation 32

2- Irradiation globale 33

3- Relation entre l'irradiation globale g et la durée d'insolation SS 33

C- Contrôles des données SS et g : 36

1- Contrôle des mesures de la durée d'insolation SS 37

2- Contrôle des mesures de l'irradiation globale g : 37

a- Valeurs de g nulles 37

b- Valeurs de g hors l'intervalle d'encadrement $[g_{min}, g_{max}]$ 39

D- Résultats 43

E- Remarques 45

Conclusion 46

Annexe 47

Références 50

NOTATIONS

δ (delta) : Déclinaison du Soleil.

ω : Angle horaire du Soleil.

a : Azimut du Soleil.

h : Hauteur du Soleil.

L : Latitude du lieu.

SS_o : Durée d'insolation théorique.

SS : Durée d'insolation expérimentale.

g_o : Irradiation solaire globale théorique.

g : Irradiation solaire globale expérimentale.

P : Puissance surfacique de l'irradiation solaire globale à la limite de l'atmosphère.

I : Puissance surfacique de l'irradiation solaire globale au sol.

INTRODUCTION

Le Soleil est un gigantesque réacteur nucléaire qui rayonne de l'énergie électromagnétique. Une partie de cette énergie atteint la Terre et la rend une planète vivable. Bien que l'énergie solaire ait l'inconvénient d'être intermittente et diluée dans l'espace, elle présente l'avantage d'être gratuite et inépuisable à l'échelle humaine.

Les mesures concernant le gisement solaire prennent une importance particulière dans la mesure où elles donnent une idée quantitative de la disponibilité de l'énergie solaire en un lieu donné.

Elles constituent un outil indispensable pour tout calcul d'une installation solaire.

Dans ce travail, nous nous sommes intéressés plus particulièrement à :

- L'irradiation globale journalière g d'un plan horizontal.
- La durée d'insolation journalière SS.

Ce mémoire est formé de trois chapitres :

Le chapitre I constitue une étude astronomique permettant de déterminer le mouvement apparent d'un astre quelconque, (en particulier le soleil) par rapport à un observateur terrestre.

Le chapitre II présente le calcul de l'irradiation globale théorique, les facteurs dont dépend cette irradiation et les instruments de mesure utilisés.

Dans le chapitre III, nous avons proposé une corrélation entre la durée d'insolation et l'irradiation globale. Ensuite, en élaborant un calcul théorique, nous avons mis au point une méthode permettant de détecter les valeurs erronées dans les mesures solaires qui nous ont été fournies par la direction de la station météorologique à l'aéroport international de Beyrouth.

Chapitre I
Coordonnées et mouvements apparents célestes

A-Systèmes de coordonnées :

Par définition, la sphère céleste est la projection de l'espace qui entoure le globe terrestre sur le fond céleste. Le prolongement de l'axe de la Terre dans les deux sens, coupe la sphère céleste en deux points appelés pôles célestes nord et sud. Le pôle céleste nord est très proche de la position occupée par l'étoile polaire. L'équateur céleste est l'intersection du plan de l'équateur terrestre avec la sphère céleste.

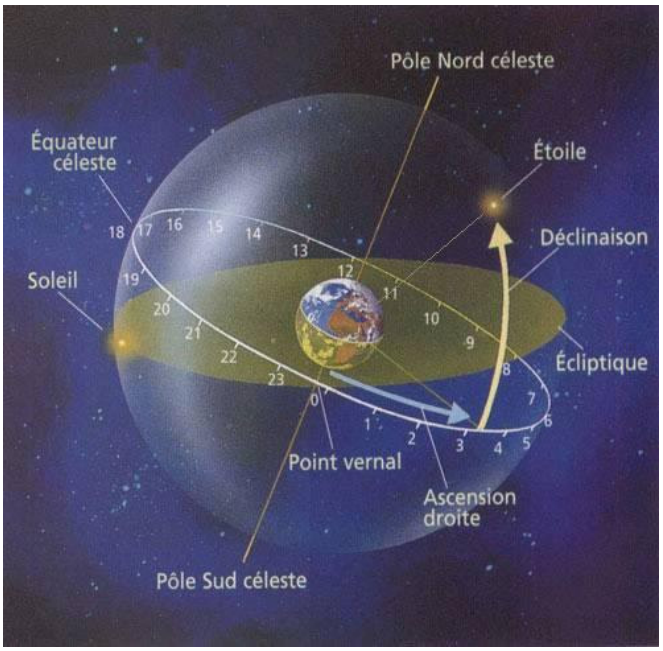

Figure I.1 : Cette figure représente la sphère céleste qui entoure le globe terrestre.

La détermination de la direction ou de la position d'un astre sur la sphère céleste est réalisée en mesurant des angles appelés coordonnées célestes. Ces angles sont définis dans des systèmes de références dont chacun est formé d'un plan principal et de directions particulières servant d'axes. Différents systèmes de coordonnées sont utilisés.

Parmis ceux-ci, nous avons choisi deux systèmes :

- Système de coordonnées horaires.
- Système de coordonnées horizontales.

1- Système de coordonnées horaires :

Le plan principal du système de coordonnées horaires est celui de l'équateur céleste. Il divise la sphère céleste en deux parties, l'hémisphère nord dont le sommet est occupé par le pôle céleste nord et l'hémisphère sud avec le pôle céleste sud.

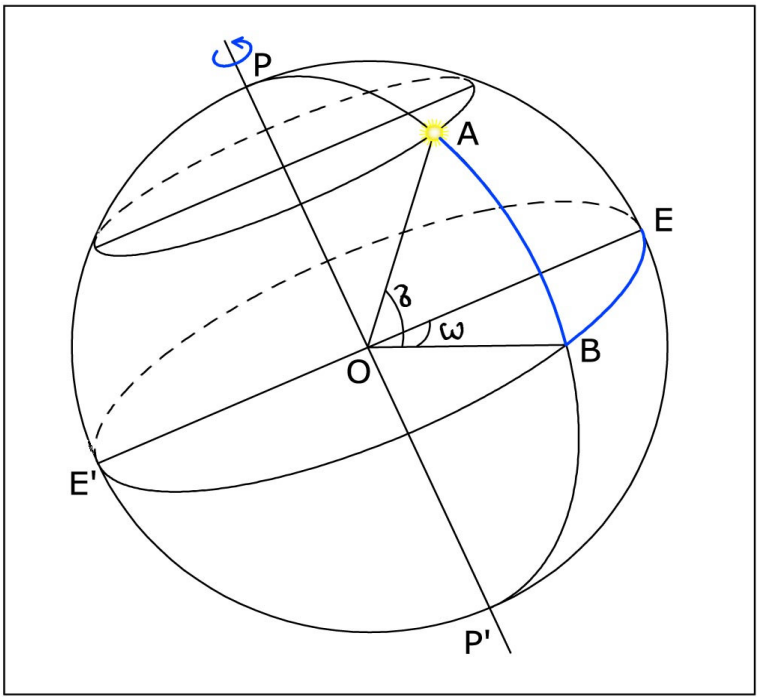

Figure I.2 : Système de coordonnées horaires : L'angle AÔB représente la déclinaison δ et l'angle EÔB représente l'angle horaire ω de l'astre A. (Le point O étant le centre de la sphère céleste. PP' est l'axe polaire céleste).

Pour déterminer la position d'un astre (comme le soleil) ou d'une étoile dans le système de coordonnées horaires, on utilise deux angles :

- La déclinaison "δ", qui est l'angle que forme la direction de l'astre avec le plan de l'équateur. "δ" est mesurée à partir de l'équateur de 0º à 90º vers le pôle Nord et de 0º à 90º vers le pôle Sud. La déclinaison du Soleil "δ" varie de +23º 27' (le 21 juin) à -23º 27' (le 21 décembre).

- L'angle horaire "ω", qui est l'angle formé par le plan méridien du lieu PEP' et le méridien contenant la position apparente du Soleil (plan PAP'). Cet angle est utilisé pour définir le temps solaire vrai. Il varie de 0º à ±180º (ou de 0 à ±12heures). Il est nul à midi vrai, négatif le matin et positif l'après-midi.

2- <u>Système de coordonnées horizontales :</u>

Dans ce système de coordonnées, le centre "O" de la sphère céleste est le lieu où se trouve l'observateur. Dans ce système, le plan fondamental est l'horizon astronomique. C'est le plan horizontal qui passe par "O". Ce plan coupe la sphère céleste suivant un grand cercle appelé "horizon".

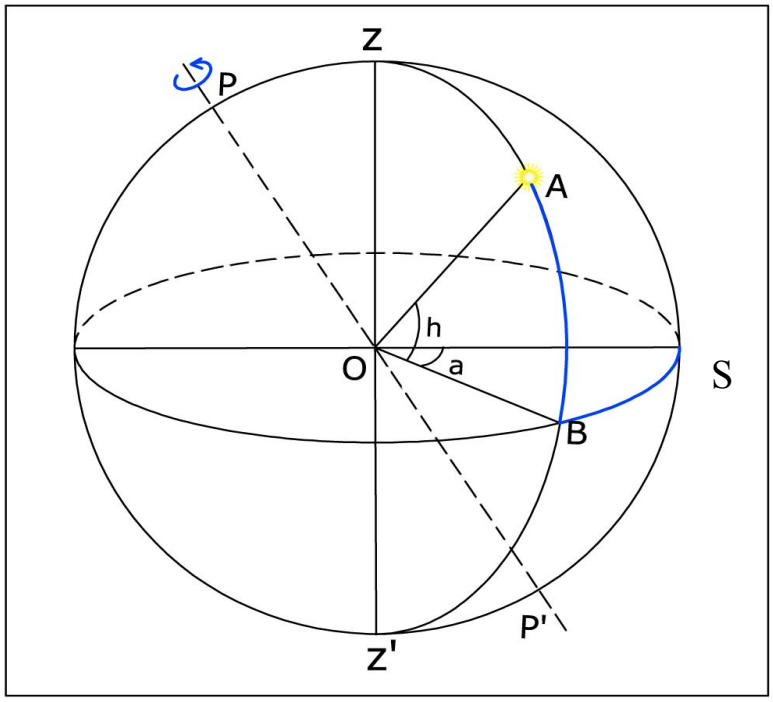

Figure I.3 : Système de coordonnées horizontales : L'angle BÔA représente la hauteur h de l'astre A et l'angle SÔB représente son azimut a. (ZZ' est l'axe zenith-nadir), O indique la position de l'observateur et S est la direction du sud.

La perpendiculaire en "O" à ce plan astronomique est la verticale du lieu. Cette verticale coupe la sphère céleste en deux points. Le Zénith dans l'hémisphère visible et le Nadir dans l'hémisphère invisible.

Les coordonnées de ce système sont (Figure I.3) :

- L'azimut "a" est l'angle formé par la direction du sud et OB qui est la projection de OA (position de l'astre) sur le plan horizontal. En partant du sud, l'azimut est mesuré de 0º à 180º dans le sens des aiguilles d'une montre.

- La hauteur "h", c'est l'angle formé par OA et OB. Elle varie de 0º à 90º vers le Zénith (Z) si "A" est dans l'hémisphère visible, et de 0º à -90º vers le Nadir (Z') si "A" est dans l'hémisphère invisible. "a" et "h" sont les coordonnées locales de l'astre "A".

Les deux systèmes ensemble

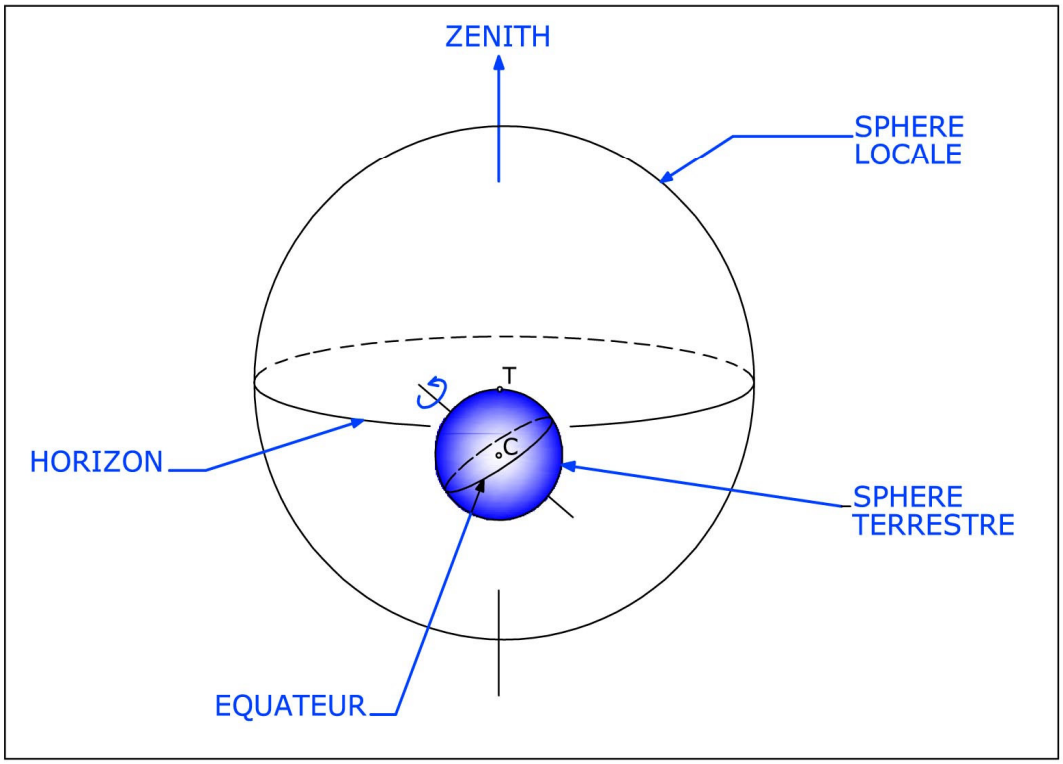

Figure I.4 : Figure représentant les deux systèmes de coordonnées. C est le centre du système de coordonnées horaires. La position T de l'observateur sur la surface du globe est le centre du système de coordonnées horizontales.

B- Périodicité :

1- Première période : le jour

À cause du mouvement de rotation de la terre autour de son axe polaire, le soleil effectue dans le ciel un mouvement apparent suivant le sens contraire à celui de la terre, de l'Est vers l'Ouest.

Suffisamment loin des pôles, ce mouvement apparent peut être décrit de la façon suivante :

Le soleil se lève à l'Est, monte dans le ciel, traverse le méridien du lieu (à midi vrai), puis descend vers l'Ouest et disparaît derrière l'horizon.

Si nous prenons une position déterminée du soleil dans le ciel à un instant précis, après un tour complet de la Terre autour de son axe, nous retrouvons le soleil dans cette même position. La durée de révolution de la Terre est utilisée pour définir le jour solaire vrai.

Puisque le mouvement apparent du soleil n'est pas régulier, la durée du jour solaire vrai est variable. Pour cela on l'a remplacé par le jour solaire moyen dont sa durée est la moyenne annuelle de celle du jour solaire vrai.

2- Deuxième période : l'année

En observant attentivement la position du soleil, successivement de jour en jour, à la même heure, nous remarquons l'existence d'un autre mouvement solaire apparent plus lent que le premier.

Par exemple, à partir du 22 décembre (solstice d'hiver), la position du soleil, à midi solaire vrai, se déplace du sud vers le nord pour atteindre le 22 juin (solstice d'été) une certaine limite, puis rebrousse chemin pour revenir à sa position initiale au 22 décembre. Ce cycle effectué par la position du soleil dure 365,2422 jours moyens. C'est la notion de l'année.

3- Troisième période : quatre ans

Nous avons vu précédemment, que pour calculer la position du soleil, nous devons tenir compte de deux phénomènes périodiques : le jour et l'année.

Puisque l'année n'est pas formée d'un nombre entier de jours, nos calculs ne seront pas suffisamment précis. Ainsi, deux positions du soleil relatives à la même heure et au même jour dans deux années consécutives ne sont pas exactement les mêmes. Pour surmonter cette difficulté nous avons décidé de faire le calcul de la position du soleil en tenant compte d'une période de quatre ans. Cette période est formée d'un nombre de jour quasi-entier (1460,96 à peu près 1461 jours). En appliquant cette périodicité, nous avons pu calculer la déclinaison δ avec une précision de 0,2% [3].

C- Étude théorique :

Les formules suivantes permettent de passer d'un système de coordonnées horaires au système de coordonnées horizontales et vis versa. Elles sont tirées des formules dites " Formules de Gauss " [4].

Soit L la latitude du lieu.

$$\sin h = \sin L.\sin \delta + \cos L.\cos \delta.\cos\omega \qquad (I.1)$$

$$\sin a = \cos \delta.\sin \omega / \cos h \qquad (I.2)$$

où ω est l'angle horaire à l'instant considéré.

Au jour j, la déclinaison δ est donnée par la formule :

$$\sin \delta = 0{,}3979 * \sin \gamma \quad [1] \qquad (I.3)$$

Avec $\gamma = \gamma_o + 0{,}007133 * \sin \gamma_o + 0{,}032680 * \cos \gamma_o$

$$- 0{,}000318 * \sin 2\gamma_o + 0{,}000145 * \cos 2\gamma_o \qquad (I.4)$$

γ_o étant donnée par $\gamma_o = 2\pi \cdot \dfrac{(j + 284)}{365{,}24}$ (I.5)

j est le numéro du jour dans une période de quatre ans, commençant le premier jour de l'année après une année bissextile.

- Calcul de la durée d'insolation maximale :

La durée d'insolation ou d'illumination est l'intervalle de temps qui sépare un lever et un coucher consécutifs, c'est aussi la durée durant laquelle le Soleil se trouve au-dessus de l'horizon. La durée d'insolation théorique sera notée SS_o.

Au lever et au coucher du soleil, sin h = 0 ; d'où d'après (I.1) :

$$\cos(\omega_L) = -\text{tg } L.\text{tg } \delta \; . \qquad (I.6)$$

ω_L étant l'angle horaire du lever et du coucher du soleil.

Sachant que SS_o est égale à deux fois ω_L, on peut écrire :

$$SS_o = 2.\text{Arc cos}(-\text{tg}L.\text{tg } \delta) \qquad (I.7)$$

Où SS_o est exprimée en radians, on peut encore ecrire :

$$SS_o = (24/\pi).\text{Arc cos}(-\text{tg}L.\text{tg } \delta) \qquad (I.8)$$

Avec SS_o exprimée en heures.

D- Graphiques :

Dans cette partie nous dressons les graphes des différents paramètres calculés à Beyrouth (latitude L = 35.5º) et en utilisant les formules précédentes (la hauteur maximale du soleil, sa déclinaison δ et la durée d'insolation maximale SS_o).

Dans les figures I.5 et I.6, nous comparons les valeurs de la hauteur h du soleil au 21 juin (solstice d'été) et au 21 décembre (solstice d'hiver).

La figure I.7 représente la variation, par rapport au temps, de la valeur maximale de la hauteur h du soleil à Beyrouth, à midi solaire vrai, durant les quatre années. h maximale varie entre un maximum de 78º et un minimum 32º.

Le calcul de la déclinaison δ du Soleil nous permet de dresser le graphe de la variation de celle-ci durant quatre ans (Figure I.8). Nous remarquons que δ varie entre deux extremums, - 23º27' et 23º27'.

Finalement, tous ces calculs sont faits pour pouvoir calculer la durée d'insolation maximale SS_o à Beyrouth ; Sa variation pendant quatre années consécutives, est représentée par la figure I.9. SS_o varie, suivant une sinusoïde, de 9.6 heures à 14.4 heures.

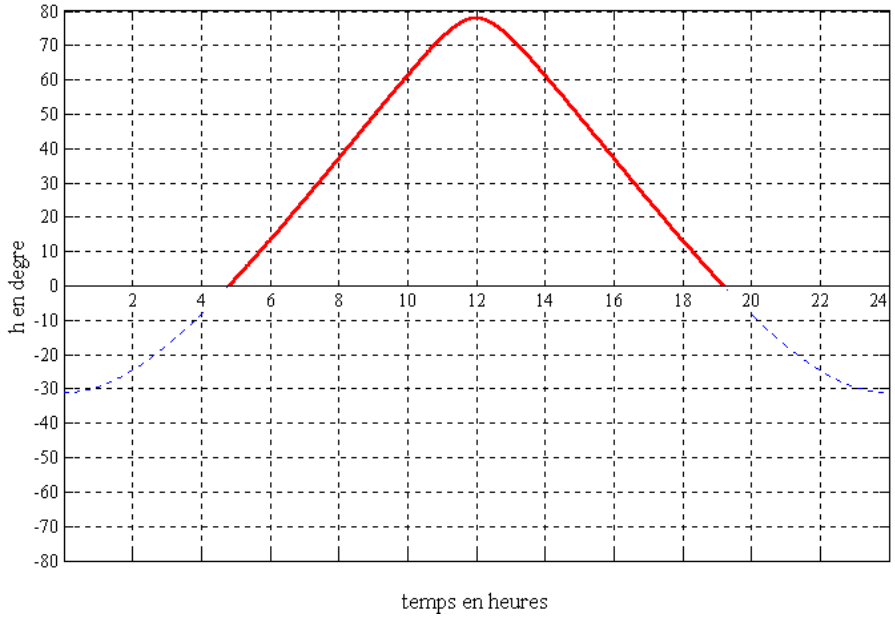

Figure I.5 : Ce graphe représente la hauteur du Soleil du 21 juin (solstice d'été) à Beyrouth.

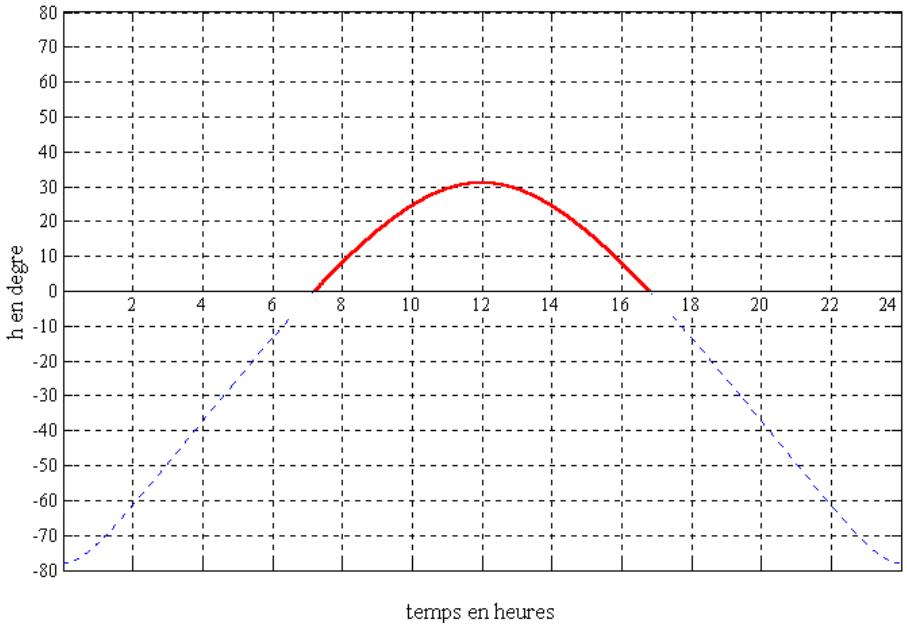

Figure I.6 : Ce graphe représente la hauteur du Soleil du 21 décembre (solstice d'hiver) à Beyrouth.

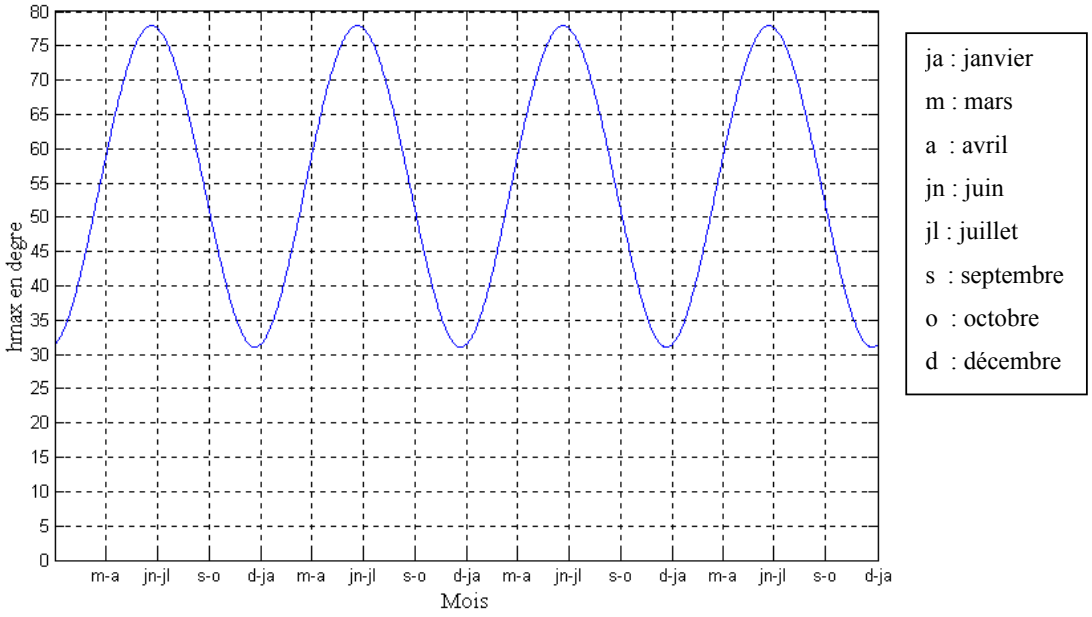

Figure I.7 : Cette sinusoïde représente la variation de la valeur maximale de la hauteur h_{max} du Soleil à midi solaire vrai à Beyrouth durant les quatre ans 2000-2003.

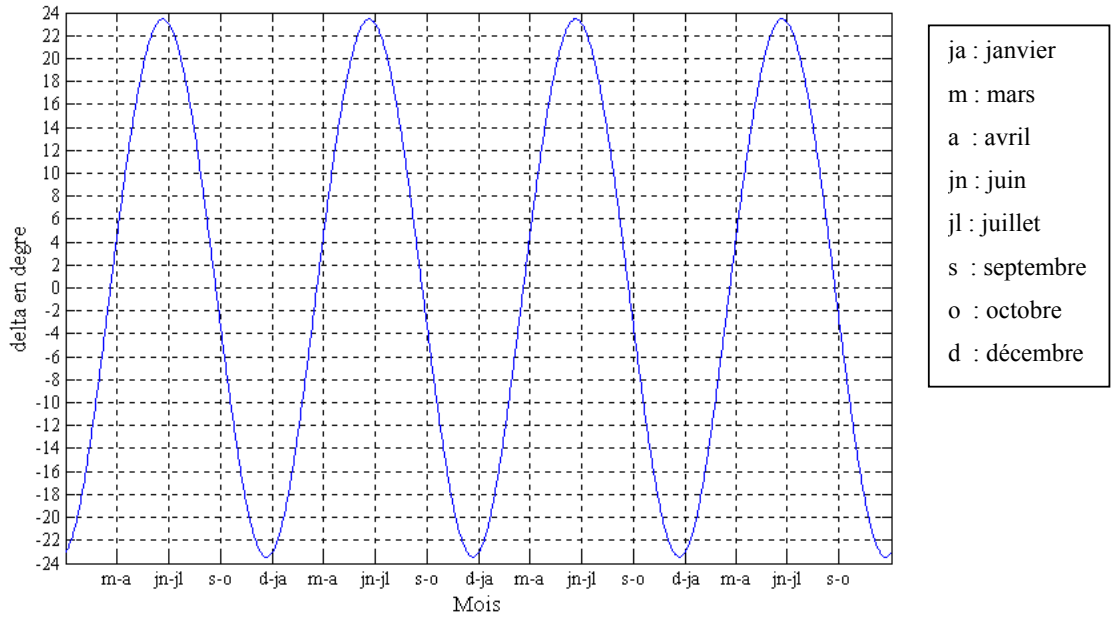

Figure I.8 : La courbe ci-dessus représente la variation de la déclinaison δ du Soleil durant les quatre ans 2000-2003.

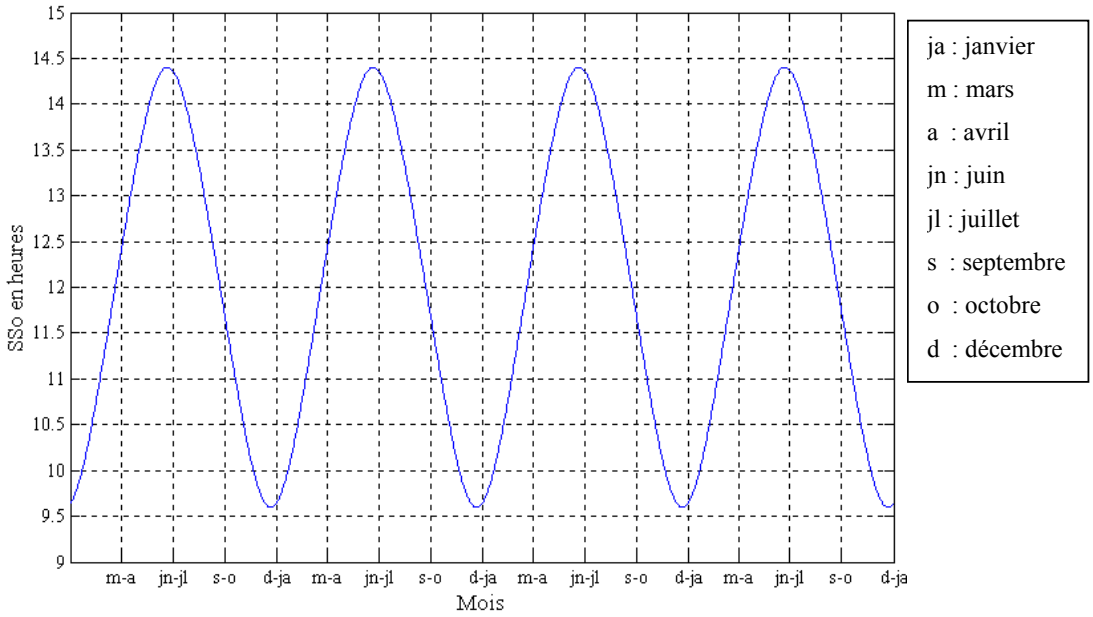

Figure I.9 : Variation de la durée d'insolation maximale SS_o, à Beyrouth pendant les quatre ans 2000-2003.

Chapitre II
Irradiation Solaire Globale

A- Détermination de l'irradiation globale à la limite de l'atmosphère :

La constante solaire est donnée par : $\mathbf{I_o = 1353 W/m^2}$. Cette constante représente la puissance du rayonnement solaire tombant normalement sur une surface S de 1m² à la limite supérieure de l'atmosphère.

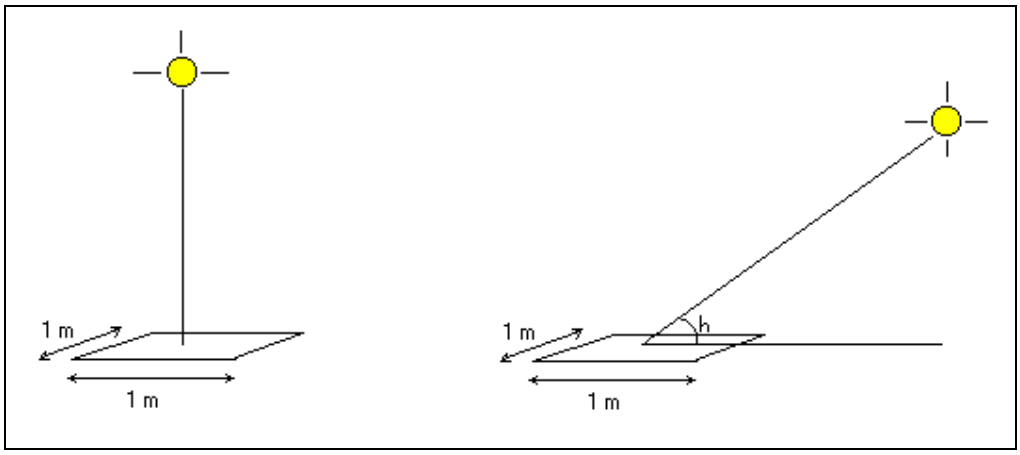

Figure II.1

Calculons l'énergie solaire reçue par cette surface S pendant un certain intervalle de temps $[t_1,t_2]$. Si le Soleil est à une hauteur donnée **h**, l'énergie reçue par S pendant un intervalle de temps élémentaire **dt**, est :

$$dg_o = I_o.\sin h.dt \qquad [1]$$

Pour un intervalle de temps $[t_1, t_2]$ donné, cette énergie est égale à :

$$g_o = \int_{t1}^{t2} I_o.\sin h.dt$$

Or on a vu dans le chapitre précédent que :

$$\sin h = \sin L.\sin \delta + \cos L.\cos \delta.\cos \omega.$$

Donc $$g_o = I_o.\int_{t1}^{t2}[\sin L.\sin\delta + \cos L.\cos\delta.\cos\omega].dt$$

Un angle horaire ω de 2π radians correspond à un jour de 24 heures ; d'où le rapport :

$$\frac{\omega}{t} = \frac{2\pi}{24}.\frac{1}{3600} = \frac{\pi}{12}.\frac{1}{3600} \Rightarrow \omega = \frac{\pi}{12}.\frac{t}{3600}$$

ω étant exprimé en radians et t en secondes.

Le calcul de l'intégrale précédente nous permet d'écrire :

$$g_o = I_o.\left[(t_2 - t_1).\sin L.\sin\delta + \frac{24}{\pi}.3600.\cos L.\cos\delta.\cos\left(\frac{\pi}{24}.\frac{t_2+t_1}{3600}\right).\sin\left(\frac{\pi}{24}.\frac{t_2-t_1}{3600}\right)\right]$$

Si t_1 et t_2 sont exprimés en heures, la relation précédente devient :

$$g_o = 3600 I_o\left[(t_2 - t_1)\sin L.\sin\delta + \frac{24}{\pi}\cos L.\cos\delta.\cos\left[\frac{\pi}{24}(t_2+t_1)\right].\sin\left[\frac{\pi}{24}(t_2-t_1)\right]\right]$$

Pour un jour, on a : $t_1 = -\frac{SS_o}{2}$ et $t_2 = \frac{SS_o}{2}$.

Dans ce cas, l'irradiation globale journalière maximale g_o devient :

$$\boxed{g_o = 3600.I_o.\left[\sin L.\sin\delta.SS_o + \frac{24}{\pi}\cos L.\cos\delta.\sin\left(\frac{\pi}{24}SS_o\right)\right]}$$

SS_o en heures, I_o en (W/m²) et g_o en (J/m²).

La valeur de g_o exprimée en J/cm^2 est donc :

$$\boxed{g_o = 0.36\ I_o.\left[\sin L.\sin\delta.SS_o + \frac{24}{\pi}\cos L.\cos\delta.\sin\left(\frac{\pi}{24}SS_o\right)\right]}$$

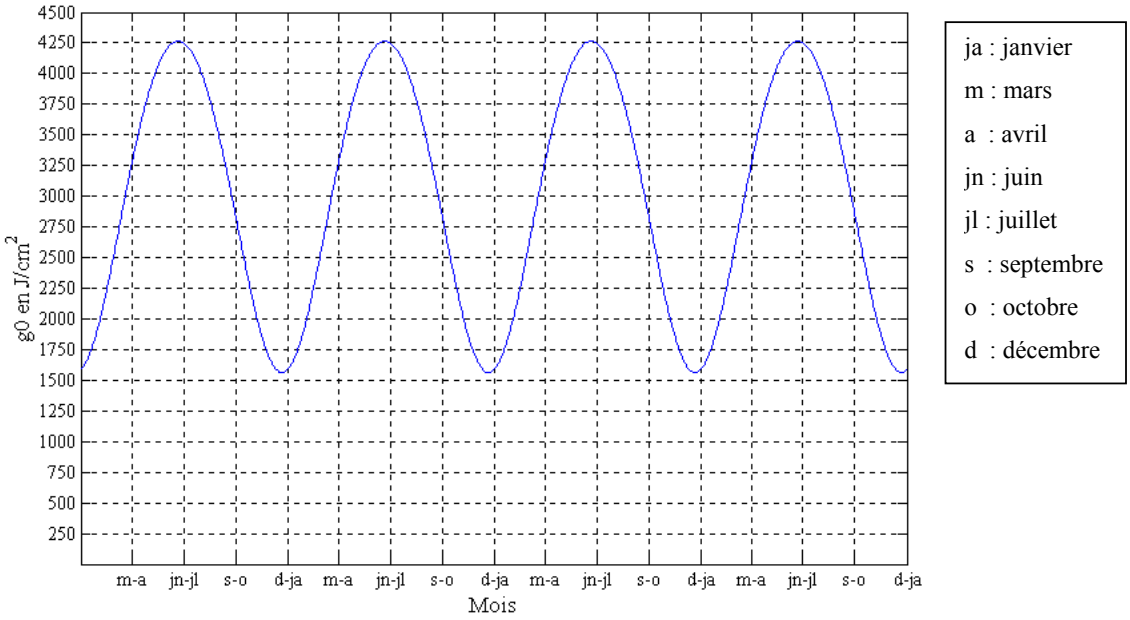

Figure II. 2 : Variation de l'irradiation globale théorique g_o (à la limite de l'atmosphère) à la latitude de Beyrouth durant les quatre ans 2000-2003.

B- Irradiation globale et atmosphère terrestre :

En négligeant le flux de chaleur qui existe à l'intérieur de la Terre, la quasi-totalité de la chaleur reçue à la surface du globe terrestre provient du rayonnement solaire.

1- Constante solaire :

La puissance des rayonnements solaires à la limite de l'atmosphère (avant d'être atténués par l'épaisseur de la couche atmosphérique) fluctue légèrement autour d'une valeur moyenne appelée constante solaire.

Cette **constante solaire** n'est autre que le flux total d'énergie électromagnétique en provenance du Soleil dont la valeur est : $\mathbf{I_o=1353\ W/m^2}$.

Cette valeur représente la puissance reçue par l'unité de surface placée normalement au rayons solaires à la limite supérieure de l'atmosphère terrestre.

2- Irradiation solaire globale au sol :

L'enveloppe gazeuse qui est plus ou moins riche en vapeur d'eau et qui est constituée par l'atmosphère, s'interpose entre le Soleil et la surface de la Terre, de sorte qu'une partie seulement de la radiation solaire peut atteindre directement le sol. En certains cas très favorables (atmosphère exceptionnellement limpide et sèche des déserts tropicaux), la radiation solaire peut atteindre jusqu'aux trois quarts de la constante solaire.

Mais généralement le rapport est plus faible, il se situe entre le $\frac{2}{3}$ et le $\frac{1}{2}$ de l'énergie solaire libérée sur la Terre.

En effet, comme nous venons de le voir, l'atmosphère absorbe une partie du rayonnement solaire, et en diffuse une autre partie. A ces deux actions s'ajoute un phénomène de réflexion.

L'**absorption** est essentiellement due à la présence de la vapeur d'eau qui existe dans l'air en faible quantité et qui est capable d'absorber six fois plus d'énergie solaire que les autres gaz existant dans l'atmosphère.

D’où l'importance de l'humidité dans les basses couches de l'atmosphère, particulièrement dans les trois ou quatre premiers kilomètres.

Quant à la **diffusion** qui résulte d'une infinité de réflexions sur les molécules des gaz et sur les poussières et impuretés contenues dans l'air, elle est d'autant plus forte que le nombre de molécules est élevé à basse altitude. La partie de ce rayonnement diffus qui atteint le sol s'ajoute à la radiation solaire directe pour former la **radiation globale**. S'il existe en plus un écran nuageux mince, l'augmentation de la diffusion peut compenser la diminution de rayonnement direct de telle façon que la radiation globale reste élevée ; mais l'existence d'un plafond nuageux épais abaisse la radiation globale, car à l'importante absorption s'ajoute la partie croissante d'énergie perdue par réflexion.

La fraction d'énergie réfléchie s'exprime en pourcentage par rapport à l'énergie incidente, on l'appelle **albédo**. L'albédo est lié étroitement à l'inclinaison des rayons solaires ; plus ces rayons sont proches de l'horizontale, plus l'albédo est élevé. Sur les continents l'albédo est en moyenne plus élevé que sur les océans (34% en moyenne sur les continents contre 26% pour les océans [5]). Sur les continents s'ajoute aussi l'influence capitale de la nature du revêtement, comme le montre le tableau suivant :

Nature du revêtement	Albédo (%)
Neige fraîche	80-85
Neige ancienne	50-70
Rochers	20-25
Sables	15-25
Forets	5-10

Tableau. II.1 [5]

Au total, malgré la partie d'énergie perdue par réflexion, le sol absorbe environ la moitié de la radiation solaire. En outre, l'atmosphère absorbe de ces radiations une proportion encore plus petite.

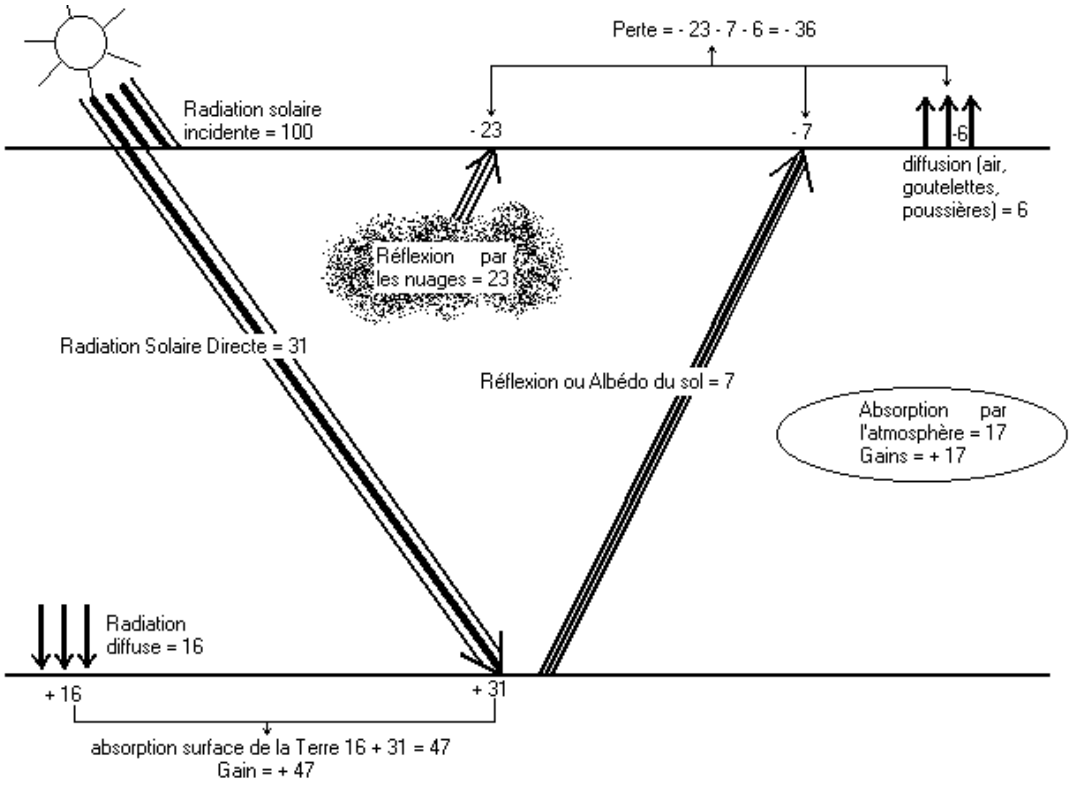

Figure II.3 [5]

Bilan des irradiations solaires :

- Pourcentage absorbé par le sol: 47 %.
- Pourcentage perdu par réflexion vers l'espace: 36 %.
- Pourcentage absorbé par l'atmosphère: 17 % .

Total 100 %

3- Facteurs dont dépend l'irradiation solaire :

a- Durée d'insolation :

En premier lieu, il convient de faire intervenir la durée pendant laquelle le Soleil est au-dessus de l'horizon déjà nommé **durée d'insolation**. Compte tenu de l'inclinaison du plan équatorial sur le plan de l'écliptique (23º 27'), on sait que la durée d'insolation varie de jour en jour. Elle augmente en été et diminue en hiver.

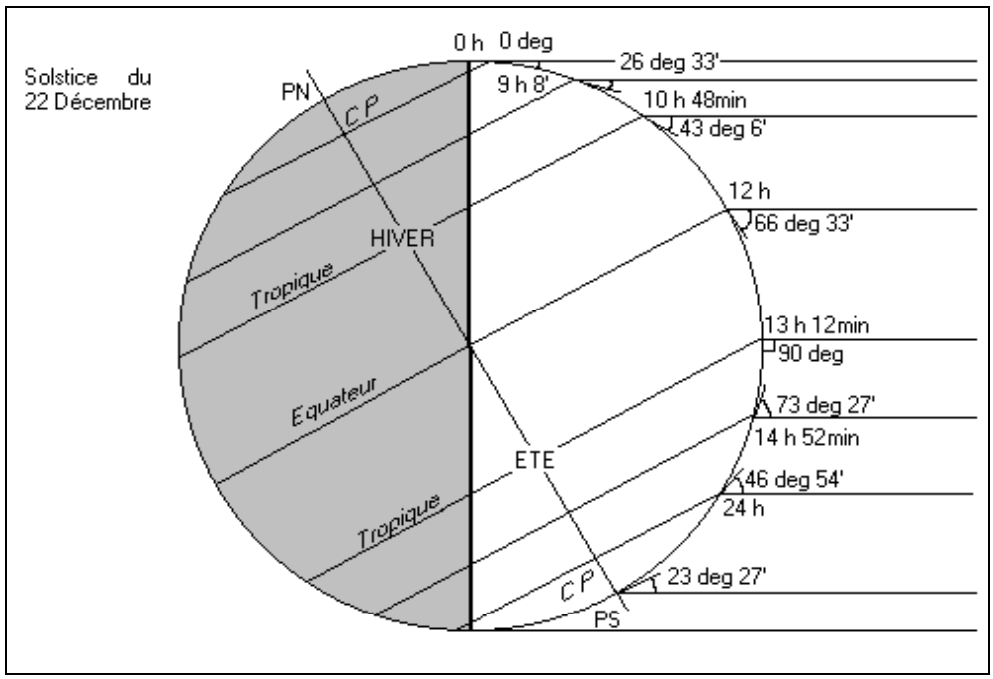

Figure II.4 : Durée d'insolation et angles d'incidence des rayons solaires à diverses latitudes le jour du solstice du 22 décembre. [6]

b- Hauteur du soleil :

Le deuxième facteur est la **hauteur du Soleil** qui est aussi le complément de l'angle d'incidence que font les rayons solaires en arrivant au sol avec la verticale. Cette hauteur modifie l'apport énergétique en un lieu donné au cours de la journée et au cours de diverses saisons. Elle permet également de faire varier cet apport le long d'un même méridien à un même moment donné.

En effet pour un faisceau incident de section droite donnée, la quantité d'énergie reçue par le sol est maximale lorsque le soleil est au zénith. Plus les rayons sont inclinés, plus l'énergie est dispersée et repartie sur une grande surface et plus les apports par unité de surface sont faibles.

Ainsi, à une décroissance régulière de la hauteur du Soleil correspond une diminution d'énergie incidente d'abord faible ensuite plus rapide. Mathématiquement, la puissance solaire reçue par unité de surface varie proportionnellement au sinus de la hauteur des rayons solaires (Loi de Lambert ou "loi des sinus") :

$$P = I_o.\sin h$$

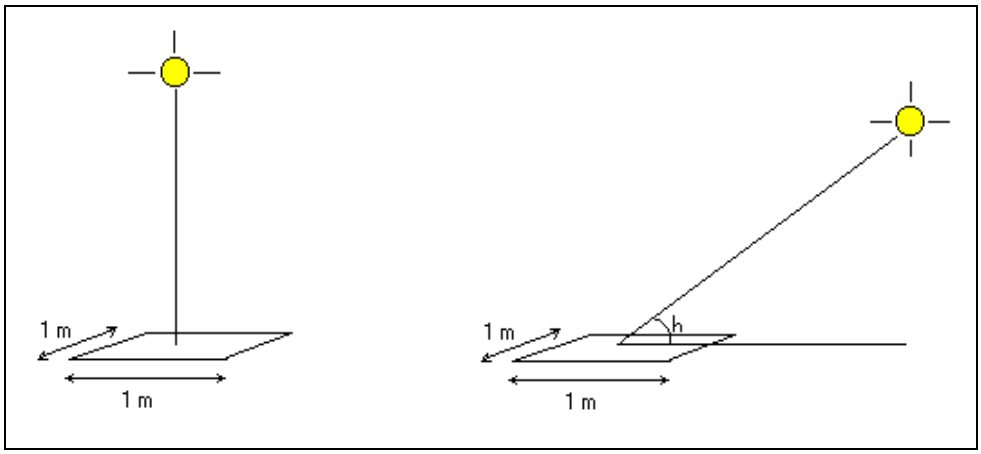

Figure II.5

le calcul montre que pour des rayons inclinés de 60º l'énergie atteignait encore presque les 9/10 de ce qu'elle aurait été avec des rayons verticaux. Par contre, sous une hauteur **h** de 30º l'intensité énergétique est réduite à sa moitié.

De ce fait, les régions intertropicales sont avantagées, puisque la hauteur du Soleil sur l'horizon y est en moyenne plus forte et atteint 90º deux fois par ans. Inversement les hautes latitudes sont très défavorisées, car les angles des rayons solaires y sont toujours faibles.

c- Masse atmosphérique :

En réalité, les régions de hautes latitudes sont défavorisées beaucoup plus que nous avons vu déjà, car il faut tenir compte de la présence de l'atmosphère, qui n'est jamais transparente, qui absorbe, diffuse et réfléchit une importante partie de l'énergie solaire. Or les pertes sont beaucoup plus importantes avec des rayons inclinés (qui effectuent une "longue traversée" dans l'atmosphère) qu'avec des rayons verticaux. Si l'on peut difficilement parler de "l'épaisseur" de l'atmosphère, puisqu'il n'y a pas de limite tranchée vers le haut, en revanche la notion de la **masse atmosphérique** s'impose. Cette masse atmosphérique traversée croît de façon inversement proportionnelle au sinus de la hauteur du Soleil (loi de Bouger).

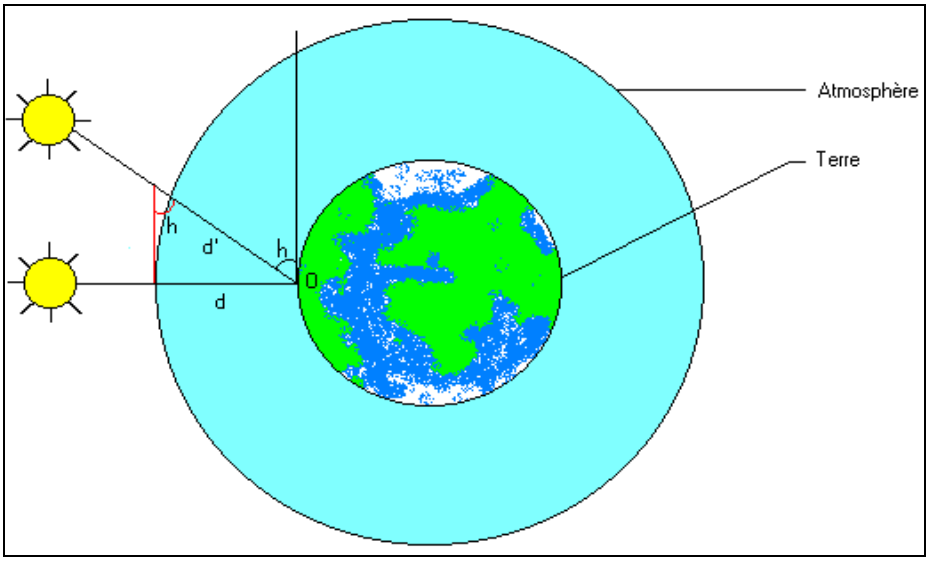

Figure II.6

Soient :

h la hauteur du soleil.

d la distance que parcourt dans l'atmosphère le rayon solaire normale incident en un lieu O.

d' la distance du rayon solaire incident suivant la hauteur **h** du soleil.

d' est donnée par la formule : $d' = \frac{d}{\sin h}$

En attribuant conventionnellement la valeur 1 pour des rayons solaires zénithaux on obtient :

Hauteur du Soleil	Masse atmosphérique traversée
90º	1
60º	1.15
30º	2.00
10º	5.70
5º	10.80

Tableau II.2 [5]

d- Albédo dans les régions polaires :

Il est clair que la hauteur du Soleil et la masse atmosphérique agissent dans le même sens et cumulent leurs effets pour accentuer les inégalités entre les latitudes et défavoriser plus spécialement les régions polaires qui sont aussi victimes d'albédos très élevés (revêtement neigeux) et sujettes de ce fait à des déperditions d'énergie considérables.

C- Instruments de mesure :

Nous avons expliqué précédemment les notions concernant quelques paramètres (durée d'insolation, irradiation globale) et détaillé le calcul théorique correspondant.

Dans cette partie de notre mémoire nous allons nommer les instruments avec lesquels nous pouvons mesurer la durée d'insolation et l'énergie solaire et les décrire. Ensuite nous présenterons quelques courbes et diagrammes relatifs à des mesures expérimentales qui nous étaient fournies par le service météorologique de l'aéroport international de Beyrouth. Enfin nous ferons une comparaison entre les valeurs théoriques et les mesures expérimentales.

1- Instruments de mesure :

Pour pouvoir décrire les instruments de mesure, et prendre connaissance de leurs modes de fonctionnement, nous sommes allés à la station de mesures météorologiques située au Golf Club (autoroute de l'aéroport international de Beyrouth).

a- Héliographe :

L'héliographe est un instrument qui enregistre la durée d'insolation. Il a été inventé en 1853 par le Britannique J.F. CAMPBELL et l'instrument a été amélioré par Sir George Gabriel STOKES en 1879. L'héliographe classique est constitué d'une sphère de verre qui concentre le rayonnement solaire sur une bande de papier qui brûle partiellement. [7]

L'héliographe que nous avons vu à la station météorologique à Beyrouth est plus moderne. Il est à cellules photovoltaïques (figure II.7). Il mesure la durée pendant laquelle l'éclairement solaire est supérieur à un seuil fixé ($120 W/m^2$). L'instrument délivre une tension électrique sensiblement proportionnelle à l'intensité du rayonnement direct. Les héliographes doivent être orientés en fonction du nord géographique et de la hauteur du soleil sur l'horizon. Ils sont placés dans un endroit découvert, loin de tout obstacle qui produirait des ombres.

Figure II.7 : Héliographe à cellule photovoltaïque

b- Pyranomètre :

Le **pyranomètre** est un appareil qui mesure le rayonnement ou l'irradiation global du ciel (en $W/m^2/s$). Il comprend une double coupelle de verre, une série de thermocouples (thermopiles) et un système d'enregistrement de la force électromotrice produite par l'ensemble de rayonnement.

Pour mesurer uniquement le rayonnement diffus, on ajoute un pare-soleil métallique, appelé solarimètre, qui protège le pyranomètre du rayonnement solaire direct. Le pyranomètre observé au Golf Club est présenté dans les figures II.8 et II.9.

Figure II.8 :Pyranomètre (vue raprochée).

Figure II.9 : Pyranomètre (vue de loin)

2- D'autres instruments observés :

a- Pluviomètre : le pluviomètre est l'instrument de base de la mesure des précipitations liquides ou solides. Il indique la pluie globale précipité dans l'intervalle de temps séparant deux relevés.

Figure II.10 : Pluviomètre à augers basculeurs.

b- Girouette et anémomètre :

- La girouette : c'est l'instrument de mesure qui nous donne la direction du vent.
- Anémomètre électrique : la vitesse du vent est mesurée à l'aide du courant électrique fourni par une dynamo entraînée par une hélice ou par des coupelles tournant sous l'effet du déplacement de l'air.

Figure II.11 : Anémomètre (à gauche) et girouette (à droite).

Chapitre III
Étude et Contrôle
des mesures expérimentales

A- Introduction :

Dans ce chapitre, nous allons comparer les valeurs théoriques et expérimentales de la durée d'insolation (SS_o et SS) et les valeurs théoriques et expérimentales (g_o et g) du rayonnement global. Ensuite, en nous basant sur quelques raisonnements théoriques définissants des valeurs extrêmes, maximales et minimales, nous avons calculé des intervalles d'encadrement contenant les valeurs exactes. Les mesures situées hors de ces intervalles d'encadrement seront considérées erronées.

B- Données solaires :

Durant notre visite à la station météorologique au Golf Club à Beyrouth, la direction de la station nous a fourni un fichier contenant les valeurs de la durée d'insolation et de l'irradiation globale pour les quatre années allant de 2000 jusqu'à 2003. La figure III.1 représente ces deux grandeurs en fonction du temps durant l'intervalle de quatre ans.

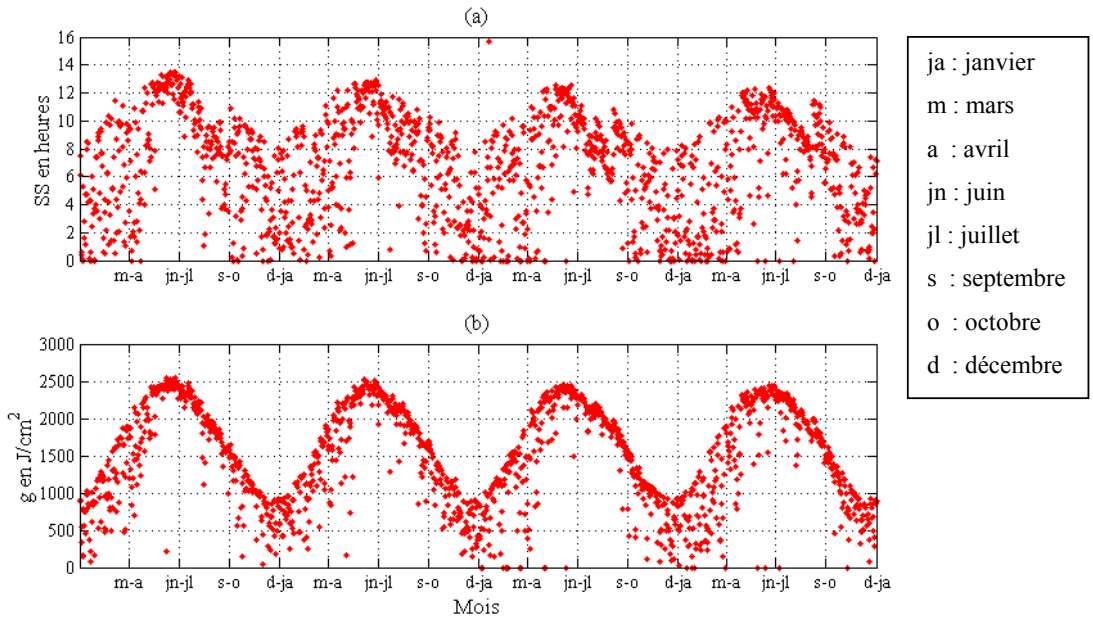

Figure III.1 : Les valeurs expérimentales de la durée d'insolation (a) et de l'irradiation globale (b) en fonction du temps durant les années 2000-2003 à Beyrouth.

1- Durée d'insolation :

La durée d'insolation SS est la somme des durées d'une même journée, pendant lesquelles le disque solaire est visible.

Plusieurs obstacles (nuages, montagnes …) peuvent entraver l'apparition du Soleil et rendre ainsi la durée d'insolation SS inférieure à sa valeur théorique SS_o. La figure III.2 montre l'évolution de cette dernière (sinusoïde bleue) au cours d'une période de quatre ans, allant de l'année 2000 jusqu'à 2003. Sur le même graphique, les points rouges représentent la durée d'insolation SS mesurée à la station météorologique au Golf Club à Beyrouth, le long de la même période.

Nous remarquons facilement que la sinusoïde SS_o, limite supérieurement le nuage des points représentant la durée d'insolation SS.

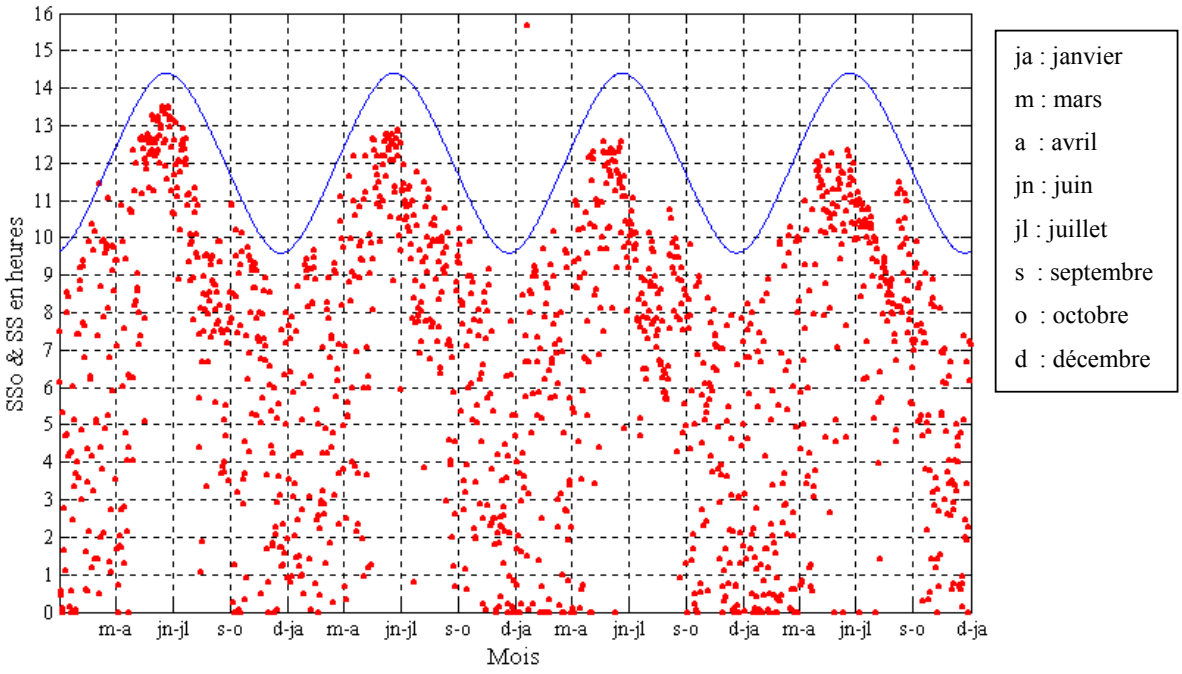

Figure III.2 : Les valeurs théoriques (sinusoïde bleue) et expérimentales (points rouges) de la durée d'insolation en fonction du temps durant les quatre ans 2000-2003 à Beyrouth.

2- Irradiation globale :

En ce qui concerne l'irradiation globale, la figure III.3 montre également la concordance entre la sinusoïde représentant (en ligne bleu) l'irradiation globale g_o à la limite de l'atmosphère, et le nuage de points (en rouge) représentant l'irradiation globale g du Soleil. On remarque alors que g est toujours inférieure à g_o. Cette différence s'explique par la présence de quelques obstacles (nuages, atmosphère, etc.), qui empêchent l'arrivée des rayons solaires durant des périodes de la journée plus ou moins longues.

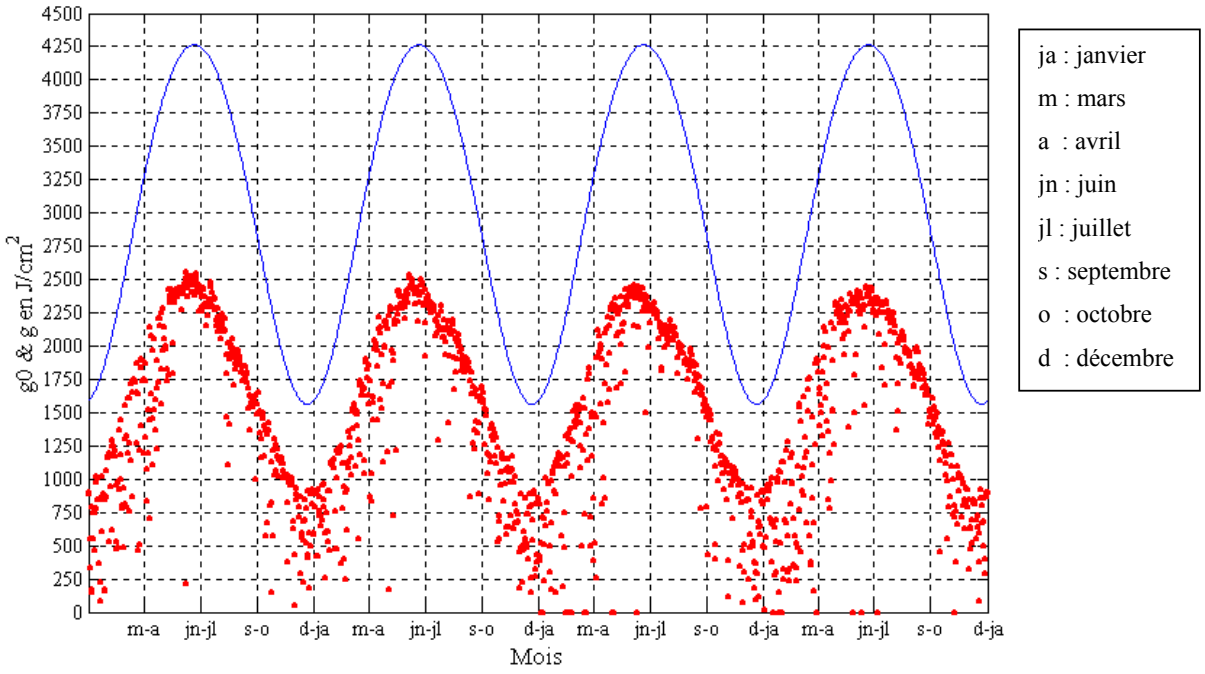

Figure III.3 : Les valeurs théoriques (sinusoïde bleue) et expérimentales (points rouges) de l'irradiation globale en fonction du temps durant les quatre ans 2000-2003 à Beyrouth.

3- Relation entre l'irradiation globale g et la durée d'insolation SS :

En dressant l'histogramme de la valeur moyenne journalière de l'irradiation globale de chaque mois de l'année (Figure III.4), ainsi que l'histogramme représentant la moyenne journalière de la durée d'insolation de chaque mois (Figure III.5), nous remarquons que les deux courbes enveloppant les barres de chaque histogramme ont la même allure, chaque courbe croissante à partir du mois de janvier, arrivant au mois de juin à son maximum et puis décroissante pour arriver en décembre à une valeur minimale.

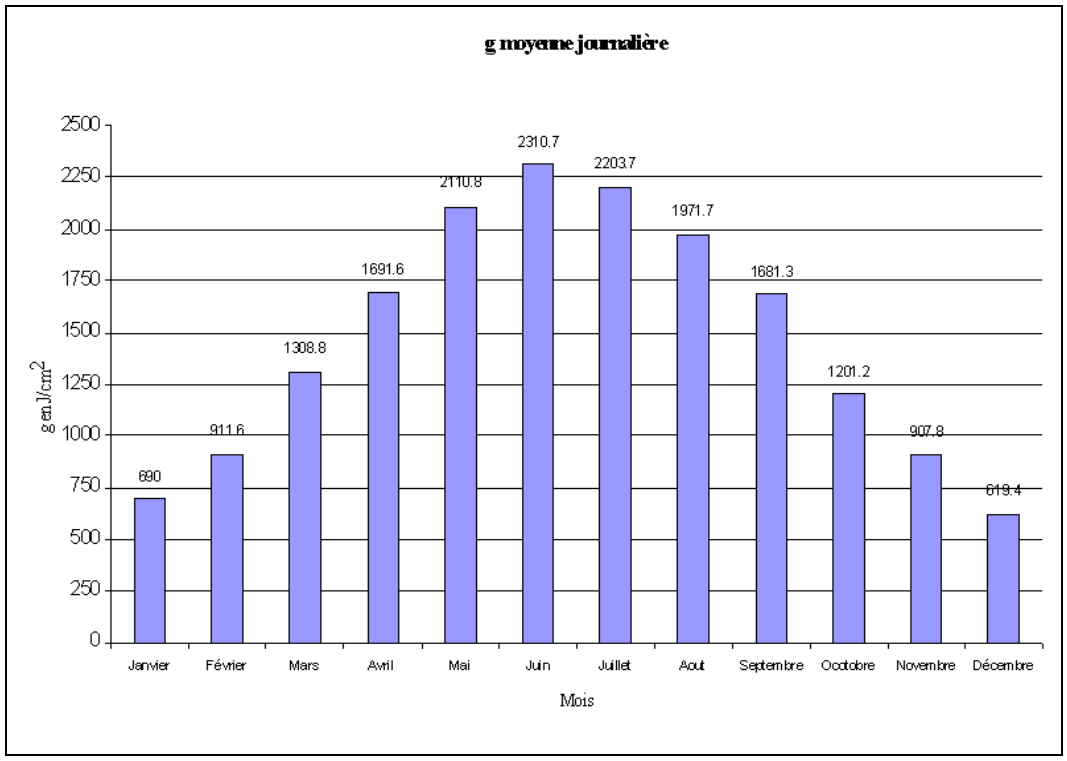

Figure III.4 : Les valeurs moyennes journalières expérimentales, pour chaque mois, de l'irradiation globale durant les quatre années 2000-2003 à Beyrouth.

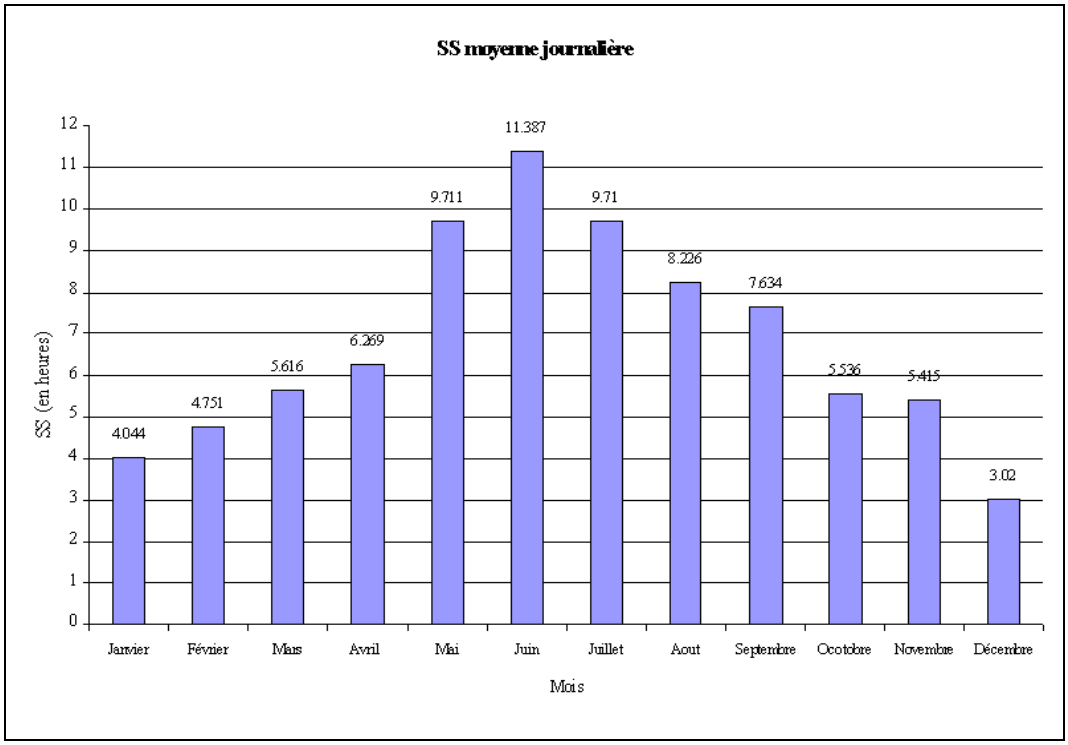

Figure III.5 : Les valeurs moyennes journalières expérimentales, pour chaque mois, de la durée d'insolation durant les quatre ans 2000-2003 à Beyrouth.

La quantité d'énergie solaire qui arrive au sol est grande pour les jours ensoleillés, et petite pour les jours auxquels le ciel est couvert. Ce fait nous permet de penser à l'existence d'une certaine relation de proportionnalité entre l'irradiation globale journalière g et la durée d'insolation journalière SS. Cette proportionnalité ou corrélation peut être recherchée en traçant la droite des moindres carrés pour le nuage de points (SS, g) et de calculer le carré du coefficient de corrélation linéaire R^2 correspondante. La figure III.6 représente la distribution des points (SS, g) relative à une période de quatre ans. La valeur du carré du coefficient de corrélation linéaire correspondante est $R^2 = 0.73$.

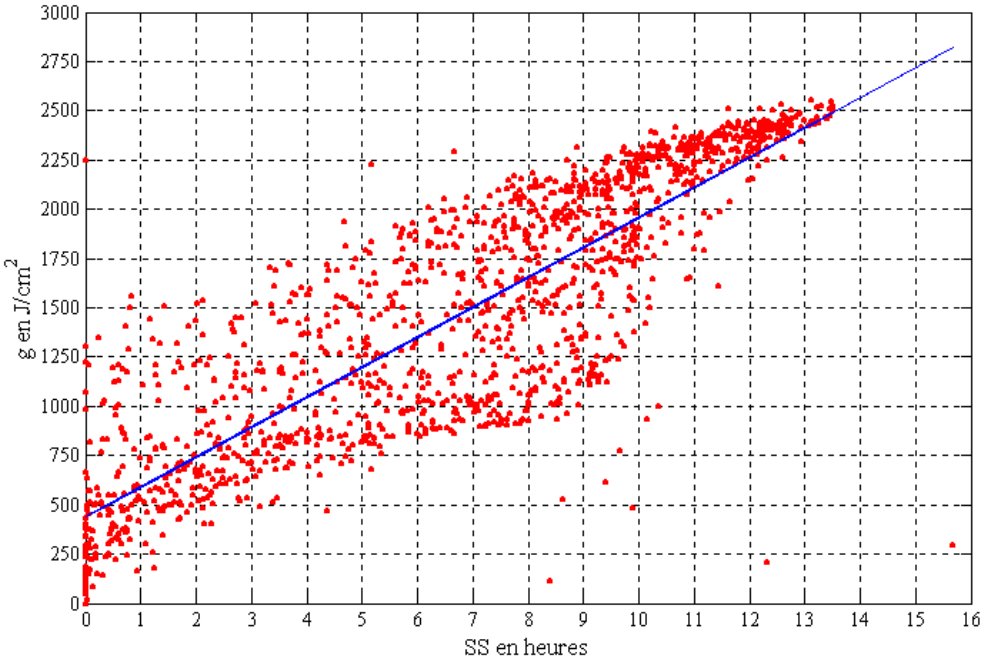

Figure III.6 : Les mesures expérimentales de l'irradiation globale en fonction de celles de la durée d'insolation durant les quatre ans 2000-2003 (points rouges). La droite des moindres carrés est en bleu.

Pour améliorer ce résultat, nous avons pensé à refaire le même travail, mais pour chaque mois à part. La figure III.7 correspond au mois d'avril pour les quatre ans. La valeur correspondante de R^2 est 0.84.

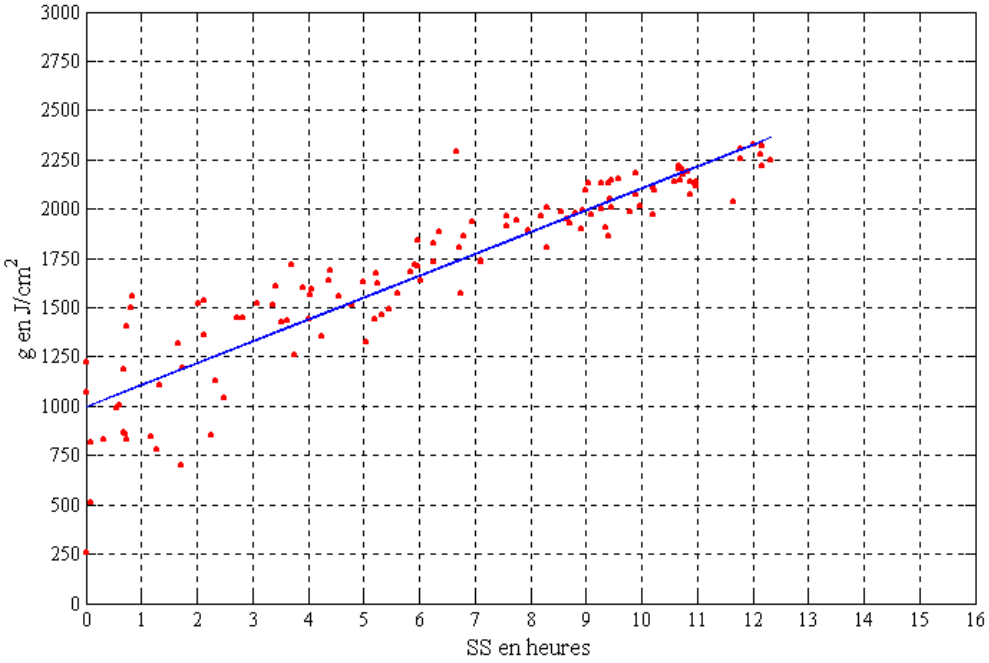

Figure III.7 : Les valeurs expérimentales de l'irradiation globale en fonction de celles de la durée d'insolation pour les mois d'avril des années 2000-2003 à Beyrouth (points rouges) et la droite des moindres carrés (droite bleue).

C- Contrôle des données de SS et g :

Durant notre travail sur les mesures fournies par la direction de la station au Golf Club, nous avons constaté l'existence de certaines **mesures erronées**. Par la suite, nous allons identifier ces valeurs erronées en expliquant le fondement de la méthode adoptée et en citant les moyens que nous avons utilisés pour réaliser cette identification. Ce travail nous a permis d'éliminer les valeurs erronées et de corriger ainsi le fichier de mesures.

1- Contrôle des mesures de la durée d'insolation SS :

En examinant la figure III.8, on constate l'existence de deux valeurs « erronées » de SS (représentées en * noires) qui dépassent les valeurs maximales SS_o correspondantes.

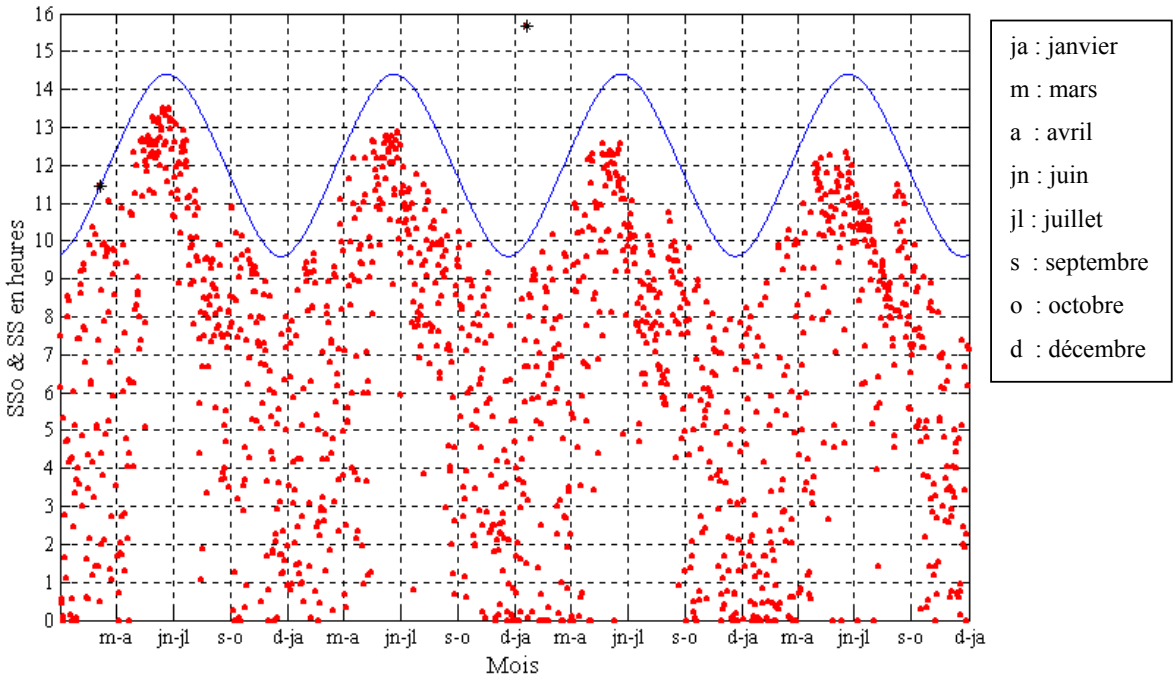

Figure III.8 : Les valeurs théoriques (sinusoïde bleue) et expérimentales (points rouges) de la durée d'insolation en fonction du temps durant les quatre ans 2000-2003. Les étoiles noires représentent des valeurs erronées.

2- Contrôle des mesures de l'irradiation globale g :

a- Valeurs de g nulles :

Toutes les valeurs nulles de l'irradiation globale peuvent être considérées erronées, car malgré tous les obstacles qui peuvent cadrer le soleil, on doit toujours recevoir une quantité d'énergie mesurable. Pour cela, g ne peut jamais être nulle.

En effet, les valeurs représentants cette anomalie sont représentées sur la figure III.9 par les étoiles jaunes situées sur l'axe des abscisses.

ja : janvier	a : avril	jl : juillet	o : octobre
m : mars	ju : juin	s : septembre	d : décembre

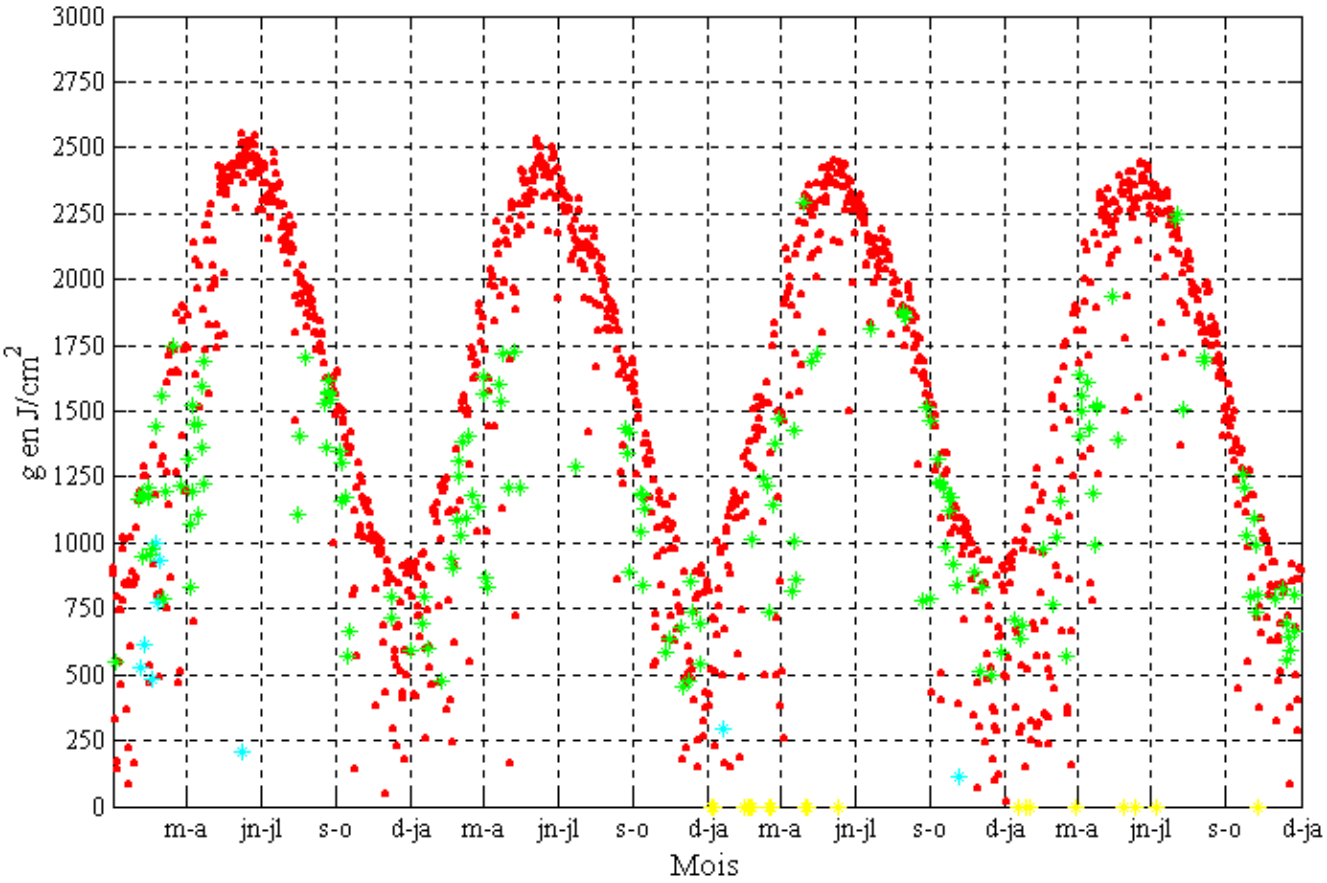

Figure III.9 : les valeurs expérimentales de l'irradiation globale en fonction du temps pour les quatre ans 2000-2003. Les points rouges représentent les valeurs exactes.(Les étoiles jaunes, vertes et turquoises représentent les valeurs erronées qui sont respectivement les valeurs nulles, les valeurs supérieures à la valeur maximale et les valeurs inférieures à la valeur minimale).

b- Valeurs de g hors l'intervalle d'encadrement [g_{min} , g_{max}] :

Le graphe représentant le sinus de l'une des deux coordonnées horizontales h en fonction du temps t, nous permet de déterminer l'irradiation journalière expérimentale maximale g_{max} (Figure III.10) et minimale g_{min} (Figure III.12).

La courbe sin h(t) coupe l'axe du temps en deux points correspondants respectivement au lever et au coucher du soleil. La durée qui sépare ces deux points est donc égale à la durée d'insolation maximale SS_o. La durée d'insolation effective SS est obligatoirement plus petite ou égale à SS_o.

- Détermination de g maximale :

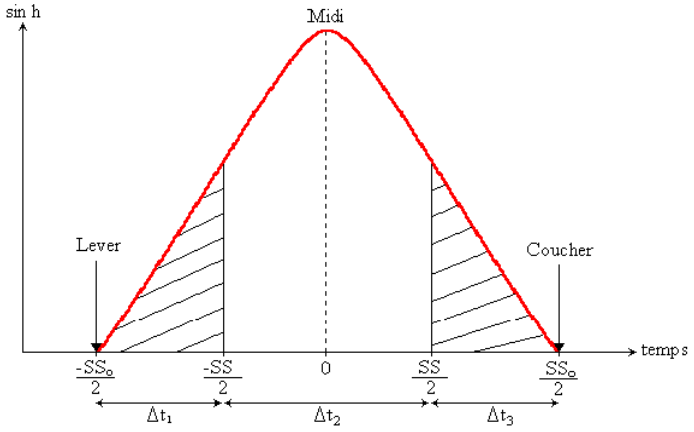

Figure III.10 : Le sinus de la hauteur du Soleil durant un jour donné en fonction du temps. La surface hachurée représente le temps durant lequel le ciel est couvert.

Pour un jour donné, pour lequel la durée d'insolation SS est connue, on peut déterminer la valeur maximale g_{max} de l'irradiation globale pouvant être mesurée au sol. Ainsi, toute mesure de g supérieure à g_{max}, peut-elle être considérée erronée.

Pour expliquer notre méthode, nous allons supposer que toute la durée d'insolation SS est située au milieu de la journée, de façon symétrique par rapport au midi solaire vrai (Δt_2 = SS) (Figure III.10).

Pendant cet intervalle de temps Δt_2, l'irradiation globale g_{o2} arrivant à la limite de l'atmosphère est :

$$g_{o2} = I_o \int_{\frac{-SS}{2}}^{\frac{SS}{2}} \sinh .dt$$

L'examen de la figure III.11 montre que pour les jours ensoleillés, la fraction de l'irradiation qui arrive au sol est environ $\frac{g}{g_o} = 0.6$. Pour calculer l'irradiation globale maximale g_{2max} relative à l'intervalle de temps Δt_2 et pour avoir une marge de sécurité, nous avons multiplié g_{o2} par 0.75 au lieu de 0.6, c'est à dire : $g_{2max} = g_{o2} * 0.75$. De l'autre côté, nous savons que l'héliographe ne détecte une insolation que lorsque la puissance solaire reçue est supérieure à I = 120 W/m^2 (§ II.C.1.a). Donc pour les intervalles non ensoleillés Δt_1 (après le lever) et Δt_3 (avant le coucher), on peut calculer les irradiations globales maximales g_{1max} et g_{3max} en supposant que la puissance reçue durant ces intervalles non ensoleillés est maximale et égale à I ; d'où le résultat :

$$g_{1max} = I.\Delta t_1$$
$$g_{3max} = I.\Delta t_3$$

puisque $\Delta t_1 = \Delta t_3 = \frac{SS_o - SS}{2}$

on peut écrire enfin : $g_{1max} + g_{3max} = I\,(SS_o - SS)$

L'irradiation globale maximale g_{max} pour toute la journée, correspondante aux trois intervalles Δt_1, Δt_2 et Δt_3 est :

$$g_{max} = g_{1max} + g_{3max} + g_{2max}$$

d'où : $$\boxed{g_{max} = I\,(SS_o - SS) + 0.75\, I_o \int_{\frac{-SS}{2}}^{\frac{SS}{2}} \sinh .dt}$$

Donc, après avoir calculer la valeur de l'irradiation journalière maximale expérimentale g_{max}, chaque valeur de g supérieure à cette dernière est considérée erronée et peut être éliminée. Ces valeurs sont représentées sur la figure III.9 par les étoiles vertes.

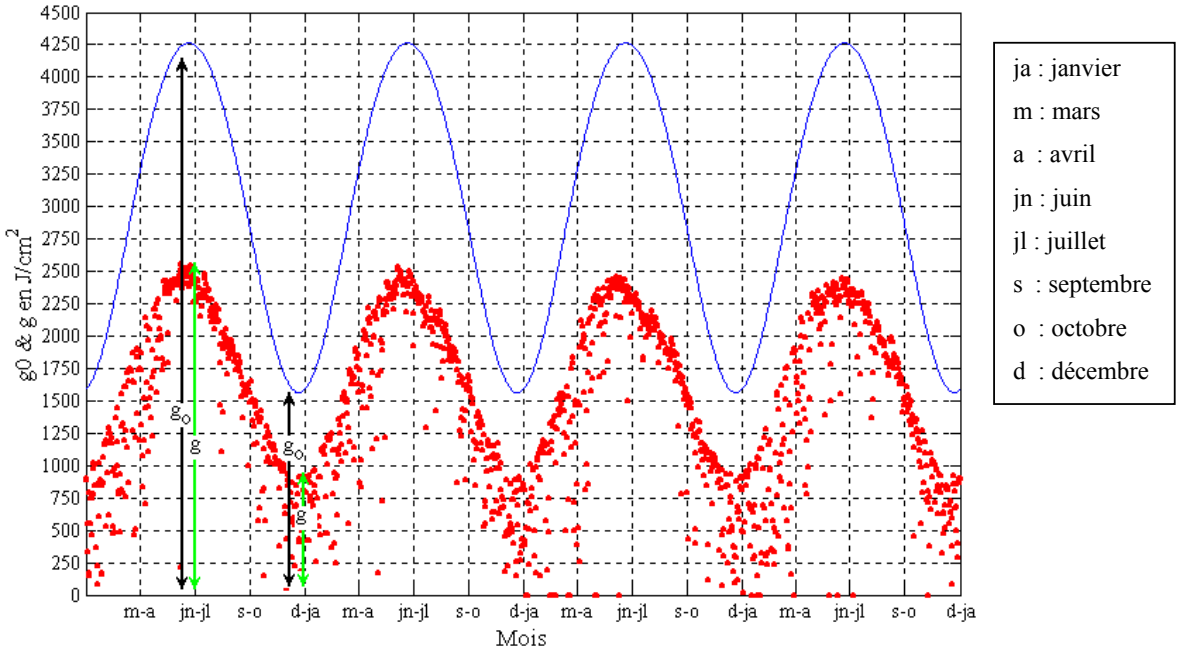

Figure III.11 : Les valeurs théoriques (sinusoïde bleue) et expérimentales (points rouges) de l'irradiation globale en fonction du temps durant les quatre ans 2000-2003. (Le rapport entre l'irradiation globale maximale expérimentale (le 21 juin) et celle de l'irradiation globale théorique est : $\frac{g}{g_o} = 0.6$. Le 21 décembre ce rapport est : $\frac{g}{g_o} = 0.54$).

- <u>Détermination de g minimale :</u>

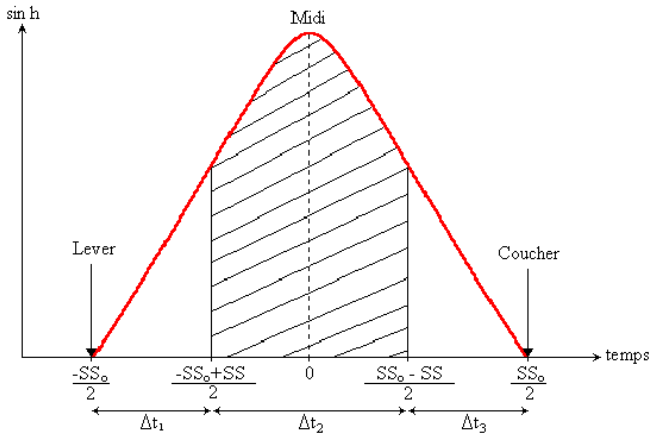

Figure III.12 : Le sinus de la hauteur du Soleil durant un jour donné en fonction du temps. La surface hachurée représente le temps durant lequel le ciel est couvert.

Pour un jour donné, nous allons calculer dans ce paragraphe l'énergie globale minimale g_{min} reçue au sol par l'unité de surface.

Pour faire ce travail, nous allons supposer que toute la durée d'insolation effective est située aux deux intervalles de temps Δt_1 (après le lever) et Δt_3 (avant le coucher) (Figure III.12). Les irradiations globales reçues à la limite de l'atmosphère pendant ces deux intervalles de temps sont appelées g_{o1} et g_{o3} tel que :

$$g_{o1} = g_{o3} = I_o \int_{\frac{SS_o - SS}{2}}^{\frac{SS_o}{2}} \sinh .dt$$

La référence à la figure III.11 permet de constater que pour les jours ensoleillés, l'irradiation arrivant au sol est telle que :

$\frac{g}{g_o} = 0.54$ autrement dit : $g = 0.54\ g_o$

Donc pour obtenir les irradiations globales minimales expérimentales g_1 et g_3 correspondantes aux deux intervalles Δt_1 et Δt_3, et pour garder une marge de sécurité, nous avons multiplié les irradiations globales théoriques g_{o1} et g_{o3} par 0.5 au lieu 0.54. L'expression de g_1 et g_3 sera :

$g_{1min} = 0.5\ g_{o1}$

$g_{3min} = 0.5\ g_{o3}$

De plus, nous allons supposer que la puissance minimale reçue par l'héliographe pendant l'intervalle de temps Δt_2 est nulle [(1)]. On peut alors écrire que l'irradiation globale minimale g_{min} pour toute la journée est :

$$g_{min} = g_{1min} + g_{3min} = 2\ (\ 0.5\ I_o \int_{\frac{SS_o - SS}{2}}^{\frac{SS_o}{2}} \sinh .dt\ )$$

Donc, après avoir calculé la valeur de l'irradiation journalière minimale g_{min}, chaque mesure de g inférieure à cette dernière est considérée erronée. Ces valeurs erronées sont représentées sur la Figure III.9 par les étoiles de couleur turquoise.

[(1)] Effectivement, même dans un ciel couvert, l'irradiation globale reçue au sol n'est jamais nulle. Par conséquent, la vraie valeur minimale g_{min} est plus grande que celle que nous avons adoptée. Pour la déterminer exactement, nous avons besoin d'autres paramètres (irradiations diffuses, …)

D- Résultats :

Lors du contrôle, nous avons détecté 197 valeurs erronées. Parmi celles-ci, 168 valeurs sont plus grandes que la valeur maximale g_{max} (étoiles vertes), 9 valeurs sont plus petites que la valeur minimale g_{min} (étoiles turquoises) et 19 valeurs sont nulles (étoiles jaunes). Deux valeurs de la durée d'insolation expérimentale sont plus longues que les valeurs théoriques correspondantes au même jour (étoiles noires). Donc, toutes les valeurs restantes (1264 valeurs) sont représentées sur la figure III.9 par des points rouges.
Nous remarquons que le carré du coefficient de corrélation pour les quatre années s'est amélioré, sa valeur passe de $R^2 = 0.73$ à $R^2 = 0.81$. Sans oublier de noter que les points représentants les valeurs exactes se regroupent autour de la droite des moindres carrés. (Figure III.13).

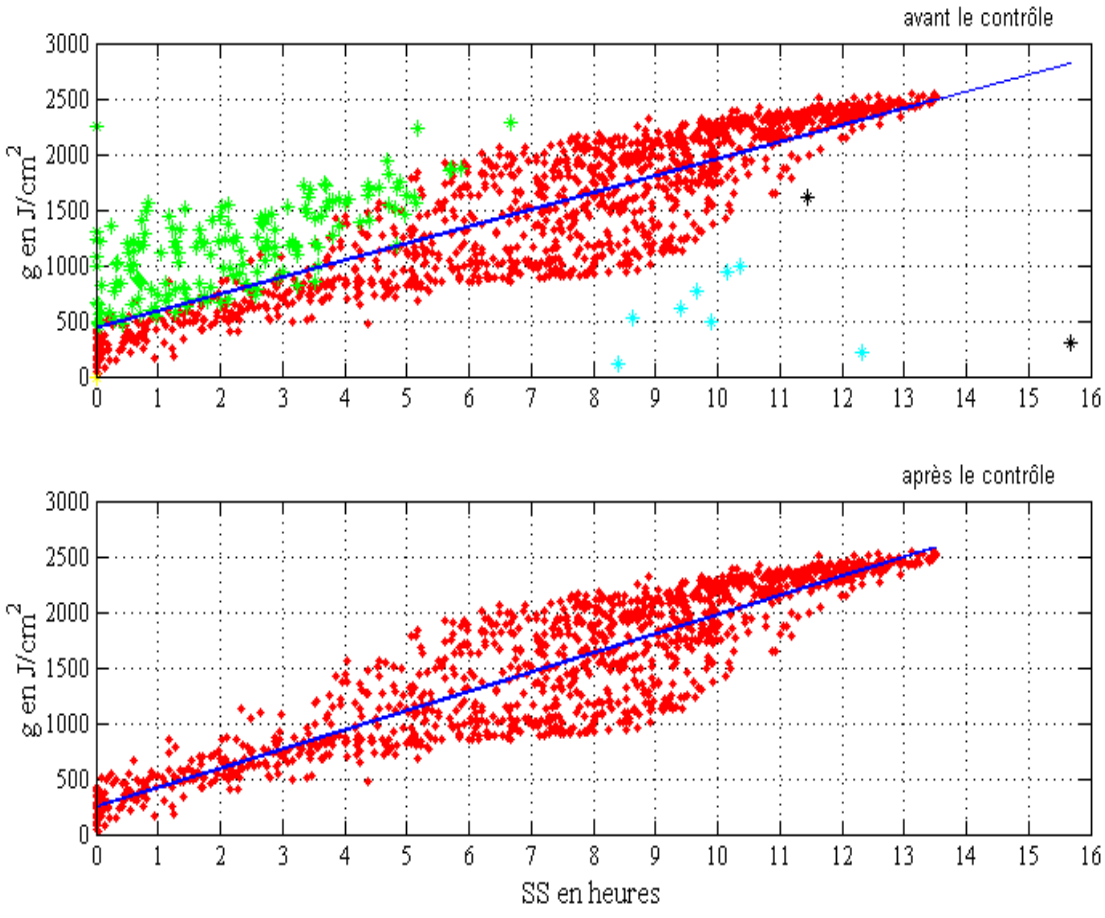

Figure III.13 : Les valeurs de l'irradiation globale en fonction de la durée d'insolation, durant quatre ans, avant et après le contrôle. La droite bleue représente la droite des moindres carrés.

La figure III.14 représente le résultat du contrôle que nous avons fait sur les mesures correspondantes aux deux mois d'avril des années 2000-2003.

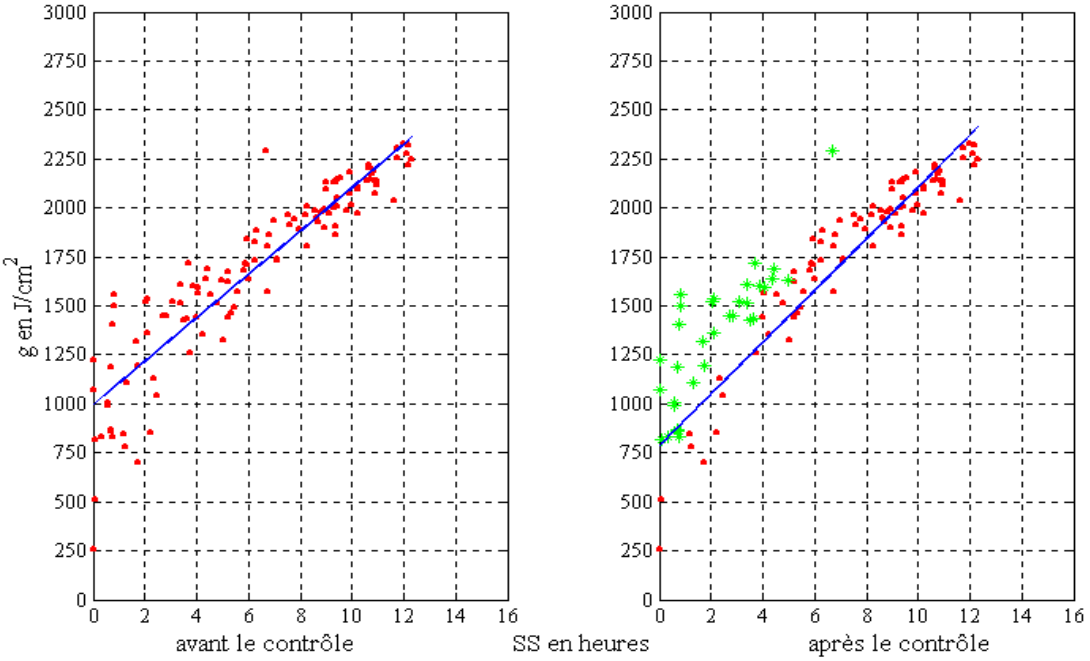

Figure III.14 : Les valeurs de l'irradiation globale en fonction de la durée d'insolation, durant le mois d'avril, avant et après le contrôle.

E- Remarques :

Notre deuxième visite à la station météorologique au Golf Club avait pour but de trouver la cause pour laquelle il y a eu des valeurs erronées. Nous nous sommes informés que les valeurs de l'irradiation globale g et de la durée d'insolation SS journalières sont saisies à la main puis recopiées sur ordinateur, ce qui peut entraîner beaucoup d'erreurs de lecture ou de copiage.

CONCLUSION

Dans ce travail, nous avons fait un traitement numérique des données ou mesures solaires fournies par la station météorologique au Golf club.

D'abord, nous avons calculé les valeurs théoriques de l'irradiation globale journalière et de la durée d'insolation journalière. Ensuite, nous avons recherché une corrélation entre les deux grandeurs expérimentales étudiées, en dressant la droite des moindres carrés.

Après avoir comparé les mesures avec les valeurs théoriques correspondantes, nous avons constaté que celles-ci sont entachées de quelques erreurs d'origines diverses. Pour cela, nous avons consacré une partie de ce mémoire pour identifier ces erreurs.

Pratiquement, ce travail de contrôle n'est pas terminé, il n'a pas pu détecter toutes les valeurs erronées, il pourra être amélioré en utilisant des mesures horaires et d'autres paramètres comme les irradiations diffuses et directes.

ANNEXE

- La moyenne : La moyenne arithmétique d'une série de N observations $x_1, x_2, x_3, \ldots, x_n$ est le quotient de leur somme par leur nombre, on la note $\bar{x}$:

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + x_3 + \ldots + x_n}{N} = \frac{\sum_{i=1}^{n} x_i}{N}$$

- Ecart type : L'écart type est la racine carrée de la somme des carrés des écarts de toutes les observations par rapport à $\bar{x}$, divisée par leur nombre. (On l'appelle parfois écart quadratique noyau).

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{N}}$$

- Variance : La variance est le carré de l'écart type σ :

$$\sigma = \frac{1}{N} \sum (x_i - \bar{x})^2$$

- Covariance entre deux variables : Considérons deux variables x et y définies sur une même population. On appelle covariance entre x et y la quantité :

$$\mathrm{cov}(x, y) = \frac{\sum (x_i - \bar{x}).(y_i - \bar{y})}{n}$$

Cette définition généralise celle de la variance. En effet :

$$\mathrm{cov}(x, x) = \frac{1}{n} \sum (x_i - \bar{x}).\ (x_i - \bar{x}) = \frac{1}{n} \sum (x_i - \bar{x})^2 = \sigma^2(x)$$

La covariance est symétrique par rapport aux deux variables :

$$\operatorname{cov}(x,y) = \operatorname{cov}(y,x)$$

$$\operatorname{cov}(x,y) = \frac{1}{n}\sum x_i y_i - \overline{x}\,\overline{y}$$

$$\operatorname{cov}(ax+b, a'y+b') = a.a' \operatorname{cov}(x,y)$$

- Droite des moindres carrés : Parmi toutes les courbes qui approchent un ensemble donné de points, la courbe présentant la propriété

$$d_1^2 + d_2^2 + d_3^2 + ... + d_n^n = minimum$$

est la meilleure courbe d'ajustement. Une courbe présentant cette propriété est appelée une courbe des moindres carrés. On a donc une droite des moindres carrés, des paraboles des moindres carrés, etc.

1) Pour pouvoir tracer la droite des moindres carrés (y = ax + b) approchant l'ensemble des points $(x_1, y_1),.....,(x_n, y_n)$, il faut calculer a et b :

$$a = \frac{\left(\sum y\right)\left(\sum x^2\right) - \left(\sum x\right)\left(\sum xy\right)}{n\sum x^2 - \left(\sum x\right)^2} \qquad b = \frac{\sum\left(x-\overline{x}\right)\left(y-\overline{y}\right)}{\sum\left(x-\overline{x}\right)^2}$$

2) Droite des moindres carrés en fonction des variances et de la covariance des échantillons :

$$a = \frac{\operatorname{cov}(x,y)}{\sigma^2 x} \qquad \text{et} \qquad b = \overline{y} - a\overline{x} = \overline{y} - \left(\frac{\operatorname{cov}(x,y)}{\sigma^2 x}\right).\overline{x}$$

- Coefficient de corrélation : Lorsque le nuage statistique indique une dépendance relative entre x et y, on dit que les deux variables sont en corrélation. Le problème consiste à mesurer l'intensité de la liaison qui existe entre ces deux variables, c'est à dire mesurer le coefficient de corrélation « R ».

"R" est donné par la formule :

$$R = \frac{\sum x_i y_i - n\bar{x}\bar{y}}{\sqrt{\left(\sum x_i^2 - n\bar{x}^2\right)\left(\sum y_i^2 - n\bar{y}^2\right)}} \qquad \text{ou} \qquad R = \frac{\mathrm{cov}(x,y)}{\sigma_x \sigma_y}$$

alors : $R = a\frac{\sigma_x}{\sigma_y}$

Si la valeur de "R" est comprise entre 0.8 et 1 ($0.64 < R^2 < 1$), on dit que la corrélation entre x et y est bonne. Pour R = 1, la corrélation est parfaite.

Si la valeur de R est comprise entre 0.6 et 0.8 ($0.36 < R^2 < 0.64$), la corrélation est moyenne.

Si R est inférieur à 0.6 ($R^2 < 0.36$), la corrélation est à rejeter.

- Interprétation de la corrélation : Les coefficients de corrélation sont essentiellement de simples caractéristiques de liaison apparente, la constatation d'un coefficient de corrélation élevé n'implique pas nécessairement l'existence d'une relation de causalité entre ces phénomènes.

RÉFÉRENCES

[1] : J. R. HICKEY, B. M. ALTON, F. J. GRIFFIN, H. JACOBOWITZ, P. PELLEGRINO, R. H. MASCHHOFF, E. A. SMITH and T. H. VON DER HAAR : "*Extraterrestrial solar irradiance variability. Two and one half years of measurements from NIMBUS7*". Solar Energy, Vol. 29, Nº2, pp 125-127 (1982).

[2] : P. BAKOULINE, E. KONONOVITCH et V. MOROZ "*Astronomie générale*" Edition MIR – MOSCOW (1981).

[3] : S. DIB, "*Contribution à l'étude du gisement solaire, contrôle des données G, D et I ; application à Trappes et Carpentas*" , Thèse : ULP Strasbourg 1983.

[4] : Agnès ACKER: "*Initiation à l'astronomie* ", p. 34.

[5] : Pierre ESTIENNE, "*Climatologie*", p. 22, p. 23, p. 25, p. 29.

[6] : Jean DEMANGEOT, "*Les milieux naturels du globe*", p. 25.

[7] : Http://www2.ac-lille.fr/physiquechimie/meteo_3/meteo3b.htm

RÉSUMÉ

Ce travail représente une contribution à l'étude du gisement solaire à Beyrouth.

En faisant un traitement numérique des mesures fournies par la station météorologique à l'aéroport international de Beyrouth, nous avons étudié l'irradiation globale et la durée d'insolation sur une période de quatre ans, allant du début de l'an 2000 jusqu'à la fin de l'an 2003.

Mots clés : Energie solaire, irradiation globale, durée d'insolation, corrélation linéaire.

SUMMARY

This work represents a contribution to the study of the solar layer in Beirut.

By making a numerical analysis to the values given by the meteorology station at the international airport of Beirut, we studied the global irradiance and the insolation period of the sun in a period of four years, beginning with the year 2000 and ending with the year 2003.

Key words : Solar energy, global irradiance, illumination period of the sun,

linear correlation.