



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement supérieur et de la recherche scientifique



UNIVERSITE DE BATNA

Faculté des Sciences de l'Ingénieur

Département d'Electrotechnique

Mémoire de Magister en Electrotechnique

Option : Maîtrise des Energies

Présenté par :

Benbouza Naima

Ingénieur d'état en Electrotechnique de l'université de Biskra

Pour obtenir le diplôme de Magister en Electrotechnique

Thème

Etude du rayonnement solaire dans la région de Batna

Mémoire soutenu le / / 2008

Devant le jury composé de :

<i>Jury</i>	<i>Grade</i>	<i>Affiliation</i>	<i>Qualité</i>
<i>LOUAI Fatima Zohra</i>	Prof	Université de Batna	Président
<i>AZOUI Boubakar</i>	Prof	Université de Batna	Rapporteur
<i>CHABANE Mabrouk</i>	Prof	Université de Batna	Examineur
<i>BATKA Achour</i>	M.C.	Université de Biskra	Examineur
<i>BENFARHI Louiza</i>	M.C.	Université de Batna	Examineur
<i>MOKHNACHE Leila</i>	M.C.	Université de Batna	Examineur

Remerciement

Je remercie Dieu le tout puissant de m'avoir donné courage et patience qui m'a permis d'accomplir ce modeste travail.

Je tiens à exprimer mes vifs remerciements et mes profondes gratitude à mon promoteur :

***Mr Azoui Boubaker** d'avoir suivi mon travail et d'avoir mis à ma disposition tout le matériel nécessaire.*

*Je remercie infiniment tous les enseignants qui ont contribué à notre formation, particulièrement **Mr Abdessamed Rachid** qui avec ses encouragements me donne à chaque fois une nouvelle force pour continuer le chemin de la réussite.*

*J'exprime aussi mes remerciements pour **Mr Bendib Toufik** pour son aide pour le prélèvement des mesures expérimentales au niveau du site Eurosolaire à l'Université de Batna.*

Je remercie infiniment les enseignants examinateurs de ce mémoire pour avoir accepté de le prendre en charge.

***LOUAI Fatima Zohra**
CHABANE Mabrouk
BATKA Achour
BENFARHI Louiza
MOKHNACHE Leila*

Je tiens aussi à remercier tous mes collègues pour leur aide matériel et leur soutien moral durant notre formation.

Sommaire

<i>Remerciement</i>	i
<i>Liste des symboles</i>	V
<i>Introduction Générale</i>	1

Chapitre I: Aspect Géométrique de l'énergie solaire

I-1-Introduction	3
I-2-Les mouvements de la terre	3
I-2-1-Mouvement de rotation	3
I-2-2-Mouvement de translation	3
I-3-Distance Terre-Soleil	5
I-4- Correction de la distance terre-soleil $c(N)$	6
I-5-Repérage d'un site à la surface terrestre	7
I-6-Détermination de la direction du soleil	9
I-6-1-Coordonnées horizontales	9
I-6-2-Coordonnées équatoriales	10
I-7- Cercles remarquables de la Terre	12
I-7-1- Zone arctique (ou zone polaire nord)	12
I-7-2- Zone moyenne Nord	12
I-7-3- Zone intertropicale ou zone équatoriale	13
I-7-4-Zone moyenne sud	13
I-7-5- Zone antarctique ou zone polaire sud	13
I-8-Mouvement apparent du soleil	13
I-9-Temps solaires	15
I-9-1-Temps solaire moyen	15
I-9-2- Temps solaire vrai	15
I-9-3- Équation du temps	16
I-9-4- Temps universel TU	17
I-9-5 Temps légal TL	17
I-10-Durée du jour	18
I-10-1-Lever et coucher du soleil	18
I-10-2-Durée du jour	18
I-11-Détermination de la position d'un plan quelconque	20
I-12- Angle d'incidence sur un plan quelconque	21
I-13- Plans particuliers importants	22
I-13-1 Plan horizontal.....	22
I-13-2-Plan vertical.....	22
I-13-3- Plan Sud.....	22
I-13-4- Plan TLE.....	23
I-15- Conclusion.....	23

Chapitre II : Rayonnement solaire hors atmosphère

II-1- Introduction.....	24
II-2- Aspect géométrique du rayonnement hors atmosphère.....	24
II-2-1- Définition.....	24
II-2-2- Expression de la puissance et de l'énergie du rayonnement hors Atmosphère.....	24
II-2-3-Expression de G_e sur le plan horizontal.....	25
II-3-Jour type du mois pour le rayonnement hors atmosphère.....	26
II-4-Aspect énergétique du rayonnement hors atmosphère.....	27
II-4-1- Le soleil.....	27
II-4-2- Spectre du rayonnement solaire	27
II-5- Influence de l'atmosphère	30
II-6- Composition de l'atmosphère terrestre	30
II-7-Masse atmosphérique.....	32
II-7-1-Lien de la masse atmosphérique à la pression.....	33
II-7-2-Masse atmosphérique relative.....	33
II-8- Atténuation du rayonnement solaire par l'atmosphère.....	35
II-8-1- Atmosphère de référence	36
II-8-2-Facteur de trouble total de LINKE.....	37
II-10-Conclusion.....	38

Chapitre III : Rayonnement solaire au niveau du sol

III-1-Introduction.....	40
III-2- Composantes du rayonnement.....	40
III-2-1-Notation.....	41
III-3-Formules d'évaluation des composantes du rayonnement solaire reçu au Sol.....	41
III-3-1-Rayonnement Direct.....	42
III-3-2- Rayonnement Diffus.....	42
III-3-2-1-Diffus du ciel.....	43
III-3-2-2- Diffusion du sol.....	44
III-3-2-3- Diffusion rétro-diffusée.....	45
III-4- Formules simplifiées pour la puissance du rayonnement solaire sur le plan horizontal pour un jour clair.....	45
III-4-2- Formules de PERRIN DE BRICHAMBEAU.....	45
III-4-1- Formules de HOTTEL et LIU JORDAN.....	46
III-5-Formules simplifiées pour l'énergie du rayonnement solaire sur le plan horizontal pour un jour clair.....	46
III-5-1-Formules de Perrin de Brichambaut.....	46
III-5-1-Formules de Bernard, Mengy et Schwartz.....	47
III-6- Rayonnement solaire moyen en présence des nuages.....	47
III-6-1-Fraction d'insolation.....	47
III-8-Relation concernant les énergies	48
III-8-1-Formule de Black.....	48

III-8-2-Formule d'Angstrom.....	49
III-8-3- Relation entre Diffus D_{d} et σ	49
III-9-Formule de Liu Jordan pour le calcul de l'énergie globale reçue sur un plan incliné.....	49
III-10-Appareils de mesure	50
III-10-1-Mesure de la fraction d'insolation.....	50
III-10-2-Mesure du rayonnement solaire global.....	50
III-10-3-Mesure du rayonnement direct.....	51
III-11- Conclusion.....	52

Chapitre IV: Application et vérification des formules du rayonnement solaire

IV-1-Introduction.....	53
IV-2- Situation de la région de Batna.....	53
IV-3-Application des différentes formules.....	53
IV-3-1-Durée du jour.....	53
IV-3-2-Influence de la latitude sur la durée du jour	54
IV-4-Rayonnement hors atmosphère	55
IV-4-1-Variation de l'énergie hors atmosphère en fonction de la Latitude.....	56
IV-5- Puissance du rayonnement solaire reçue au sol sur un plan horizontal et un plan incliné.....	57
IV-5-1- Energie reçue sur un plan horizontal.....	59
IV-6-Vérification expérimentale des formules du rayonnement solaire.....	59
IV-7-Energie journalière mensuelle moyenne pour un jour clair sur un plan horizontal.....	62
IV-8- Energie solaire reçue au sol sur un plan horizontal pour un jour quelconque.....	63
IV-8-1-Estimation de l'énergie solaire directe et diffus sur un plan horizontal pour un jour quelconque.....	66
IV-9-Energie solaire globale mensuelle reçue sur un plan incliné.....	68
IV-9-1-Energie solaire reçue au sol sur un plan incliné à la latitude.....	69
IV-9-2-Energie solaire reçue au sol sur un plan d'une inclinaison Optimale.....	69
IV-10- Comparaison entre les trois cas.....	70
IV-11-Angle d'inclinaison optimale saisonnière.....	71
IV-12-Optimisation de l'énergie solaire par la méthode des systèmes de poursuite du soleil.....	74
IV-12-1-principe de la méthode.....	74
IV-12-2- Poursuite continue à un seul axe	74
IV-12-3- Poursuite quotidienne à un seul axe.....	75
IV-12-4- suivi à deux axes.....	75
IV-13- Vérification théorique de l'amélioration du gain de l'énergie incidente sur un capteur par le système de poursuite du soleil.....	76

IV-14-Exemple de réalisation d'un système de poursuite du soleil.....	79
IV-15- Comparaison des valeurs théoriques avec les résultats expérimentaux ..	81
IV-16- Comparaison de l'énergie incidente annuelle pour un système fixe et un système mobile à un axe et à deux axes	83
IV-16- Conclusion.....	85
Conclusion Générale	86
Références	88

Liste des symboles

Symbole	Définition
A_h	Alternance hivers / été
a	Demi-grand axe de la terre
b	Demi petit axe de la terre
$C(N)$	Correction de distance
D	Composante diffusée de l'énergie du rayonnement incident
D_i	Durée d'insolation quotidienne
D_0	Durée astronomique du jour
d	Durée du jour
$d(N)$	Distance Terre-Soleil
d_{dif}	Composante diffusée de la puissance du rayonnement incident
Et	Équation du temps
e	Excentricité
G	Composante globale de l'énergie du Rayonnement incident
G^e	Energie du rayonnement hors atmosphère
g	Composante globale de la puissance du rayonnement incident
g_n^e	Puissance hors atmosphère du rayonnement solaire par unité de surface sur un plan horizontal
H	Angle horaire
h	Hauteur du soleil
I_0	Constante solaire

i	Angle d'incidence
k	Coefficient d'atténuation total
m	Masse atmosphérique relative
m'	Masse atmosphérique
N	Numéro du jour de l'année
S	Composante directe de l'énergie du rayonnement incident
s	Composante directe de la puissance du rayonnement incident
T	Facteur de trouble total de LINKE
Tr	Période de rotation de la terre autour de son axe.
TSM	Temps solaire moyen
TSV	Temps solaire vrai
Tt	Période de rotation de la terre autour du soleil
TU	Temps universel
Vr	Vitesse linéaire de rotation de la terre
α	Azimut du capteur
β	Inclinaison du capteur
γ	Hauteur du capteur
δ	Déclinaison du soleil
φ	Latitude
ψ	Longitude
σ	Constante de Stefan-Bolzman
δ	Fraction d'insolation quotidienne
ρ	L'albédo du sol
λ	Longueur d'onde

Introduction générale

Le rayonnement solaire est à l'origine de plus de 90% de l'énergie consommée. L'homme, pour ses besoins, puise dans le cycle énergétique naturel (hydro-électricité, biomasse). Les problèmes engendrés par l'utilisation des énergies fossiles produites à des époques lointaines (charbon, gaz, pétrole) sont bien connus : pollution de l'air, effet de serre, production d'aérosols, etc. Face à cela, un effort accru existe depuis ces dernières décennies pour développer l'utilisation directe de l'énergie solaire afin de la transformer en chaleur, en électricité ou en une forme d'énergie chimique plus facilement stockable (hydrogène par exemple).

Le soleil décharge continuellement une énorme quantité d'énergie radiante dans l'espace. Une moyenne de 1367 Watts atteint chaque mètre carré du bord externe de l'atmosphère terrestre. La part d'énergie reçue sur la surface de la terre dépend de l'épaisseur de l'atmosphère à traverser. Une connaissance précise de la distribution de l'irradiation solaire sur un site géographique particulier est d'une grande importance pour le développement des systèmes photo thermiques ou photovoltaïques [1].

Le manque de moyens de mesure et la non disponibilité de stations météorologiques à grande échelle, représentent des difficultés qui ont obligé les chercheurs à penser à une mise au point de modèles dont le but est d'estimer les différentes composantes du rayonnement solaire.

L'Algérie dispose d'un des gisements les plus élevés au monde. La durée d'insolation sur la quasi-totalité du territoire national dépasse les 2000 heures annuellement et peut atteindre les 3900 heures dans les hauts plateaux et le Sahara [2].

La région de Batna (35.33°N, 6.11°E) en Algérie dispose d'un climat très favorable à l'utilisation de l'énergie solaire.

L'objectif de ce travail est d'une part de contribuer à l'élaboration d'un outil d'évaluation du rayonnement solaire global sur ce site à travers différents modèles qui permettent de calculer les composantes du rayonnement solaire tout en déterminant les angles d'inclinaison optimaux saisonniers et annuels et d'autre part

de faire une analyse du rayonnement solaire pour un système fixe et un système de poursuite du soleil.

Dans le premier chapitre on représente l'aspect géométrique du rayonnement solaire concernant les mouvements de la terre; la rotation et la translation et les différents paramètres qui interviennent dans le calcul du rayonnement solaire incident sur terre.

Le deuxième chapitre concerne le rayonnement hors atmosphère et l'influence de l'atmosphère sur celui-ci.

Dans le troisième chapitre on décrit le rayonnement solaire au niveau du sol en donnant ses différentes composantes : directe, diffusée et globale.

Dans le chapitre quatre une application des différents modèles du rayonnement solaire est faite pour la région de Batna en utilisant le logiciel Matlab. Les valeurs théoriques sont confrontées aux résultats expérimentaux. On a aussi présenté deux méthodes pour l'optimisation de l'énergie solaire produite par les panneaux solaires; l'une consiste à optimiser l'angle d'inclinaison des panneaux et l'autre est consacrée à l'utilisation des systèmes de poursuite du soleil.

Finalement le mémoire se termine par une synthèse des résultats obtenus pour la région de Batna et les perspectives de développement dans le proche avenir.

Chapitre -I- Aspect géométrique du rayonnement solaire

I-1-Introduction

Dans ce chapitre, on va décrire la position du soleil source de l'énergie solaire par rapport à la terre et les différents paramètres qui peuvent influencer sur l'énergie incidente sur terre comme le mouvement terre-soleil, le mouvement de la terre autour de l'axe des pôles, le mouvement apparent du soleil et la situation géographique du lieu et aussi les caractéristiques du capteur.

I-2-Les mouvements de la terre

Dans l'univers tout est en mouvement. On peut décomposer le mouvement de la terre en deux mouvements:

I-2-1-Mouvement de rotation

La terre tourne autour de l'axe des pôles (Pôle Nord, Pôle Sud) dans le sens trigonométrique. L'alternance des jours et des nuits est une manifestation immédiate de ce mouvement. On définit le jour solaire comme la durée moyenne entre deux passages consécutifs du soleil au méridien d'un lieu, ce jour est divisé en 24 intervalles égaux appelés heures. La rotation de la terre s'effectue avec une période de :

$$T_r = 23\text{h } 56\text{mn } 04\text{s} \approx 24\text{h.} \quad (1,1)$$

La vitesse linéaire de rotation à l'équateur est ;

$$V_r \approx 0,465\text{km/s,}$$

Elle est variable en fonction de latitude φ telle que :

$$V_r(\varphi) = V_r(\text{Cos}(\varphi)) \quad (1,2)$$

I-2-2-Mouvement de translation

La terre est en rotation sur elle-même puis elle tourne autour du soleil en une période $T_t = 365\text{jours } 5\text{h } 48\text{mn } 40\text{s} \approx 365,25\text{ jours}$. Elle décrit une orbite elliptique dont le soleil occupe l'un des foyers. Cette orbite est située dans un plan appelé plan de l'écliptique où le soleil est presque au centre. Elle est légèrement aplatie, elle correspond à un cercle de rayon moyen de 150 millions de Kilomètres. La terre tourne autour du soleil avec une vitesse moyenne $V_t \approx 29,77\text{km/s}$ [vitesse maximale

en hiver 30,27 Km/s et minimale en été 29,77 Km/s]. Ce mouvement s'effectue dans le sens trigonométrique direct et provoque le cycle des saisons [3].

Le plan équatorial, perpendiculaire à l'axe des pôles et passant par le centre de la terre, fait avec le plan de l'écliptique un angle constant appelé obliquité et noté δ_0 qui est égal à $23^{\circ}45'$ [4].

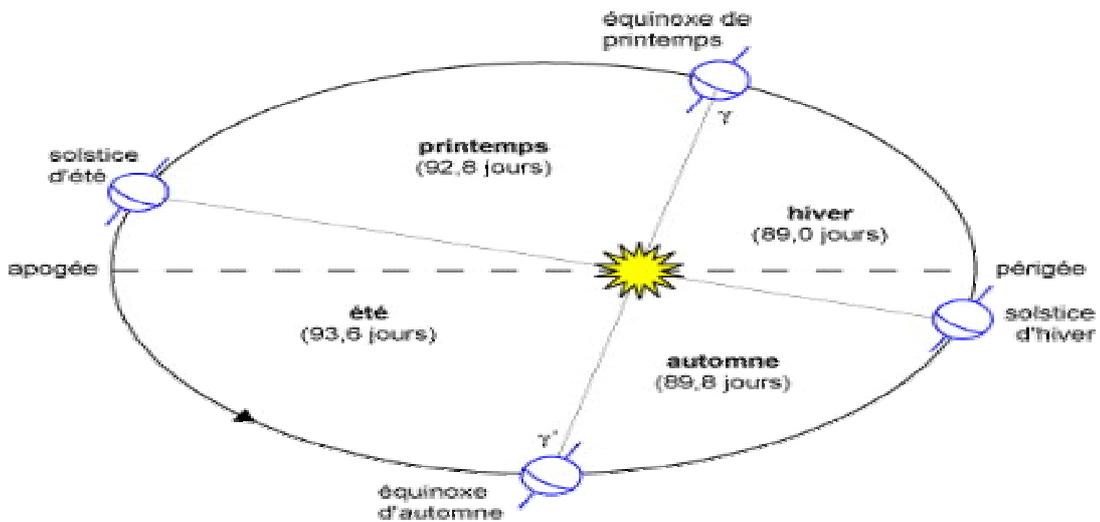


Figure (I-1): Les mouvements de la terre [5].

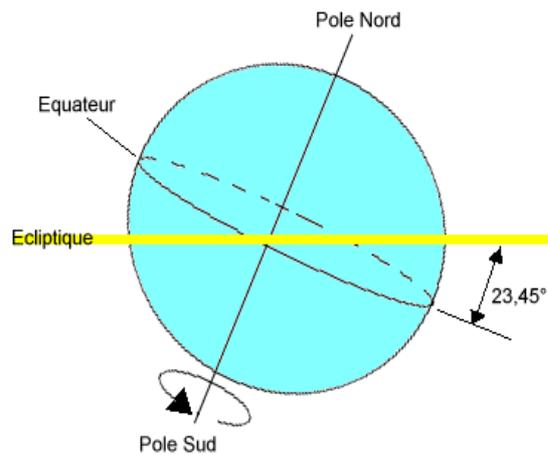


Figure (I-2) : Angle d'inclinaison de l'axe de la terre [5].

I-3-Distance Terre-Soleil

La variation de la distance terre-soleil en fonction de la date est donnée par la formule suivante [3]:

$$d(N) = 1 - 0.017 \cos [(360/365) \cdot (N-2)] \quad (1,4)$$

Avec:

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

Année civile : N = (1 , 365) jours

Année bissextile : N = (1 , 366) jours

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

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

Avec :

$$1\text{UA} = 149\,597\,890 \pm 500\text{km} \approx 150 \text{ million km}$$

$$= 500 \text{ secondes lumière}$$

$$= 8.3 \text{ mn-lumière}$$

La variation de la distance terre-soleil est illustrée par la figure (I-3).

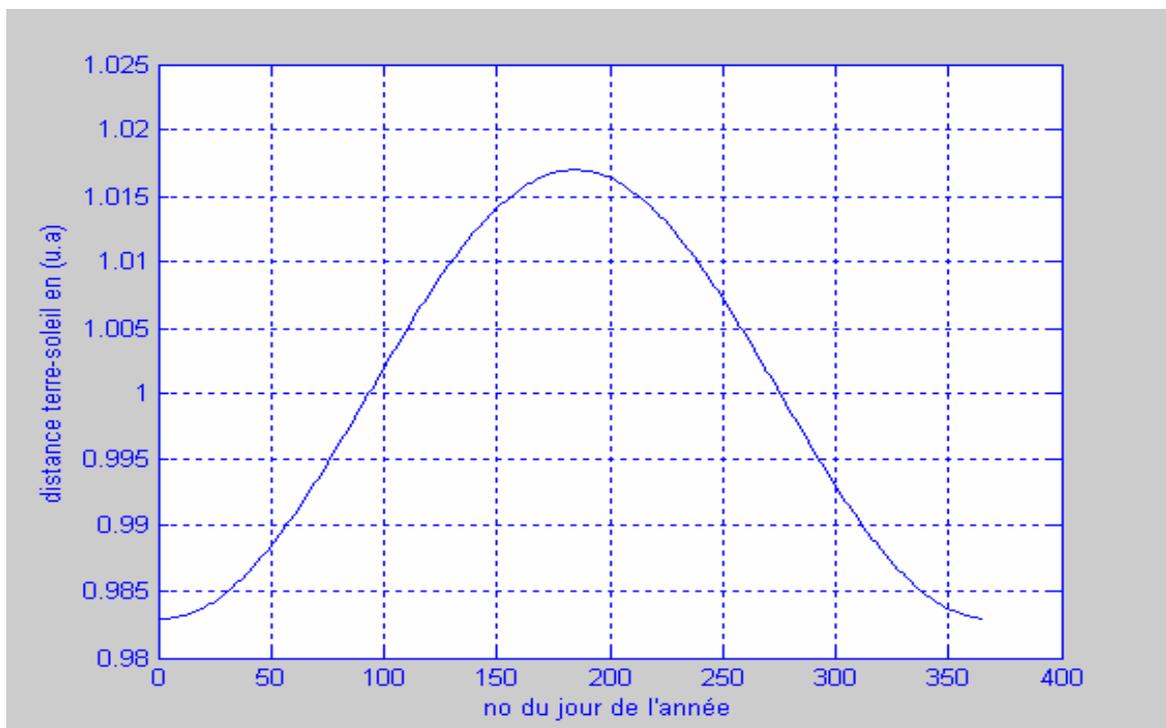


Figure (I-3) : Variation de la distance terre –soleil en fonction du nombre du jour de l'année

I-4- Correction de la distance terre-soleil c(N)

Le rayonnement émis par le soleil est isotrope et de puissance constante. La puissance reçue en dehors de l'atmosphère sur un plan de surface unité perpendiculaire aux rayons solaires est inversement proportionnelle au carré de la distance au soleil [3].

On a :

$$\frac{I}{I_0} = \frac{1}{d^2}$$

Avec:

I_0 : est la constante solaire, c'est la puissance reçue dans les conditions décrites ci-dessus à une distance de 1UA du soleil.

I : est la puissance reçue à la distance d quelconque exprimée en UA.

Par définition la correction de distance est : $c = \frac{I}{I_0}$

On en déduit l'expression $C(N)$:

$$C(N) = 1 + 0.034 \cos [(360/365).(N-2)] \quad (1,5)$$

La variation de la correction de distance au cours de l'année est représentée par la figure (I-4).

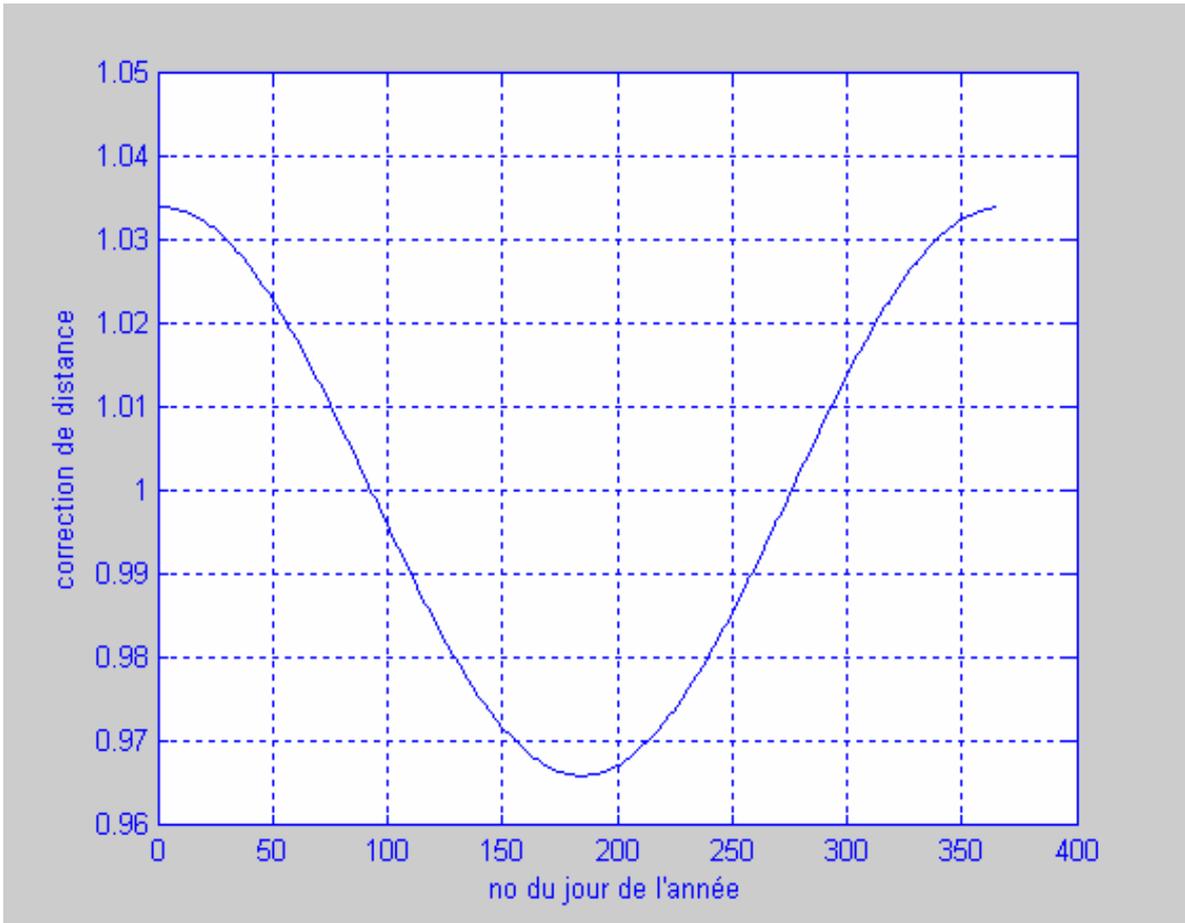


Figure (I-4) : Variation de la correction de distance durant l'année.

I-5-Repérage d'un site à la surface terrestre

Les coordonnées géométriques utilisées pour déterminer la localisation d'un point sur la surface terrestre sont :

La latitude et la longitude, qui sont calculées en angle et qui s'expriment en degrés, minutes et secondes d'angle.

- **La latitude φ** : donne la localisation d'un point par rapport à l'équateur, elle varie de 0° à l'équateur à 90° N (ou S) aux pôles. Elle représente la distance angulaire du site S par rapport au plan de l'équateur.

Φ varie de -90° à $+90^\circ$

tel que :

$$\left\{ \begin{array}{ll} \varphi > 0 & \text{Vers le Nord} \\ \varphi < 0 & \text{Vers le Sud} \end{array} \right.$$

- **La longitude ψ** : permet de localiser un point à l'Est ou à l'Ouest d'une ligne Nord- Sud de référence appelée le méridien Greenwich.

ψ varie de -180° à $+180^\circ$

tel que :

$$\left\{ \begin{array}{l} \psi > 0 \text{ à l'est du méridien de Greenwich} \\ \psi < 0 \text{ à l'ouest du méridien de Greenwich.} \end{array} \right.$$

Coordonnées géographiques:

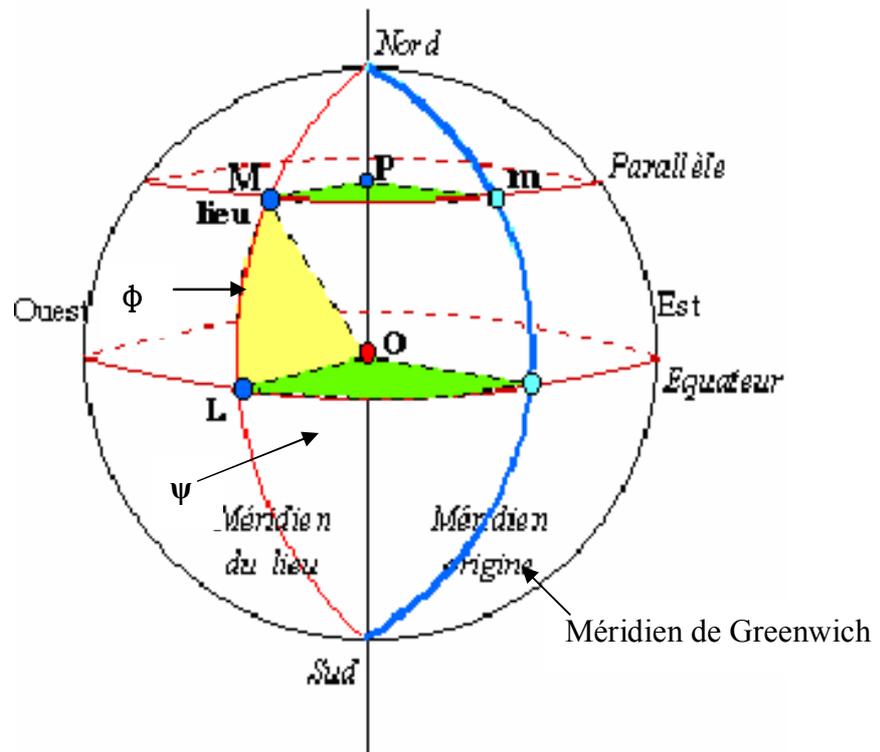


Figure (I-5) : Repérage d'un site sur la surface terrestre [3].

I-6-Détermination de la direction du soleil

Pour un lieu donné on repère la direction du soleil de deux manières :

- par rapport au plan horizontal du lieu désigné par les coordonnées horizontales liées à un point donné de la [Terre](#) .
- par rapport au plan équatorial de la terre désigné par les coordonnées équatoriales .

I-6-1-Coordonnées horizontales

a - L'azimut du soleil (a):

C'est l'angle que fait sur le plan horizontal la projection de la direction du soleil avec la direction du sud. Cet angle (α) est noté avec les mêmes conventions que l'azimut du plan α [6].

b- La hauteur du soleil (h)

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

$$\sin(h) = \cos(\delta) \cdot \cos(\varphi) \cdot \cos(H) + \sin(\varphi) \cdot \sin(\delta) \quad (1,6)$$

Varie entre 90 et -90

- Zénith : $h = +90$

- Nadir : $h = -90$

$h > 0$ correspond au jour

$h < 0$ correspond à la nuit

$h = 0$ correspond au lever et au coucher du soleil

Dans la figure (I-6) on représente les coordonnées horizontales:

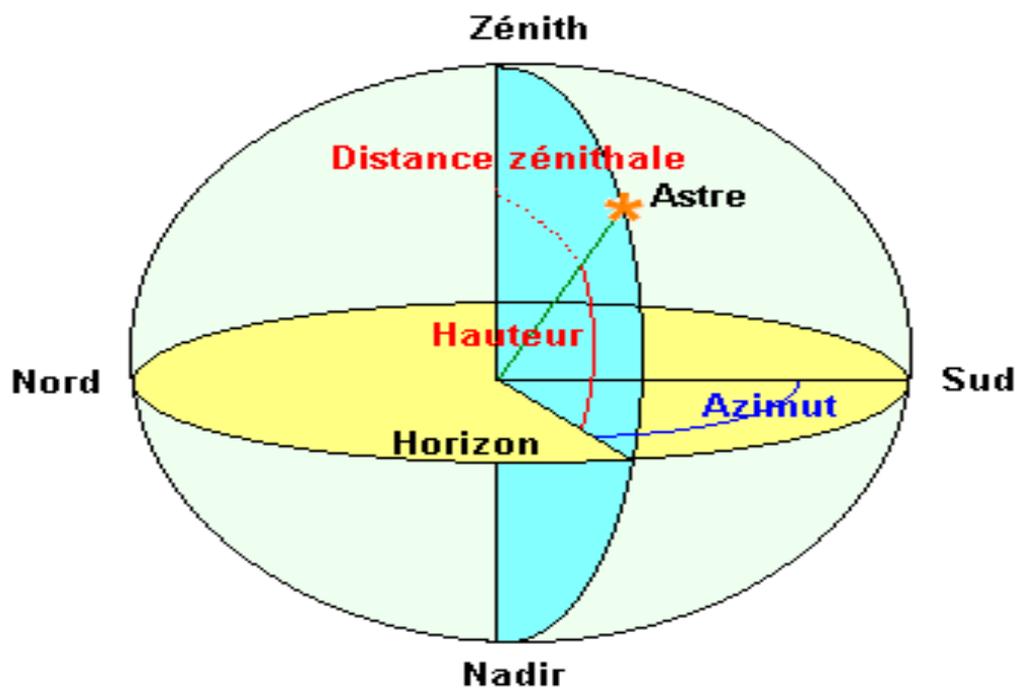


Figure (I-6) : Coordonnées horizontales [4].

I-6-2-Coordonnées équatoriales

a- L'angle horaire (H)

C'est l'angle que font sur le plan équatorial les projections de la direction du soleil et de la direction du sud pour le lieu considéré figure (I-7). Il rend compte de la rotation quotidienne de la terre autour de l'axe des pôles et on a la relation:

1 heure de temps = 15° d'angle horaire [7].

H < 0 le matin

H > 0 après midi

H = 0 à midi

b- La déclinaison du soleil δ

C'est l'angle de la direction du soleil avec le plan équatorial figure (I-7). δ varie entre deux valeurs extrêmes :

$$-\delta_0 \leq \delta \leq \delta_0$$

Avec $\delta_0 = 23^\circ 27'$

La déclinaison δ (N), en fonction du jour de l'année, est représentée par la formule approchée suivante [7]:

$$\sin(\delta) = 23.45 \cdot \sin((2 \cdot \pi / 365) \cdot (284 + N)) \quad (1,7)$$

La déclinaison varie sinusoïdalement au cours de l'année. Elle est maximum ($23.27'$) le 22 juin, au solstice d'été; minimum ($-23.27'$), le 21 décembre, au solstice d'hiver. Aux périodes de solstice, les variations de la déclinaison sont

La déclinaison est nulle le 21 mars et le 23 septembre, aux équinoxes de printemps et d'automne, périodes de variation rapide de la déclinaison faibles d'un jour à l'autre.

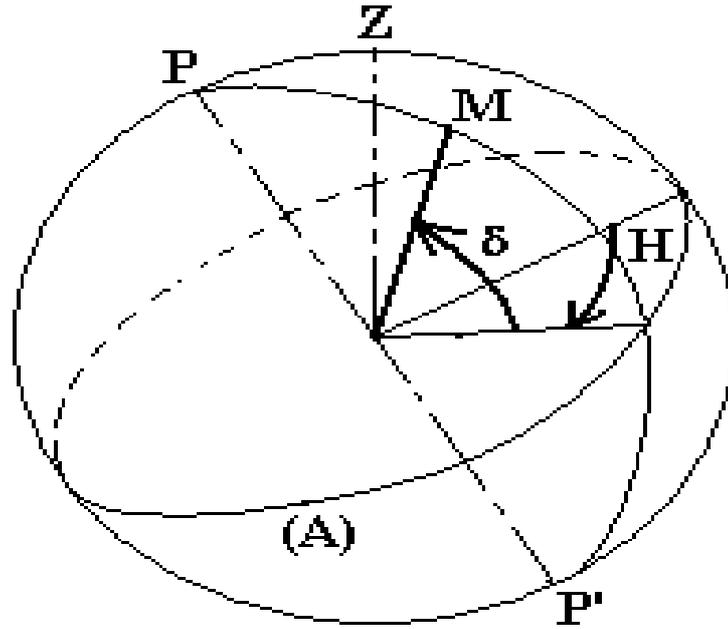


Figure (I-7) : Coordonnées équatoriales [7]

La variation de la déclinaison du soleil au cours de l'année est représentée par la figure (I-8).

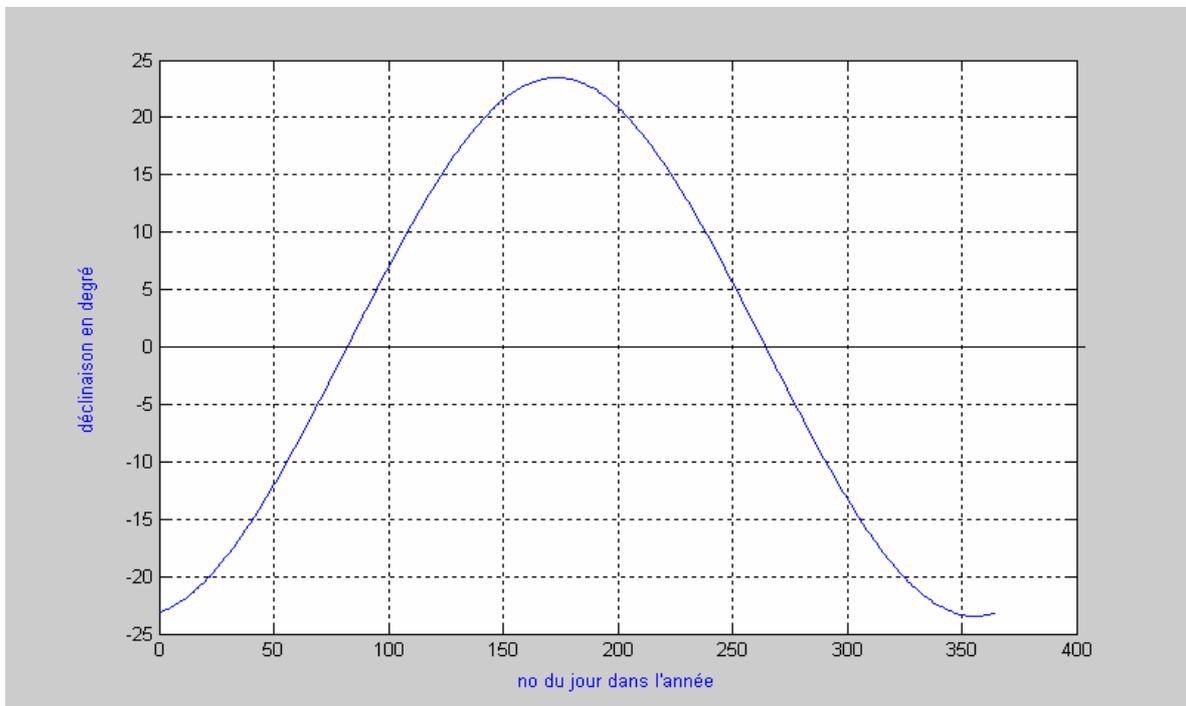


Figure (I-8) : Variation de la déclinaison en fonction du jour de l'année

I-7- Cercles remarquables de la terre

I-7-1- Zone arctique (ou zone polaire nord) $90^\circ \geq \phi \geq 66^\circ 33'$

Le soleil à midi est au Sud, avec lever et coucher quotidiennement pendant les jours normaux c'est à dire en dehors du jour et de la nuit polaire tant que $\delta < 90^\circ - \phi$.

Pendant la nuit polaire, le soleil , à midi est sous l'horizon. Pendant le jour polaire , le soleil est , à minuit, est en dessus de l'horizon. (nuit polaire en hivers et jour polaire en été)

I-7-2- Zone moyenne Nord $66^\circ 33' \geq \phi \geq 23^\circ 27'$

Le soleil à midi est au Sud, avec lever et coucher quotidiens. Les jours d'été et les nuits d'hivers sont d'autant plus longs qu'on se rapproche du cercle polaire arctique.

I-7-3- Zone intertropicale ou zone équatoriale $+ 23^\circ 27' \geq \phi \geq - 23^\circ 27'$

Le soleil à midi est au sud, pendant une partie de l'année tant que $\delta < \phi$ d'autant plus longue qu'on se rapproche du tropique du cancer, et au nord pendant l'autre partie.

Le passage du soleil au zénith a lieu deux fois par an , à des dates telle que $\delta = \phi$ symétriques par rapport aux solstices . la durée du jour et de la nuit est à peu près voisine de 12 heures et constante .A l'équateur , la différence jour-nuit à une date donnée est nulle ; elle est maximale aux tropique , aux solstices égale à 2h 57mn

I-7-4-Zone moyenne sud $- 23^\circ 27' \geq \phi \geq - 66^\circ 33'$

Le soleil à midi est au Nord avec lever et coucher quotidiens. Les jours d'hiver et les nuits d'été sont d'autant plus longs qu'on se rapproche du cercle antarctique.

I-7-5- Zone antarctique ou zone polaire sud

Le soleil à minuit est au nord avec lever et coucher quotidiens pendant les jours normaux tant que $|\delta| < 90^\circ - |\phi|$.

Pendant la nuit polaire en été, le soleil à midi est sous l'horizon. Pendant le jour polaire en hiver, le soleil à minuit est au dessus de l'horizon, au sud. Le jour et la nuit polaire durent d'autant plus qu'on se rapproche du Pole sud .

I -8-Mouvement apparent du soleil

Pour étudier le mouvement du soleil, nous examinerons le mouvement apparent du soleil pour un observateur sur terre.

En un point de latitude φ au Nord de l'équateur, le soleil décrit un arc de cercle variable chaque jour a raison de 15^0 par heure.

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

$$\varphi - 23^027' \leq Z \leq \varphi + 23^027'$$

- Aux équinoxes automne et printemps (EA et EP) $\rightarrow Z = \varphi$

Les journées ont une durée de 12h.

- Au solstice hiver (SH) $\rightarrow Z = \varphi + 23^027'$

Les journées ont une durée inférieure à 12h.

- Au solstice été (SE) $\rightarrow Z = \varphi - 23^027'$

Les journées ont une durée supérieure à 12h.

- En un point de l'équateur ($\varphi = 0$) $- 23^027' \leq Z \leq 23^027'$

La durée des jours est de 12h = constante.

En un point de l'attitude φ au sud de l'équateur, le mouvement du soleil sera identique si on inverse les positions du sud et du nord.

Dans la pratique, la course exacte du Soleil dans le ciel varie tout au long de l'année figure (I-5).

- En hiver, le Soleil ne se lève pas exactement à l'Est mais légèrement décalé vers le Sud; le Soleil s'élève peu dans le ciel et ne se couche pas tout à fait à l'Ouest. Le Soleil est moins longtemps au dessus de l'horizon: Les Jours sont plus courts.

Le jour de l'année où le Soleil descend le plus bas (le plus au Sud) est le jour du solstice d'hiver (21 décembre).

- En Eté, le Soleil se lève non pas à l'Est mais légèrement décalé vers le Nord, il s'élève très haut dans le ciel et ne se couche pas tout à fait à l'Ouest. Le Soleil est plus longtemps au dessus de l'horizon: Les jours sont plus longs. Le jour de l'année où le Soleil monte le plus haut est le jour du solstice d'été (21 juin).

- Au Printemps et en Automne, le Soleil suit une course intermédiaire. Deux jours par an, le Soleil se lève exactement à l'Est et se couche exactement à l'Ouest lors de l'équinoxe de printemps et de l'équinoxe d'automne. Durant ces 2 jours, la durée du jour est identique à la durée de la nuit.

La course du soleil dans le ciel est illustrée par la figure (1-5).

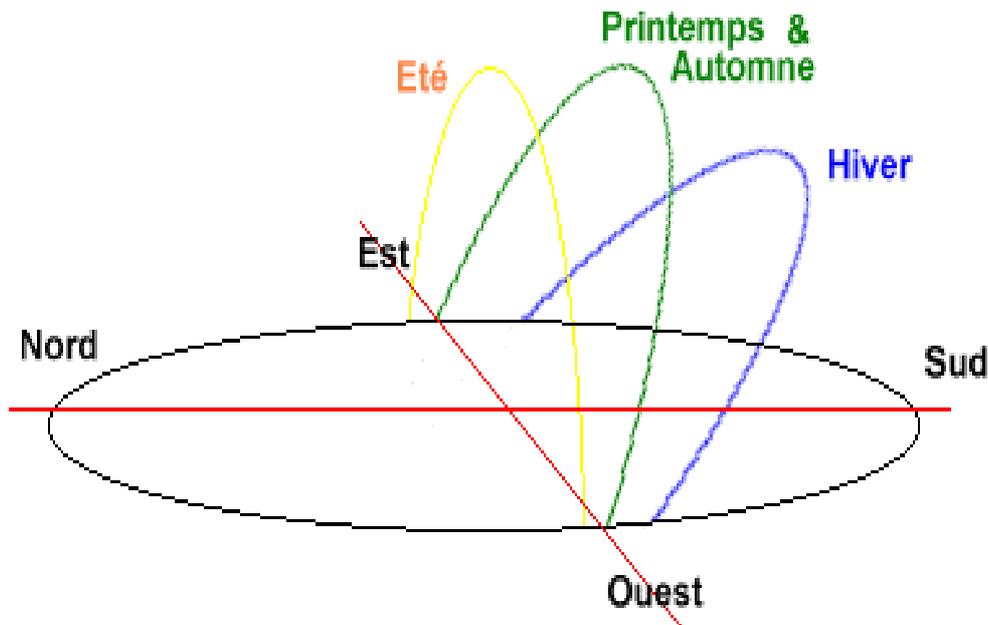


Figure (I-9) : La course du Soleil change avec la saison [4].

I-9-Temps solaires

I-9-1-Temps solaire moyen

La vitesse de la terre sur son orbite n'est pas constante au cours de l'année. Pour avoir un temps qui s'écoule à vitesse constante celui mesuré par les horloges, on définit donc un temps solaire moyen TSM. Le temps solaire moyen est basé sur un soleil moyen fictif qui se déplacerait à vitesse constante tout au long de l'année. C'est le temps qui sépare en moyenne deux passages successifs du soleil au méridien du lieu, la journée solaire moyenne a une durée de 1 jour = 24h 00m 00s.

La durée d'un jour solaire moyen est de 24 [heures](#) quel que soit le jour de l'année [3]

I-9-2- Temps solaire vrai

Le temps solaire vrai ou apparent noté TSV c'est le temps indiqué sur les cadrans solaires. Il est basé sur le jour solaire apparent, qui est la durée entre deux retours successifs du Soleil au méridien local. Cette durée varie tout au long de l'année pour deux raisons :

- L'inclinaison de l'axe de la Terre par rapport au plan de l'équinoxiale.
- L'excentricité de l'orbite de la Terre.

À cause de ces particularités, les jours solaires apparents sont plus courts en mars et septembre qu'en juin et décembre.

Par définition le temps solaire vrai TSV en un lieu c'est l'angle horaire en ce lieu et à cet instant est donné comme suit :

$$TSV = 12 + (H/15) \quad (1,8)$$

Avec :

TSV est en heures.

H est en degrés.

TSV = 12h pour la valeur nulle de l'angle horaire (c'est-à-dire midi).

L'écart entre TSV et TSM varie selon la date, mais est nul en moyenne.

L'expression de cet écart porte le nom de " Equation du temps " [3].

I-9-3- Équation du temps

La différence entre le temps solaire moyen et le temps solaire apparent est appelée l'équation du temps. Sur Terre, elle varie entre 17 minutes en moins et 14 minutes en plus: $ET = TSV - TSM$

L'équation du temps peut être approchée par la formule suivante [8]:

$$Et(N) = 9.87 \sin 2N' - 7.53 \cos N' - 1.5 \sin N' \quad (1,9)$$

Avec :

Et est exprimée en minutes

$N' = (360/365)(N - 81)$ exprimée en radians

N numéro du jour de l'année (N = 1 le premier janvier).

La variation de l'équation du temps au cours de l'année est représentée par la figure (1,10).

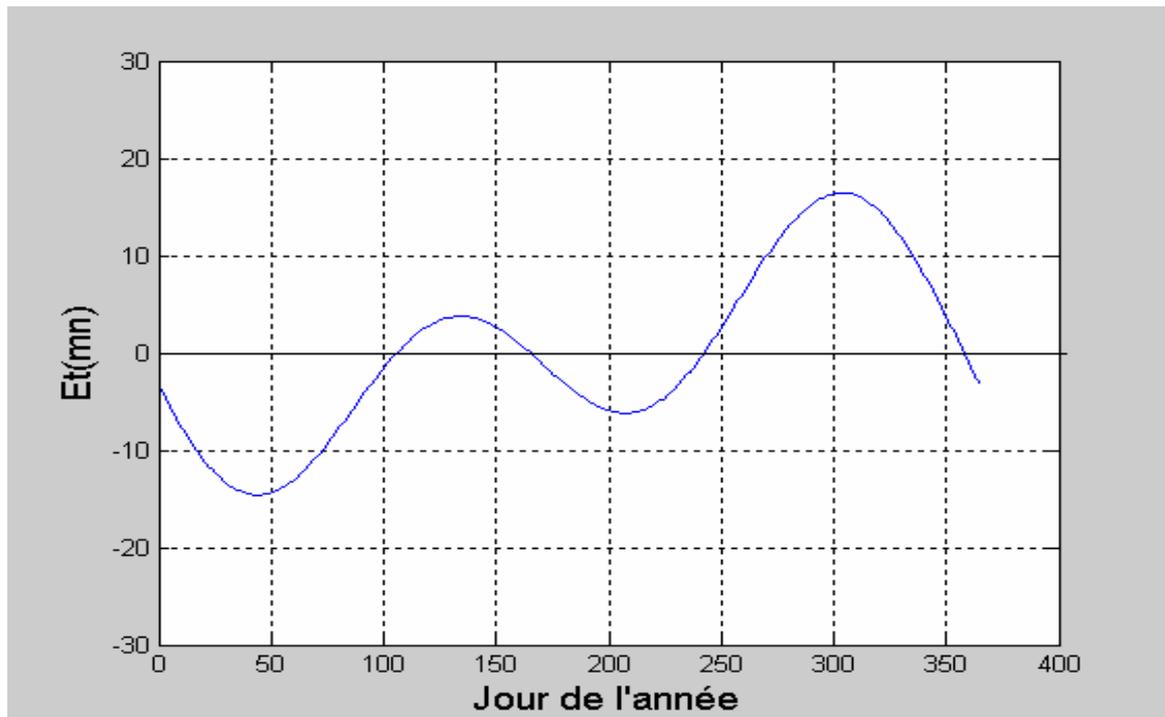


Figure (I-10) : Variation de l'équation de temps en fonction du jour de l'année

I-9-4- Temps universel TU

C'est le temps solaire moyen du méridien fondamental (méridien de Greenwich).

Pour un lieu de longitude ψ on a :

$$TSM = TU + \frac{\psi}{15} \quad (1,10)$$

Avec : ψ en degrés

I-9-5 Temps légal TL

C'est l'heure officiel d'un état; c'est l'heure du fuseau horaire. La terre est divisée en 24 fuseaux de 15^0 de large centré sur les méridiens dont la longitude est multiple de 15:

$$TL = TU + DE \quad (1,11)$$

Avec : DE décalage horaire par rapport au méridien de Greenwich

$$DE = TL \text{ (pour midi TU)} - 12 \quad (1,12)$$

Exemple :

En Algérie il est 13h à midi TU (12) alors :

$$DE = 13 - 12 = 1 \text{ h}$$

Donc on voit la relation entre l'heure lue sur la montre et la position du soleil (TSV ou angle horaire H).

En récapitulant toutes les relations précédentes on aura :

$$\left\{ \begin{array}{l} TSV = 12 + (H/15) \\ TSM = TSV - (Et/60) \\ TU = TSM - (\psi /15) \\ TL = TU + DE \end{array} \right.$$

D'où :

$$\left\{ \begin{array}{l} TL = 12 + (H/15) - (Et/60) - (\psi /15) + DE \\ H = + (Et/4) + 15 \cdot (TL - 12 - DE) \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} TL = TSV - (Et + 4\psi) / 60 + DE \\ TSV = TL - DE + (Et + 4\psi) / 60 \end{array} \right.$$

I-10-Durée du jour

I-10-1-Lever et coucher du soleil

Pour un jour donné l'azimut (α) et la hauteur (h) du soleil sont parfaitement déterminés par l'angle horaire H . La hauteur (h) est nulle pour deux instants ; le "lever" et le "coucher" du soleil. Il s'agit de la hauteur du centre du disque solaire.

La hauteur du soleil est donnée par l'équation (1,6) :

$$\sin h = \sin \delta \cdot \sin \varphi + \cos \delta \cdot \cos \varphi \cdot \cos H$$

On l'écrit sous la forme

$$\sin h = \cos \delta \cdot \cos \varphi (\operatorname{tg} \delta \cdot \operatorname{tg} \varphi + \cos H)$$

On pose :

$$T = - \operatorname{tg} \delta \cdot \operatorname{tg} \varphi$$

D'où on aura :

$$\sin h = \cos \delta \cdot \cos \varphi (\cos H - T)$$

En écartant le cas des deux pôles m la résolution de l'équation :

$$\sin h = 0$$

est équivalente à:

$$\cos H = T$$

• **1^{er} cas :**

$$[T] > 1 \longrightarrow [\varphi] + [\delta] > 90$$

Sin h ne peut pas être nul , quel que soit H . On ne peut pas parler de lever ou coucher du soleil dans ce cas .

- **cas T négatif**

$$T < -1 \longrightarrow [\varphi + \delta] > 90$$

$$\longrightarrow \sin h > 0 \longrightarrow h > 0$$

Le soleil est toute la journée au-dessus de l'horizon : " jour polaire"

- **cas T positif**

$$T > 0 \longrightarrow [\varphi - \delta] < 90$$

$$\longrightarrow \sin h < 0 \longrightarrow h < 0$$

Le soleil est toute la journée au-dessus de l'horizon : " nuit polaire"

• **2^{eme} cas**

$$[T] \leq 1 \longrightarrow [\varphi] + [\delta] \leq 90$$

L'équation : $\sin h = 0$

a deux racines pour des valeurs de H telles que :

$$\cos H = T$$

Ce qui donne 2 valeurs de H ; le coucher du soleil correspond à la valeur positive Hc , et le lever à la valeur négative Hl.

$$\begin{cases} H_c = \arccos (-\operatorname{tg} \delta \cdot \operatorname{tg} \varphi) \\ H_l = -H_c \end{cases} \quad (1,13)$$

On obtient immédiatement les valeurs de l'azimut correspondantes :

$$\begin{cases} a_c = \arccos (-\sin \delta / \cos \varphi) \end{cases}$$

$$a_l = - a_c \quad (1,14)$$

I-10-2-Durée du jour

La durée du jour d en heures est par définition :

$$d = (H_c - H_l) / 15 = 2 H_c / 15$$

d'où :

$$d = (2/15) \text{ arc cos } (- \text{tg } \delta \cdot \text{tg } \varphi) \quad (1,15)$$

On retrouve donc :

- si $T = -1$ $H_c = 180^\circ$ $d = 24$ heures jour polaire
- si $T = 1$ $H_c = 0^\circ$ $d = 0$ heures nuit polaire

Pour un lieu donné, la durée maximale et la durée minimale du jour se produisent aux solstices :

- Maximum $d_M = (2/15) \text{ arcos } (-0.434 \text{ tg } [\varphi])$
- Minimum $d_m = (2/15) \text{ arcos } (+ 0.434 \text{ tg } [\varphi])$

I-11-Détermination de la position d'un plan quelconque

Un capteur quelconque est défini par deux angles (γ, α) :

a- La hauteur du capteur γ :

C'est l'angle que fait la normale du capteur et sa projection sur le plan horizontal.

- $\gamma > 0$ plan tourné vers le haut
- $\gamma < 0$ plan tourné vers le bas

γ varie entre -90° et $+90^\circ$:

- $\gamma = -90^\circ$ plan horizontal tourné vers le haut
- $\gamma = -90^\circ$ plan horizontal tourné vers le bas
- $\gamma = 0$ plan vertical

b- Azimut du capteur α :

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

$\alpha > 0$ vers l'ouest

$\alpha < 0$ vers l'est

$\alpha = 0$ plan Sud

α varie entre -90° et $+90^\circ$:

$\alpha = -90^\circ$ plan Est orienté vers le nord

$\alpha = 180^\circ$ plan Nord orienté vers le nord

$\alpha = +90^\circ$ plan Ouest orienté vers l'ouest

c- L'inclinaison β

L'inclinaison β du capteur par rapport au plan horizontal est donnée par :

$$\beta = 90 - \gamma \quad (1,16)$$

Dans la figure (I-11) présente les paramètres du capteur.

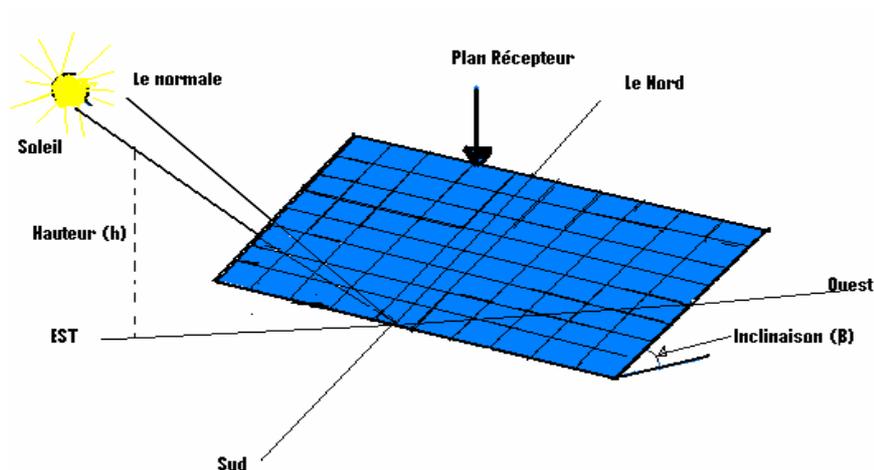


Figure (I-11): Paramètres du capteur

I-12- L'angle d'incidence sur un plan quelconque

L'angle d'incidence i , c'est l'angle entre la direction du soleil et la normale au plan. Cet angle détermine l'importance du rayonnement direct intercepté par la paroi, il peut être déterminé dans les coordonnées horizontales ou dans les coordonnées verticales [3].

- **En coordonnées horizontales** : l'angle d'incidence est donné par :

$$\cos i = \cos (\alpha - a) \cos \gamma \cos h + \sin \gamma \sin h \quad (1,17)$$

- **En coordonnées horaires** : l'angle d'incidence est donné par

$$\begin{aligned} \cos i = & \sin \alpha \cos \gamma \sin H \cos \delta \\ & + \cos \alpha \cos \gamma [\cos H \cos \delta \sin \varphi - \sin \delta \cos \varphi] \\ & + \sin \gamma [\cos H \cos \delta \cos \varphi + \sin \delta \sin \varphi] \end{aligned} \quad (1,18)$$

Bien que cette formule soit plus lourde elle est généralement plus pratique à utiliser . En effet :

- avec les coordonnées horizontales $i = i(\alpha, \gamma, a, h)$: deux valeurs a et h sont à déterminer pour connaître l'angle d'incidence sur un plan donné.
- Avec les coordonnées horaires , $i = i(\alpha, \gamma, H, \delta, \varphi)$: pour un plan (α, γ) , un lieu (φ) et un jour (δ) donnés , i est fonction de l'angle horaire , H , variable particulièrement pratique puisque il s'agit du temps.

On exprimera donc $\cos(i)$ en faisant apparaître la variable H .

$$\cos(i) = A \sin(H) + B \cos(H) + C \quad (1,19)$$

Avec :

$$\left\{ \begin{array}{ll} A = A' \cos(\delta) & A' = \sin(\alpha) \cos(\gamma) \\ B = B' \cos(\delta) & B' = \cos(\alpha) \cos(\gamma) \sin(\varphi) + \sin(\gamma) \cos(\varphi) \\ C = C' \sin(\delta) & C' = -\cos(\alpha) \cos(\gamma) \cos(\varphi) + \sin(\gamma) \sin(\varphi) \end{array} \right. \quad (1,20)$$

I-12-Plans particuliers importants

I-12-1 Plan horizontal

Pour le plan horizontal on a $\gamma = 90$:

D'où :

$$\begin{aligned} A' &= 0 \\ B' &= \cos(\varphi) \\ C' &= \sin(\varphi) \end{aligned}$$

D'où :

$$\cos(i) = \cos(\varphi) \cos(\delta) \cos(H) + \sin(\varphi) \sin(\delta) \quad (1,21)$$

I-12-2-Plan vertical

Pour le plan vertical on a $\gamma = 0$

D'où :

$$A' = \sin(\alpha)$$

$$B' = \cos(\alpha) \sin(\varphi)$$

$$C' = -\cos(\alpha) \cos(\varphi)$$

D'où :

$$\begin{aligned} \cos(i) &= \sin(\alpha) \cos(\varphi) \sin(H) \\ &+ \cos(\alpha) \sin(\varphi) \cos(\delta) \cos(H) \\ &- \cos(\alpha) \cos(\varphi) \sin(\delta) \end{aligned} \quad (1,22)$$

I-12-3- Plan Sud

Pour le plan sud on a $\alpha = 0$:

$$A' = 0$$

$$B' = \sin(\gamma + \varphi)$$

$$C' = -\cos(\gamma + \varphi)$$

D'où :

$$\cos(i) = \sin(\gamma + \varphi) \cos(\delta) \cos(H) - \cos(\gamma + \varphi) \sin(\delta) \quad (1,23)$$

I-12-4- Plan TLE

C'est un plan sud d'inclinaison égale à la latitude on a $\alpha = 0$ et $\gamma = 90 - \varphi$

$$A' = 0$$

$$B' = 1$$

$$C' = 0$$

D'où :

$$\cos(i) = \cos(\delta) \cos(H) \quad (1,24)$$

I-14- Conclusion

Pour l'estimation du rayonnement solaire il est nécessaire de bien préciser les paramètres géométriques du lieu qui sont la latitude, la longitude et l'altitude et aussi des paramètres du capteur qui sont l'inclinaison et l'orientation. Le rayonnement dépend aussi des mouvements de la terre qui sont la rotation et la translation et le mouvement apparent du soleil dans le ciel qui est caractérisé par sa hauteur et sa déclinaison. La variation de ces paramètres influent sur le rayonnement incident sur terre.

Chapitre –II- Rayonnement solaire hors atmosphère

II-1- Introduction

Dans ce chapitre on va présenter le rayonnement solaire hors atmosphère, son intensité avant d'entrer dans l'atmosphère et les différents constituants de celle-ci.

On présente aussi les différents changements que subit ce rayonnement en traversant cette atmosphère.

II-2- Aspect géométrique du rayonnement hors atmosphère

II-2-1- définition

Le rayonnement hors atmosphère ou rayonnement extra- terrestre, reçu sur un plan donné (α, γ) en un point M de la terre est :

- le rayonnement qui serait reçu sur (α, γ) en M s'il n'y avait pas d'atmosphère ou bien :
- le rayonnement reçu sur (α, γ) en M' situé à la limite de l'atmosphère à la verticale de M

L'intensité de ce rayonnement vaut: $I_0 = 1367 \text{ W/m}^2$.

Cette quantité c'est la constante solaire, c'est la puissance incidente hors-atmosphère sur une surface de 1m^2 perpendiculaire au rayon du soleil à la distance $d = 1\text{UAdu soleil}$ [5] .

Cependant l'intensité de l'éclairement reçu par terre varie autour de cette valeur au cours de l'année puisque la distance terre-soleil change. La constante solaire sera affectée d'un facteur de correction C (N) défini auparavant comme la correction de la distance terre-soleil. La puissance de ce rayonnement par unité de surface est notée par g^e .

Si le plan est normal aux rayons ($i = 0$) on note : g_n^e

$$g_n^e = C(N) \cdot I_0 \quad (2,2)$$

$$g_n^e = I_0 [1 + 0.034 \cos (2\pi (N - 2) / 365)] \quad (2,3)$$

II-2-2- Expression de la puissance et de l'énergie du rayonnement hors atmosphère

La puissance du rayonnement hors atmosphère sur un plan quelconque est :

$$g^e = g_n^e \cdot \cos(i) \quad (2,4)$$

L'énergie du rayonnement hors atmosphère sur un plan quelconque est :

$$G^e = \int_{H_1}^{H_2} g^e dH = g_n^e \int_{H_1}^{H_2} \cos(i) dH \quad (2,5)$$

H_1 et H_2 sont le lever et le coucher du soleil.

On pose : $J = \int_{H_1}^{H_2} \cos(i) dH$

$$J = [-A(\cos(H_2) - \cos(H_1)) + B(\sin(H_2) - \sin(H_1)) + C(H_2 - H_1)] \quad (2,6)$$

D'où : $G^e = g_n^e \cdot J \quad (2,7)$

On note que :

G^e est exprimé en Wh/m²

g_n^e est exprimé en W/m²

J est exprimé en radian

On a : 1 jour : 24 h \rightarrow 2π

$$\frac{G^e / g_n^e}{24} = \frac{J}{2\pi}$$

$$\frac{G^e}{g_n^e} = \frac{12}{\pi} J$$

d'où la valeur de l'énergie hors atmosphère sur un plan quelconque est ::

$$G^e = \frac{12}{\pi} \cdot g_n^e \cdot [-A(\cos(H_2) - \cos(H_1)) + B(\sin(H_2) - \sin(H_1)) + C(H_2 - H_1)] \quad (2,8)$$

avec :

A, B, C définis dans le chapitre (I) l'équation (1,20).

Donc G^e est une fonction de 4 variables :

$$G^e = G^e (\alpha, \gamma, \delta, \varphi)$$

II-2-3-Expression de l'énergie G^e pour le plan horizontal

On rappelle que l'angle d'incidence pour le plan horizontal est :

$$\cos(i) = \cos(\varphi) \cos(\delta) \cos(H) + \sin(\varphi) \sin(\delta)$$

d'où :

$$G_{horz}^e = \frac{24}{\pi} g_n^e [\cos(\varphi) \cdot \cos(\delta) \cdot \sin(H_c) + \sin(\varphi) \cdot \sin(\delta) \cdot H_c] \quad (2,9)$$

Avec:

Hc désigne le coucher du soleil défini au chapitre (I)

$$Hc = \arcsin (-\sin(\delta) \cdot \sin(\varphi))$$

II-3-Jour type du mois pour le rayonnement hors atmosphère

Le jour type du mois pour une grandeur donnée c'est le jour du mois se rapprochant le plus de la moyenne mensuelle de cette grandeur.

Il peut être calculé pour plusieurs grandeurs :

- pour le global hors atmosphère sur le plan horizontal
- pour la déclinaison
- pour la durée du jour

En confrontant les valeurs du jour type du mois pour ces grandeurs on définit le jour type du mois standard. Il est donné par le tableau suivant [5]:

Mois	Jour type du mois				Jour type
Janvier	17	18	17	17	17
Février	15	15	15	15	15
Mars	16	16	16	16	16
Avril	15	15	15	15	15
Mai	15	15	15	15	15
Juin	28	11	11	11	11
Juillet	17	17	17	17	17
Août	17	16	16	16	16
Septembre	16	15	16	16	16
Octobre	16	16	16	16	16
Novembre	15	14	15	15	15
décembre	11	11	11	11	11

Tableau (II-1) : Jour type du mois standard [5].

II-5-Aspect énergétique du rayonnement hors atmosphère

II-5-1- Le soleil

Le soleil est une étoile constituée de gaz ; 75 % d'hydrogène 23% d'hélium et 2% d'autres constituants de l'univers. Sa masse est de $1.99 \cdot 10^{30}$ kg et son rayon est de 696000 km .L'intérieur du soleil est le siège de réactions thermonucléaires ; les atomes d'hydrogènes fusionnent pour former l'hélium en libérant une énergie qui est délivré sous forme de radiations dans l'espace. La surface extérieure du soleil nommée photosphère a une température équivalente à 5800 °k. Dans cette couche la matière absorbe le rayonnement en provenance des couches intérieures et le réemet vers l'extérieur. Elle joue le rôle d'un corps noir.

Le corps noir est une entité théorique maintenue à une température constante qui absorbe la totalité du rayonnement qu'elle reçoit, c'est un absorbeur de radiations électromagnétiques à 100% sur toutes les longueurs d'ondes L'intensité de la radiation d'un corps noir est calculée par la loi de Stefan-Bolzman [6] :

$$G = \sigma * T^4 \quad (2,10)$$

Avec : G intensité de la radiation [w/m^2]

σ constante de Stefan-Bolzman [$5.67 \cdot 10^{-8} w/m^2/k^4$]

T température absolue du corps [k].

Un corps rayonne d'autant plus qu'il est plus chaud.

II-5-2- Spectre du rayonnement solaire

Le rayonnement solaire est la lumière qui provient du soleil sous forme d'onde électromagnétique dont 98% d'énergie est comprise entre $\lambda = 0,25\mu m$ et $\lambda = 4\mu m$, le reste représente 1% au-dessus et 1% au-dessous de cet intervalle (Fig. II-6).

La répartition d'énergie en fonction de la longueur d'onde est :

- Pour $0,25 \mu m < \lambda < 0,4\mu m$: c'est le domaine de l'ultraviolet (invisible), il représente 7 % de l'énergie totale émise par le soleil.
- Pour $0,4 \mu m < \lambda < 0,8\mu m$:c'est le domaine du visible, il représente 47,5 % de l'énergie totale émise par le soleil.

- Pour $0,8 \mu\text{m} < \lambda < 4 \mu\text{m}$: c'est le domaine de l'infrarouge (invisible), il représente 45,5 % de l'énergie totale émise par le soleil.

Le rayonnement solaire est assimilable à celui d'un corps noir à la température $T = 5800\text{K}$ dans l'intervalle du spectre $[0,25 \mu\text{m} \rightarrow 4\mu\text{m}]$ [4].

L'énergie rayonnée par le soleil n'est pas uniformément répartie pour toutes les longueurs d'onde, elle passe par un maximum pour une longueur d'onde donnée par la loi de WIEN :

$$\lambda_m.T = 2898 \mu\text{m.K}$$

Pour : $T = 5800 \text{ K}$ $\lambda_m \approx 0,5\mu\text{m}$.

Le tableau (II-1) représente la répartition spectrale de l'atmosphère:

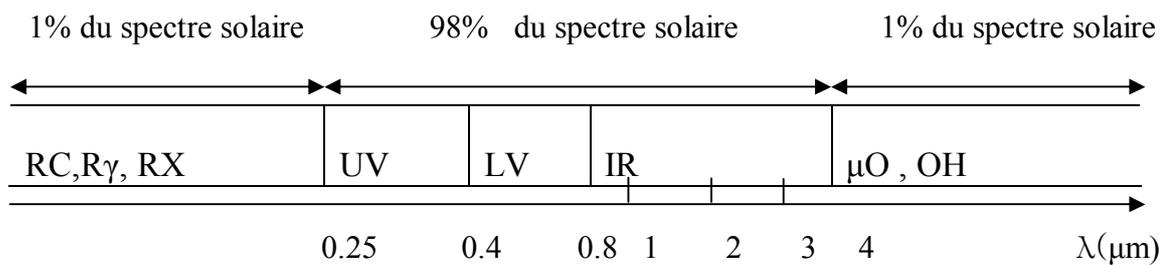
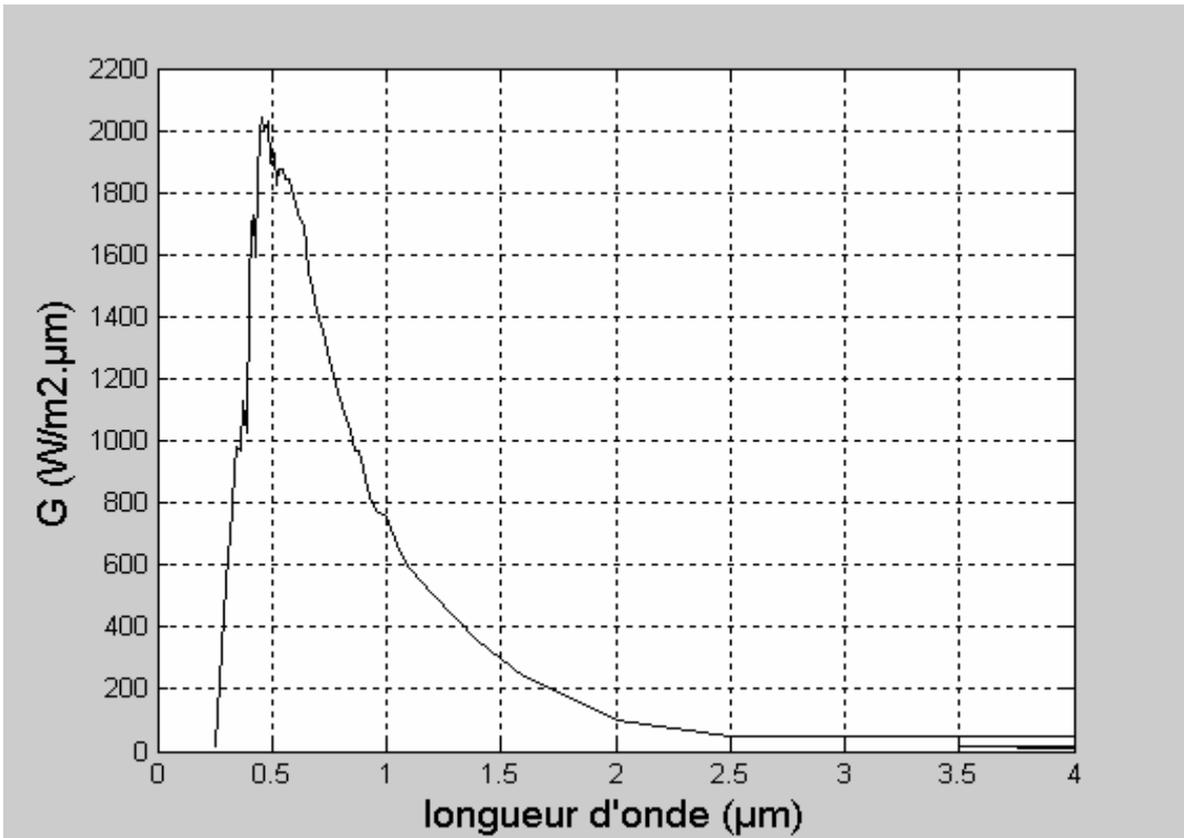


Tableau (II-1) : Répartition spectrale de l'atmosphère [4].

Le tableau (II-2) représente les valeurs du rayonnement hors atmosphère en fonction de la longueur d'onde. Ces valeurs sont illustrées par la figure (II-1).

$\lambda(\mu\text{m})$	$G^\circ(\text{W}/\text{m}^2 \cdot \mu\text{m})$	$\lambda(\mu\text{m})$	$G^\circ(\text{W}/\text{m}^2 \cdot \mu\text{m})$	$\lambda(\mu\text{m})$	$G^\circ(\text{W}/\text{m}^2 \cdot \mu\text{m})$
0.250	13.8	0.520	1820.9	0.880	965.7
0.275	224.5	0.530	1873.4	0.900	911.9
0.300	542.3	0.540	1873.3	0.920	846.8
0.325	778.4	0.550	1875.0	0.940	803.8
0.340	912.0	0.560	1841.1	0.960	768.5
0.350	983.0	0.570	1843.2	0.980	763.5
0.360	967.0	0.580	1844.6	1.000	756.5
0.370	1130.8	0.590	1782.2	1.050	668.6
0.380	1070.3	0.600	1765.4	1.100	591.1
0.390	1029	0.620	1716.4	1.200	505.6
0.400	1476.9	0.640	1693.6	1.300	429.5
0.410	1698.0	0.660	1545.7	1.400	354.7
0.420	1726.2	0.680	1492.7	1.500	296.6
0.430	1591.1	0.700	1416.6	1.600	241.7
0.440	1837.6	0.720	1351.3	1.800	169.0
0.450	1995.3	0.740	1292.4	2.000	100.7
0.460	2042.6	0.760	1236.1	2.500	49.5
0.470	1996.0	0.780	1188.7	3.000	25.5
0.480	2028.8	0.800	1133.3	3.500	14.3
0.490	1892.4	0.820	1089.0	4.000	7.8
0.500	1918.3	0.840	1035.2	5.000	2.7
0.510	1926.1	0.860	967.1	8.000	0.8

Tableau [II-2] : valeurs du rayonnement hors atmosphère en fonction de la longueur d'onde [5].



Figure(II-1) : Répartition spectrale du rayonnement hors atmosphère.

II-6- Influence de l'atmosphère sur le rayonnement solaire

L'atmosphère est l'enveloppe gazeuse la plus externe de notre planète. Bien que dans la vie de tous les jours elle soit oubliée et parfois ignorée, elle est pourtant indispensable. Elle est transparente aux rayons lumineux dans le domaine visible, ce qui nous permet de voir le monde qui nous entoure. Sa présence est tout de même révélée par la couleur bleue du ciel. Ses propriétés de transparence sélective sont dues à la capacité des molécules qui la composent d'absorber une partie du rayonnement électromagnétique et d'émettre un rayonnement du même type dans une autre longueur d'onde. Une partie seulement de l'énergie solaire atteint donc la surface de la Terre [9].

La masse volumique $\rho(z)$ de l'air atmosphérique diminue avec l'altitude z , cette variation entraîne une variation de la réfraction de l'air celle-ci provoque une déviation progressive des rayons lumineux ce qui influe sur la durée du jour car s'il n'y avait pas d'atmosphère, l'obscurité la plus complète arriverait dès que le soleil

disparaît à l'horizon. La lumière solaire diffusée par les couches supérieures de l'atmosphère encore illuminées par le soleil fait que le passage du jour à la nuit ou de la nuit au jour se fait graduellement [5].

II-7- Composition de l'atmosphère terrestre

On considère l'atmosphère comme un mélange :

- d'air sec et propre
- de vapeur d'eau
- d'aérosols (fines particules en suspension dans l'air)

L'atmosphère propre et sèche est composée de 78% d'azote, de 21% d'oxygène, de 1% d'argon et de divers gaz.

Les caractéristiques absorbantes de l'atmosphère sont déterminées selon ses différents composants. On décompose verticalement l'atmosphère en couches et la limite de chaque couche est définie d'après le changement de la variation de température en fonction de l'altitude [12].

- La troposphère entre le sol et 12 km d'altitude c'est là où se passent les phénomènes météorologiques
- La stratosphère entre 12 et 50 km d'altitude.
- La mésosphère entre 50 et 80 km d'altitude.
- La thermosphère entre 80 et 500 km d'altitude.
- L'exosphère plus de 500 km d'altitude.

La stratification verticale de l'atmosphère est représentée dans la figure (II-1) [7].

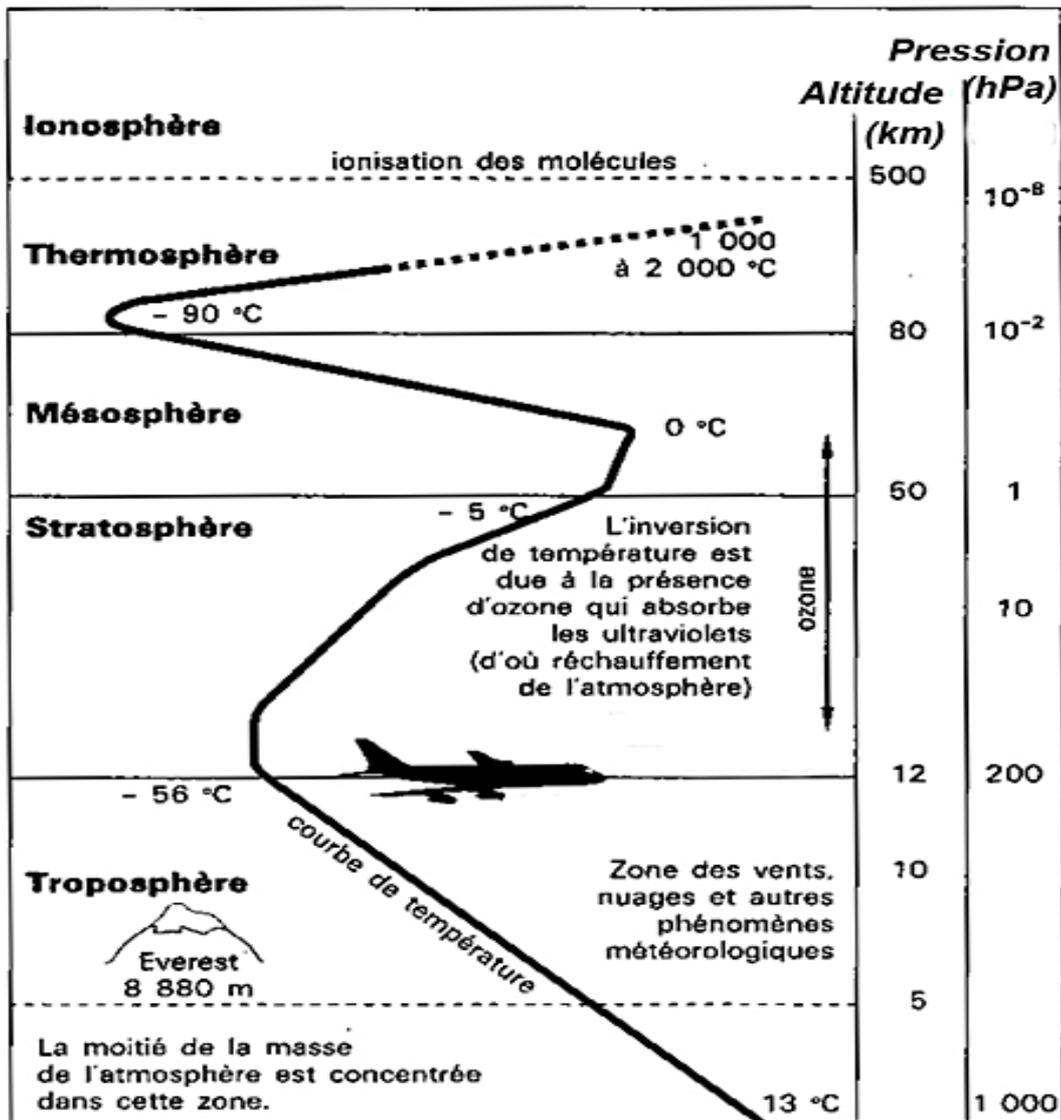


Figure (II-1) : Stratification verticale de l'atmosphère [4].

II-8-Masse atmosphérique ou nombre d'air mass

L'atmosphère terrestre s'étend jusqu'à de très grandes distances, mais avec une densité qui tend vers zéro. On ne peut donc pas donner une valeur finie de l'épaisseur de l'atmosphère. Cependant, du point de vue de l'atténuation du rayonnement, c'est la quantité de matière rencontrée par un rayon qui est importante[18].

L'atténuation dépend de la longueur du trajet optique (l) et de la densité de molécules définie par la masse volumique (ρ).

Le produit (ρ, l) représente la masse atmosphérique d'une colonne d'air de longueur (l) et de section unité. On l'appelle "masse atmosphérique" (m').
 ρ et l sont fonction de l'altitude (z) .

$$m' = \int_0^{\infty} \rho \, dl \quad \text{kg/m}^2 \quad (2,11)$$

II-8-1-Lien de la masse atmosphérique à la pression

Pour déterminer la masse atmosphérique, il n'est pas nécessaire de connaître la densité de l'atmosphère à toutes les altitudes. Il existe en effet un lien étroit entre la masse atmosphérique et la pression. La pression atmosphérique correspond en effet au poids de l'air contenu au-dessus d'une surface unitaire horizontale placée à l'endroit considéré. La masse atmosphérique m' correspondant à la verticale (direction du zénith) vaut donc en unités (SI) [18].

$$m' = p / g \quad (2,12)$$

où g est l'accélération de la pesanteur.

II-8-2-Masse atmosphérique relative

Pour pouvoir travailler en grandeurs sans dimension, on a défini une unité de masse atmosphérique. Il s'agit de la masse correspondant à des valeurs normalisées de la pression et de la gravitation, soit à :

La pression standard au niveau de la mer p_0 et g_0 la pesanteur :

$$p_0 = 1.01325 \cdot 10^5 \text{ Pa (pascal)} = 1013.25 \text{ hPa (hectopascals ou mb, millibars)}$$

$$= 1 \text{ atm}$$

$$g_0 = 9.806 65 \text{ m/s}^2$$

$$m'_0 = p_0 / g_0 \quad (2,13)$$

La masse atmosphérique m'_0 correspondante permet de définir la masse atmosphérique relative comme étant le rapport:

$$m = m' / m'_0 \quad (2,14)$$

La masse atmosphérique relative m dans la direction du zénith est donc égale à:

$$m = p/p_0 \quad (2,15)$$

Pour les autres directions, on pourrait utiliser la formule de Kasten, qui tient compte du fait que les rayons ne sont pas tout à fait rectilignes à cause de la réfraction :

$$m(h) = \frac{m(0)}{\sin(h) + 9.40 * 10^{-4} (\sin(h) + 0.0678)^{-1.253}} \quad (2,16)$$

Cette formule donne une précision de 0.1% par rapport aux mesures.

On obtient pratiquement les mêmes valeurs en négligeant la réfraction, sauf pour de petites valeurs de h . On peut remplacer la formule de Kasten par l'expression plus simple :

$$m(h) = \frac{m}{\sin(h)} \quad (2,17)$$

La pression atmosphérique dépend essentiellement de l'altitude du site. La relation entre la pression et l'altitude dépend de la façon dont le profil de température dépend de l'altitude, et cette façon n'est pas la même dans toutes les couches de l'atmosphère.

Pour des altitudes inférieures à 3.5 km, on a la formule approchée

$$p = p_0 0.89^z \quad (2,18)$$

où z est l'altitude exprimée en km .

Compte tenu des formules précédentes on peut donc calculer m par la formule approchée [18].

$$m(z, h) = \frac{0.89^z}{\sin(h)} \quad (2,19)$$

Dans les conditions normales et au niveau de la mer ($z = 0$), l'expression simplifiée suivante est utilisée qui connue sous le nom d'air mass:

$$m = 1 / \sin(h)$$

Ainsi, lorsque le soleil est au zénith ($h = 90^\circ$), on dit qu'on a les conditions AM1 car les rayons lumineux traversent une atmosphère unité de 7.8 km [27] [28]

AM1 : nombre Air Masse 1 car $m = 1 / \sin(90^\circ) = 1$.

Avec un soleil à 45° sur l'horizon, on obtient les conditions AM1.5

AM1.5 : nombre Air Masse 1.5 car $m = 1 / \sin(45^\circ) = 1.5$.

Avec un soleil à 30° sur l'horizon, on obtient les conditions AM2

AM2 : nombre Air Masse 2 car $m = 1 / \sin(30^\circ) = 2$.

Et par convention, AM0 désigne le rayonnement solaire hors atmosphère.

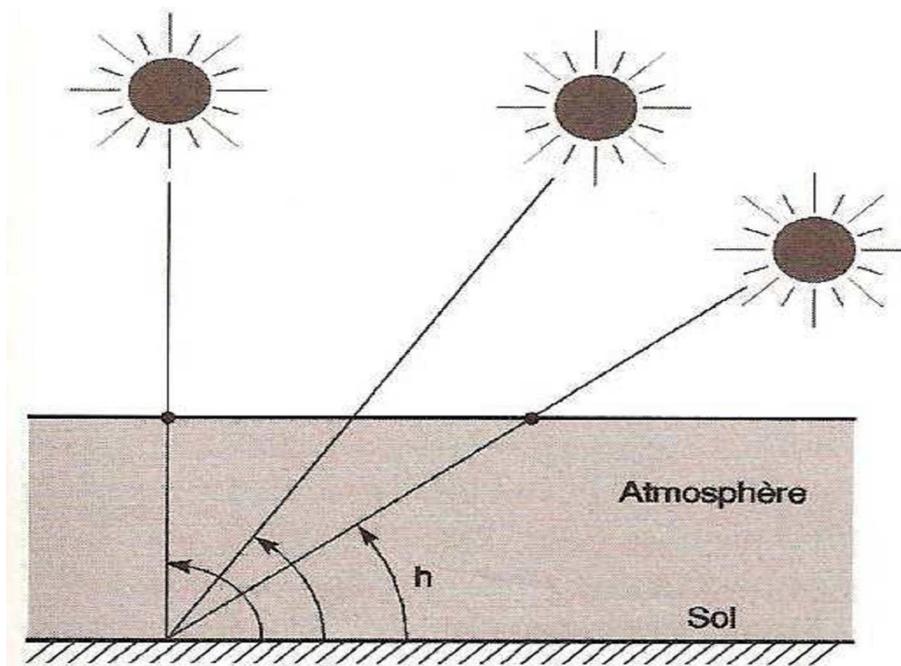


Figure (II-2) : Définition de l'air mass [31]

II-9- Atténuation du rayonnement solaire par l'atmosphère

Lors de sa traversée de l'atmosphère, le rayonnement solaire subit diverses atténuations que l'on peut classer en deux types:

- Atténuation par absorption
- Atténuation par diffusion

Le rayonnement absorbé est transformé en chaleur et disparaît du bilan du rayonnement utilisable au sol.

Le rayonnement diffusé est rayonné dans l'espace pour être à nouveau diffusé vers le sol ou vers le ciel absorbé ou transmis.

Le rayonnement reçu au sol se décompose en :

- rayonnement DIRECT : les rayons parallèles viennent directement du soleil.
- Rayonnement DIFFUS: ce rayonnement provient de manière non isotrope de toutes les directions de l'espace.

L'ensemble (DIRECT + DIFFUS) donne le rayonnement GLOBALE [13].

Pour un rayonnement de longueur d'onde donnée λ l'atténuation (absorption et diffusion) du rayonnement DIRECT dépend du type et du nombre d'obstacles (molécules des gaz atmosphériques, particules diverses) rencontrés par les photons.

L'intensité du rayonnement direct évolue lors de la traversée de l'atmosphère comme une exponentielle décroissante de la masse atmosphérique définie précédemment, Mais cette loi n'est raisonnablement pas vérifiée que pour chaque longueur d'onde du rayonnement prise séparément. D'autres hypothèses sont nécessaires pour qu'elle soit vérifiée exactement; il faudrait que la composition de l'atmosphère soit identique à toutes les latitudes. On aurait alors, pour chaque longueur d'onde λ [18].

$$I_{\lambda} = I_{0\lambda} e^{-k_{\lambda}m} \quad (2,20)$$

Avec :

k_{λ} coefficient d'atténuation

$I_{0\lambda}$ intensité du rayonnement hors atmosphère

On définit la transmission monochromatique τ_λ par:

$$\tau_\lambda = I_\lambda / I_{0\lambda} = \exp(-k_\lambda \cdot m) \quad (2,21)$$

D'où l'absorption monochromatique sera :

$$\alpha_\lambda = 1 - \tau_\lambda \quad (2,22)$$

τ_λ et α_λ varient entre 0 et 1 et le produit ($k_\lambda \cdot m$) varie de 0 à ∞

$$k \cdot m = 0 \quad \tau_\lambda = 1 \quad \alpha = 0$$

$$k \cdot m = \infty \quad \tau_\lambda = 0 \quad \alpha = 1$$

Expérimentalement on mesure α_λ et on déduit k_λ

$$k_\lambda = (1/m) \cdot \text{Log}(1 - \alpha_\lambda)$$

Chaque phénomène d'atténuation est lié à un coefficient d'atténuation total

II-9-1-Définition d'une atmosphère de référence

L'atmosphère de référence est définie en lui imposant

- de ne contenir que des gaz (atmosphère propre et sèche) ;
- de ne pas contenir d'eau, même pas sous forme gazeuse ;
- de contenir une "couche d'ozone" de 3 mm ;
- d'être de composition uniforme.

Dans l'atmosphère de référence, la formule (2,20) s'applique relativement bien, ce qui permettrait de définir les paramètres $k_{0\lambda}$ relatifs à chaque longueur d'onde. Mais par manque de données expérimentales à traiter en une fois toutes les longueurs d'onde, on pose:

$$S_n = g_n^e e^{-k_0 m} \quad (2,23)$$

où :

s_n puissance du rayonnement direct

g_n^e est l'éclairement (en W/m²) hors atmosphère.

Pour que la formule (2,23) reste +/- exacte dans le cas où l'on considère l'ensemble des fréquences, k_0 peut être rendu dépendant de m . La formule approchée de Kasten est utilisée pour ça [18]:

$$k_0 = [9.4 + 0.9 \text{ m}]^{-1} \quad (2,24)$$

II-9-2-Facteur de trouble total de LINKE

Pour obtenir l'éclairement relatif à une atmosphère réelle, il est nécessaire de corriger la formule (2,23) en y introduisant un paramètre T nommé facteur de trouble total de Linke T. On écrit:

$$S_n = g_n^e e^{-Tk_0 m} \quad (2,25)$$

Dans le cas d'une atmosphère de référence T est égale à 1. Il prend habituellement des valeurs plus grandes que 1.

Le facteur de trouble total est composé de deux termes:

$$T = T^* + \Delta T \quad (2,26)$$

Avec : T^* facteur de trouble par ciel clair

ΔT facteur de trouble additionnel du à la présence de nuages

a- Facteur de trouble par ciel clair

Le facteur de trouble T^* par ciel clair est décomposé en trois facteurs de trouble auxiliaire [2]:

$$T^* = T_0 + T_1 + T_2 \quad (2,27)$$

- T_0 correspond à l'absorption par vapeur d'eau :

$$T_0 = (2.4 - 0.9 \sin \varphi) + 0.1 (2 + \sin \varphi) \cdot A_h - 0.2 z - (1.22 + 0.14 A_h) \cdot (1 - \sin h) \quad (2,28)$$

- T_1 correspond à la diffusion moléculaire à l'origine de la couleur bleue du ciel

$$T_1 = (0.89)^z \quad (2,29)$$

- T_2 correspond à la diffusion (et à une légère absorption) par les aérosols rendant le bleu du ciel plus au moins blanchâtre.

$$T_2 = (0.9 + 0.4 A_h) \cdot (0.63)^z \quad (2,30)$$

Avec A_h c'est une fonction sinusoïdale (alternance hivers / été) donnée par la formule :

$$A_h = \sin [(360/365) (N - 121)] \quad (2,31)$$

b- facteur de trouble additionnel du à la présence de nuages

Le terme ΔT est nul par temps clair c'est-à-dire absence totale de nébulosité. Le trouble ΔT est lié à une grandeur nommée "fraction d'irradiation" notée i'' . Cette grandeur est définie comme le rapport pour le rayonnement direct incident sur un plan perpendiculaire aux rayons, entre la valeur réelle s_n et la valeur qui serait reçue par temps clair s_n^* [4,5] :

$$i'' = s_n / s_n^* \quad (2,32)$$

Avec:

$$s_n = g_n e^{-T k_o m} \quad (2,33)$$

on a évidemment

$$s_n^* = g_n e^{-T^* k_o m} \quad (2,34)$$

D'où :

$$i'' = e^{-k_o m \Delta T} \quad (2,35)$$

On obtient :

$$\Delta T = -\frac{1}{k_o m} L \circ g i'' \quad (2,36)$$

II-11-Conclusion

Le rayonnement solaire provenant du soleil en pénétrant dans l'atmosphère subit des atténuations par absorption et diffusion. L'intensité du rayonnement direct évolue lors de la traversée de l'atmosphère comme une exponentielle décroissante de la masse atmosphérique. Cette loi est valable pour une atmosphère de référence qui a des caractéristiques précises. Pour passer de l'atmosphère de référence à l'atmosphère réelle on introduit dans cette formule un facteur appelé facteur de trouble total qui intervient dans le calcul des différentes composantes du rayonnement solaire.

Chapitre –III- Rayonnement solaire au niveau du sol

III-1-Introduction

Le rayonnement solaire après sa traversée de l'atmosphère est considéré comme la somme de deux composantes Directe et Diffus.

Les formules d'évaluation de ces composantes qui seront présentées dans ce chapitre sont données par Perin de Brichambaut [3]. Elles sont appliquées correctement dans les parties du monde sauf pour celles où l'atmosphère est trop chargée de poussière. Pour l'Algérie les vérifications ont montré la validité de ces formules. On a aussi présenté quelques modèles simplifiés pour l'évaluation rapide de la puissance et l'énergie solaire sur un plan horizontal pour un jour clair. Pour l'évaluation de l'énergie sur un plan incliné on présente le modèle de Liu Jordan [16].

III-2- Composantes du rayonnement solaire

Le spectre du rayonnement solaire à la surface de la Terre est constitué de différentes composantes (figure-III-1). Le rayonnement direct provient directement du Soleil, tandis que le rayonnement diffus est diffusé par le ciel et le milieu extérieur. Un autre rayonnement encore est réfléchi par le milieu extérieur (la terre ou la mer) en fonction de l'albédo local. Le rayonnement terrestre total est appelé rayonnement global.

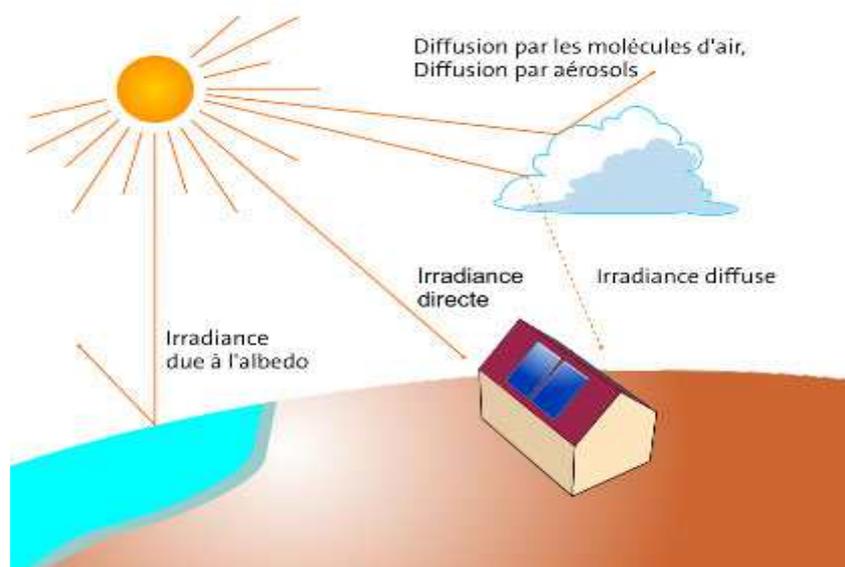


Figure (III-1) : Composantes du rayonnement solaire au niveau du sol [12].

III-2-1-Notation

a- Les puissances

Le flux du rayonnement est noté par :

s pour Direct

d pour Diffus

g pour Global $g = s + d$

Ces grandeurs sont des puissances par unité de surfaces et sont mesurées en w/m^2 .

On les note sous la forme a_j^i

a étant une des trois lettres s, d, g

i et j étant des indices .

i indice supérieur relatif au type de rayonnement

e : extra-terrestre ou hors – atmosphère

* : jour clair (sans nuages)

: sans indice jour quelconque avec nuages

j indice inférieur relatif au plan de réception

n : normal aux rayons directs

_ : plan horizontal

: sans indice plan quelconque

b- Les énergies

L'intégrale des valeurs des puissances a_j^i sur le temps (une heure ou une journée)

donne le flux d'énergie , la minuscule (a)devient majuscule (A):

$$A_j^i = \int a_j^i . dt$$

Ces grandeurs sont mesurées en J/m^2 ou en Wh/m^2 .

$$1 Wh = 3600 J$$

III-3-Modèles d'évaluation des composantes du rayonnement

solaire reçu au sol

D'après le modèle de PERRIN DE BRICHAMBAUT qui se base sur l'emploi du facteur de trouble total de Linke, le rayonnement GLOBAL est composé du rayonnement DIRECT et du rayonnement DIFFUS .

Le diffus est lui-même décomposé en :

- diffus provenant du ciel
- diffus provenant du sol
- diffus provenant de la rétro diffusion

III-3-1-Rayonnement Direct

Pour un plan récepteur normal aux rayons solaires, le rayonnement direct est donné par la formule :

$$s_n = g_n^e \exp(-k_0 \cdot m \cdot T) \quad (3,1)$$

Avec :

g_n^e : Rayonnement solaire hors atmosphère; $g_n^e = 1367[1 + 0.034 \cos(2\pi \cdot (N - 2)/365)]$

k_0 : coefficient d'atténuation ; $k_0 = [9.4 + 0.9 m]^{-1}$

m : masse atmosphérique ; $m = 0.89z/\sin(h)$

T : facteur de trouble total ; $T = T^* + \Delta T$

h : hauteur du soleil ; $\sin(h) = \cos(\delta) \cdot \cos(\varphi) \cdot \cos(H) + \sin(\varphi) \cdot \sin(\delta)$

Pour un plan de réception quelconque (α, γ) avec (i) étant l'angle d'incidence, la puissance du rayonnement direct incident est :

$$s = s_n \cos i \quad (3,2)$$

$$D'où \quad s = g_n^e \cos i \exp\left(-\frac{T}{0.9 + \frac{9.4}{(0.89)^z} \sinh}\right) \quad (3,3)$$

Sur un plan de réception tourné vers le sud ($\alpha = 0$) on a :

$$\cos i = \cos(\delta) \cdot \cos(\varphi - \beta) \cdot \cos(H) + \sin(\varphi - \beta) \cdot \sin(\delta) \quad (3,4)$$

Sur le plan horizontal ($\beta = 0$) on a : $\cos(i) = \sin(h)$

D'où :

$$s_{-} = g_n^e \sin h \exp\left(-\frac{T}{0.9 + \frac{9.4}{(0.89)^z} \sinh}\right) \quad (3,5)$$

III-3-2- Rayonnement Diffus

Le rayonnement diffus est composé de trois parties

$$d = d_1 + d_2 + d_3$$

Avec:

d_1 diffus du ciel

d_2 diffus du sol

d_3 diffus rétro diffusé

III-3-2-1-Diffus du ciel

Le rayonnement diffus incident en provenance du ciel d_1 est donné par :

$$d_1 = d_d \cos i + d_i \left(\frac{1 + \sin \gamma}{2} \right) + d_h \cos \gamma \quad (3,6)$$

Avec ;

- d_d composante directe ou circumpolaire : elle provient du voisinage du soleil
- d_i composante isotrope : elle correspond à un ciel de luminance uniforme
- d_h composante du cercle de l'horizon : elle est associée à une accumulation d'aérosols dans les basses couches atmosphériques.

Les formules donnant les composantes d_d , d_i , et d_h sont :

$$- d_d \left\{ \begin{array}{l} d_d = g_n^e \cdot \exp [- 2.48 + \sin(h) + a - \sqrt{4b^2 + a^2}] \\ \text{avec } b = \text{Log } T' - 2.28 - 0.50 \text{ Log } (\sin h) \\ a = 3.1 - 0.4 b \\ T' = T_1 + T_2 \end{array} \right. \quad (3,7)$$

$$- d_i \left\{ \begin{array}{l} d_i = d_- - d_d \cdot \sin h \\ d_- = g_n^e \exp [-1 + 1.06 \text{ Log } (\sin h) + a - \sqrt{b^2 + a^2}] \\ \text{avec : } b = \text{Log } T' - 2.80 + 1.02 (1 - \sin h)^2 \\ a = 1.1 \end{array} \right. \quad (3,8)$$

$$- d_h \left\{ \begin{array}{l} d_h = g_n^e \frac{-0.02a}{a^2 + a.b + 1.8} \exp (\sin h) \\ \text{avec : } b = \exp [0.2 + 1.75 \text{ Log } (\sin h)] \\ a = \text{Log } T' - 3.1 - \text{Log } (\sin h) \end{array} \right. \quad (3,9)$$

III-3-2-2- Diffus du sol

Le sol est caractérisé par son coefficient de réflexion ρ appelé albédo ; c'est le rapport de l'énergie solaire réfléchiée par une surface sur l'énergie solaire incidente. On utilise une échelle graduée de 0 à 1, avec 0 correspondant au noir, pour un corps sans aucune réflexion et 1 au miroir parfait, pour un corps diffusant dans toutes les directions et n'absorbant rien du rayonnement électromagnétique visible qu'il reçoit. Les valeurs de l'albédo pour différents types de surfaces sont données par le tableau suivant [14] :

Type de surface	Albédo ρ (0 à 1)
Surface de lac	0,02 à 0,04
Forêt de conifères	0,05 à 0,15
Surface de la mer	0,05 à 0,15
Sol sombre	0,05 à 0,15
Cultures	0,15 à 0,25
Sable léger et sec	0,25 à 0,45
Glace	0,30 à 0,40
Neige tassée	0,40 à 0,70
Neige fraîche	0,75 à 0,90
Miroir	1

Tableau (III-1) : Valeurs de l'albédo pour différentes surfaces [14].

Le diffus du sol est donné par la formule suivante :

$$d_2 = d_a \frac{1 - \sin \gamma}{2} \quad (3,10)$$

d_a composante due à l'albédo. C'est le produit du coefficient de réflexion du sol par la valeur du rayonnement global incident sur le sol sur un plan horizontal:

$$\begin{aligned} d_a &= \bar{\rho} \cdot g_{\perp} \\ &= \bar{\rho} \cdot [s_{\perp} + d_{\perp}] \end{aligned} \quad (3,11)$$

Avec les expressions de s_{\perp} et d_{\perp} donnés ci-dessus.

III-3-2-3- Diffusion rétro-diffusée

Le diffus du sol est rétro-diffusé c'est-à-dire qu'une partie est diffusée à nouveau par le ciel vers le sol d_3 c'est la composante due à la rétro-diffusion .

$$d_3 = d_r \cdot \frac{1 + \sin \gamma}{2}$$

avec : $d_r = 0.9 \cdot (\bar{\rho} - 0.2) \cdot g \cdot \exp\left(-\frac{4}{\sqrt{T}}\right)$ (3,12)

La puissance du rayonnement global incident à un instant donné sur un plan quelconque (α, γ)

$$g = s + d$$

Avec:

$$s = \text{direct}$$

$$s = s_n \cdot \cos i$$

$$d = \text{diffus}$$

$$d = d_1 + d_2 + d_3$$

III-4-Modèles simplifiés pour la puissance du rayonnement solaire sur le plan horizontal pour un jour clair

Dans le cas d'un jour clair si on désire une évaluation rapide de la puissance reçue au sol sur un plan horizontal on peut utiliser les modèles simplifiés.

III-4-1- Modèle de PERRIN DE BRICHAMBEAU

Ce modèle est présenté par les formules suivantes [3]

$$g = s + d$$

$$s = A \cdot \sin(h) \cdot \exp(-1 / (C \cdot \sin(h+2)))$$
 (3,13)

$$d = B \cdot \sin(h)^{0.4}$$
 (3,14)

avec A , B et C sont donnés par le tableau suivant:

Etat du ciel	A	B	C
Ciel très pur	1300	87	6
Ciel moyen	1230	125	4
Ciel pollué	1200	187	2.5

Tableau(III-2): valeurs des constantes A,B,C

III-4-2- Modèle de HOTTEL et LIU JORDAN

$$g_{-}^{*} = s_{-}^{*} + d_{-}^{*}$$
$$s_{-}^{*} = g_{ne} \cdot \sin(h) \cdot \tau_b \quad (3,15)$$

$$d_{-}^{*} = g_{ne} \cdot \sin(h) \cdot \tau_d \quad (3,16)$$

τ_b et τ_d sont les transmissions pour le direct et le diffus .

$$\tau_b = a_0 + a_1 \cdot \exp(-k/\sin(h))$$

$$\tau_d = 0.2710 - 0.2939 \cdot \tau_b$$

avec :

$$a_0 = 0.4237 - 0.00820 \cdot (6 - z)^2$$

$$a_1 = 0.05055 + 0.00595 \cdot (6.5 - z)^2$$

$$k = 0.2711 + 0.01858 \cdot (2.5 - z)^2$$

z : altitude du lieu en km

Ces formules sont établies pour une atmosphère moyenne de visibilité 23 km et pour des altitudes inférieures à 2.5 km [3].

III-5-Modèles simplifiés pour l'énergie du rayonnement solaire sur le plan horizontal pour un jour clair

Pour une évaluation rapide on peut intégrer les valeurs simplifiées des puissances ci-dessus. Si on veut éviter l'intégration on pourra utiliser les modèles suivants [3].

III-5-1-Modele de Perrin de Brichambaut

Ces formules sont valables pour :

$$T^* < 6 \quad \text{et} \quad -60^\circ < \varphi < +60^\circ$$

- Global G_{-}^{*} :

$$G_{-}^{*} = (0.91 - 0.15 \cdot \text{Log}(T^*)) \cdot \cos^k(\varphi - \delta) \quad (3,17)$$

$$\text{Avec : } k = 0.13 \cdot \sqrt{T^*}$$

- Diffus D_{-}^{*} :

$$D_{-}^{*} = 0.07 \cdot (T^* - 1) \cdot \cos^{-0.7}(\varphi - \delta) \quad (3,18)$$

- Direct S_{-}^{*} :

Il est obtenu par différence ou bien directement par :

$$S_{-}^{*} = \exp(-T^*/(7.5 \cdot \cos^{-0.75}(\varphi - \delta))) \quad (3,19)$$

III-5-2-Modèle de Bernard, Menguy et Schwartz

Ces formules sont valables pour des conditions moyennes et des régions dont la latitude est comprise entre 30° N et 60° N

L'énergie G_{*} est donné en wh/m^2 ; les angles φ et δ sont exprimés en degrés .

- Global G_{*} :

$$G_{*} = 3250 \cdot [2 + \operatorname{tg}(\varphi + 0.01 \cdot (18 - \delta)^2)] \cdot \cos^2(\varphi - \delta). \quad (3,20)$$

- Direct S_{*} :

$$S_{*} = 0.96 \exp(-1 / (7.2 \cdot \cos(\varphi - \delta + 2))). \quad (3,21)$$

III-6 – Rayonnement solaire moyen en présence des nuages

La présence ou non des nuages est un élément primordial pour la connaissance de la puissance et de l'énergie du rayonnement solaire reçu au sol.

La présence des nuages est mesurée par la fraction d'insolation

III-6-1-Fraction d'insolation

On mesure pour une journée, le temps durant lequel le soleil a brillé. Cette durée c'est "la durée d'insolation quotidienne "D".

On appelle "Do" la durée astronomique du jour ; c'est l'intervalle entre le lever et le coucher du soleil.

- La "fraction d'insolation quotidienne " noté par $\bar{\sigma}$ est par définition :

$$\bar{\sigma} = \frac{D}{D_0} \quad (3,22)$$

- La "fraction d'insolation mensuelle" notée $\bar{\sigma}$ est la moyenne des fractions d'insolation quotidienne pour un mois donné.

$$\bar{\sigma} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sigma_i \quad (3,23)$$

Avec:

$\bar{\sigma}_i$: pour un jour donné

n : nombre de jours du mois

On appelle "jour clair" un jour pour le quel $\bar{\sigma} = 1$

On appelle " jour d'ensoleillement moyen " un jour fictif pour le quel $\bar{\sigma} = \bar{\sigma}$

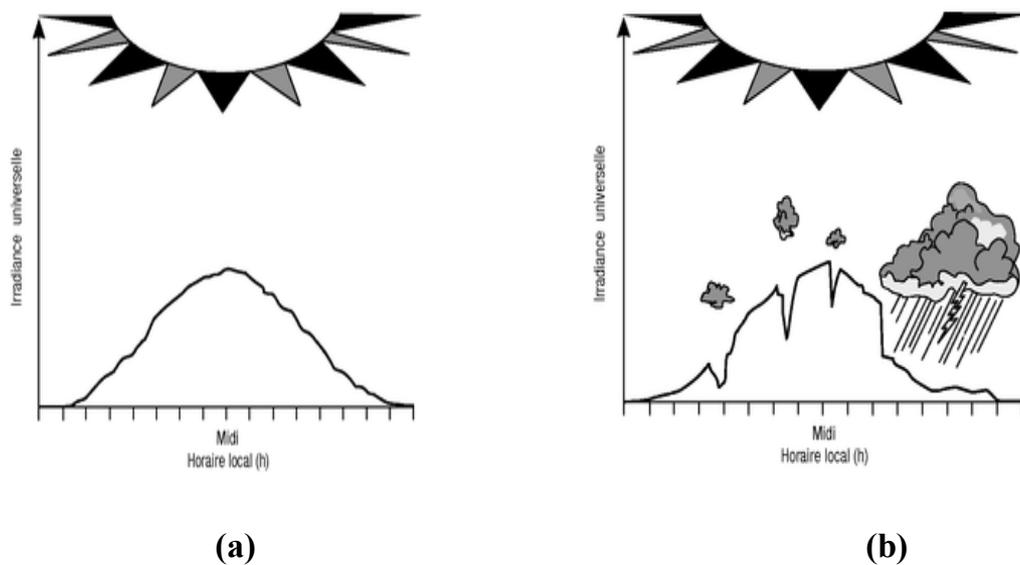


Figure (III-2) [6] :

- a- Variations diurnes du flux radiatif solaire global pour un jour ensoleillé
- b- Variations diurnes du flux radiatif solaire global en présence des nuages

III-8-Relations concernant les énergies

A partir de très nombreuses mesures en divers lieux et diverses saisons des formules linéaires et non linéaires reliant les énergies ont été établies. Parmi ces formules on présente deux formules linéaires celle de Black et celle d'Angstrom.

III-8-1- Formule de Black

Dans cette formule c'est le global hors atmosphère G_{e} qui est pris en référence il est relié au global hors atmosphère sur un plan horizontal pour un jour quelconque par une fonction linéaire en fonction de la fraction d'insolation. La formule est la suivante [3]:

$$G_{\text{t}} / G_{\text{e}} = a_0 \bar{\sigma} + b_0 \quad (3,24)$$

Avec : $\bar{\sigma}$ c'est la fraction d'insolation moyenne

Le rapport $G_{\text{t}} / G_{\text{e}}$ est appelé "indice de clarté" :

$$K_{\text{t}} = G_{\text{t}} / G_{\text{e}} \quad (3,25)$$

Les coefficients a_0 et b_0 ne sont pas constants, ils varient avec la date et le lieu sont déterminés pour chaque lieu.

III-8-2- Formule d'Angstrom

La formule d'Angstrom relie l'énergie globale moyenne sur un plan horizontal pour un jour quelconque avec nuages à l'énergie globale sur un plan horizontal pour un jour clair [3]:

$$\overline{G}_- / \overline{G}_-^* = a \overline{\sigma} + b \quad (3,26)$$

Avec : $a \approx 1 - b$

L'étude faite sur le rayonnement solaire en Algérie dans le livre Atlas solaire algérien par Michel Capderou montre que les coefficients a et b peuvent être constants pour tous les lieux. Ils prennent comme valeurs [3]:

$$a = 0.58$$

$$b = 0.41$$

III-8-3- Relation entre le diffus \overline{D}_- et $\overline{\sigma}$

L'expérience montre que le diffus peut se relier à la fraction d'insolation moyenne pour $\overline{\sigma} > 0.2$ par la relation suivante [3]:

$$\overline{D}_- / \overline{G}_- = a_1 \overline{\sigma} + b_1 \quad (3,27)$$

Avec:

$$a_1 = -0.35$$

$$b_1 = 0.53$$

III-9-Formule de Liu Jordan pour le calcul de l'énergie globale Reçue sur un plan incliné

L'énergie solaire reçue au sol sur un plan incliné est estimée en fonction de l'énergie reçue sur un plan horizontal par le modèle de Liu Jordan par l'équation suivante [16]:

$$G_{\text{incl}} = \overline{S}_- \cdot R_b + \overline{D}_- \cdot (1 + \cos(\beta))/2 + \overline{G}_- \cdot (1 - \cos(\beta))/2 \quad (3,28)$$

tel que R_b c'est le facteur d'inclinaison :

$$R_b = \frac{\cos(\varphi - \beta) \cdot \cos(\delta) \cdot \sin(H_s) + H_s \cdot \sin(\varphi - \beta) \cdot \sin(\delta)}{\cos(\varphi) \cdot \cos(\delta) \cdot \sin(H_c) + H_c \cdot \sin(\varphi) \cdot \sin(\delta)} \quad (3,29)$$

Avec :

β : angle d'inclinaison

ρ : albédo du sol

H_c : angle horaire du coucher du soleil sur le plan horizontal .

$$H_c = \arccos(-\operatorname{tg}(\varphi) \cdot \operatorname{tg}(\delta))$$

H_s : angle horaire du coucher du soleil sur un plan incliné

$$H_s = \operatorname{Min}[H_c, \arccos(-\operatorname{tg}(\varphi - \beta) \cdot \operatorname{tg}(\delta))]$$

III-10-Appareils de mesure

III-10-1-Mesure de la fraction d'insolation

La durée d'insolation est mesurée à l'aide d'un héliographe figure(III-3-(1-2)), c'est un appareil simple constitué d'une sphère de verre focalisant les rayons du soleil sur une bande de papier graduée en heures. Ce papier spécial est brûlé lorsque le soleil brille et lorsque l'éclairement du rayonnement direct est supérieur à 120 w/m^2 [3].

III-10-2-Mesure du rayonnement solaire global

On mesure la puissance du rayonnement solaire globale sur une surface horizontale grâce à un pyranomètre figure(III-4). Un pyranomètre comprend une double coupelle de verre, une thermophile (série de thermocouples) et un système d'enregistrement de la force électromotrice produite par cette thermophile sous l'action d'un rayonnement. Quand l'instrument est exposé à la radiation solaire, une différence de température est créée entre les secteurs noirs et les secteurs blancs. Cette différence de température est détectée par la thermophile qui convertit l'énergie thermique en énergie électrique. Ce courant peut être mesuré et amplifié et le signal de millivolt est converti par un facteur de calibrage en un flux en watt par mètre carré. Les coupelles de verre filtrent la bande de longueurs d'onde à mesurer (en général de 0,3 à 3mm) et limitent la condensation de vapeur d'eau.

Pour mesurer uniquement le rayonnement diffus, on ajoute un pare-soleil (bande métallique circulaire) qui protège le pyranomètre du rayonnement solaire direct. Le pyranomètre, appelé " solarimètre " dans le passé, fait partie de l'instrumentation classique des parcs météorologiques ; il est placé sur une surface horizontale [9].

III-10-3-Mesure du rayonnement direct

Les radiations solaires directes peuvent être mesurées par un Pyrhéliomètre figure(III-5). Contrairement au pyranomètre un disque noir détecteur est placé à la

base du tube dont l'axe est aligné avec la direction des rayons solaire, ainsi la radiation diffusée est bloquée par la surface du détecteur. Le Pyrhéliometre est continuellement pointé directement au soleil tout au long du jour. Cette grandeur est nulle lorsque le soleil est occulté par les nuages [9].

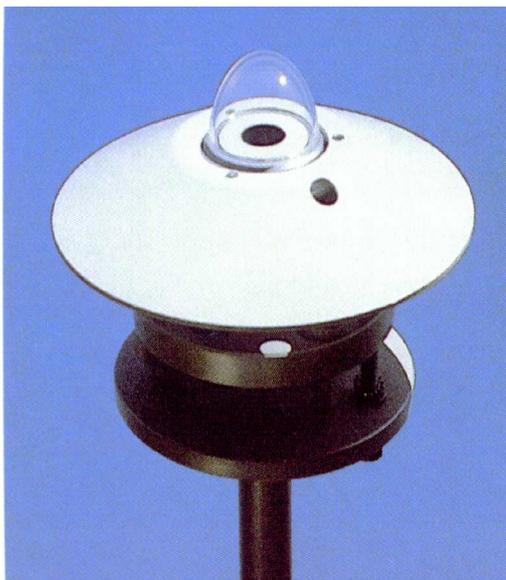
La radiation diffusée peut être déterminée par la soustraction de la radiation directe de la radiation globale.



Figure(III-3-1): Héliographe de Campbell-Stokes [17].



figure (III-3-2): Héliographe à fibres optique[17].



Figure(III-4) : Pyranomètre [17].



Figure (III-5) : Pyrhéliomètre[17].

III-11- Conclusion

Le rayonnement solaire qui arrive au sol se compose du rayonnement direct provenant directement du soleil et du rayonnement diffus, la somme du direct et du diffus donne le rayonnement global. Ces composantes peuvent être mesurés directement par différents instruments de mesure ou bien elles peuvent être estimées par des modèles analytiques qui sont établis après plusieurs mesures expérimentales. Parmi ces modèles on a présenté le modèle de Perrin de Brichambaut , le modèle de Liu Jordan et celui de Bernard, Menguy et Schwartz. Ces modèles donnent de bons résultats pour l'Algérie.

Chapitre -IV- Application et vérification des modèles du rayonnement solaire

IV-1-Introduction

Le chapitre IV est consacré à l'application des différentes formules vues dans les chapitres précédents pour la région de Batna et cela en utilisant le logiciel Matlab.

IV-2-Situation de la région de Batna

La région de Batna se situe à l'Est de l'Algérie, elle a une superficie de 12.038,76Km. Elle a les spécifications suivantes :

Latitude	35°.33 N
Longitude	6°.11 E
Altitude	1040 m
Albédo	0.25

Tableau [IV-1] : Spécifications du site de Batna

IV-3-Application des différents modèles

On a fait l'application des formules concernant les différents paramètres et les différentes composantes du rayonnement solaire pour la région de Batna.

IV-3-1-Durée du jour

On reprend l'équation (I-13) vue au chapitre (I) :

$$d = (2/15) \text{ arc cos } (-\text{tg}(\delta) \cdot \text{tg}(\varphi))$$

On trace la durée du jour en fonction du jour de l'année pour la région de Batna voir la figure (IV-1).

La durée du jour au solstice d'été est : 14.39 heures

La durée du jour au solstice d'hiver est : 9.61 heures

Au équinoxe du printemps et de l'automne la durée du jour est égale à celle de la nuit c'est : 12 heures

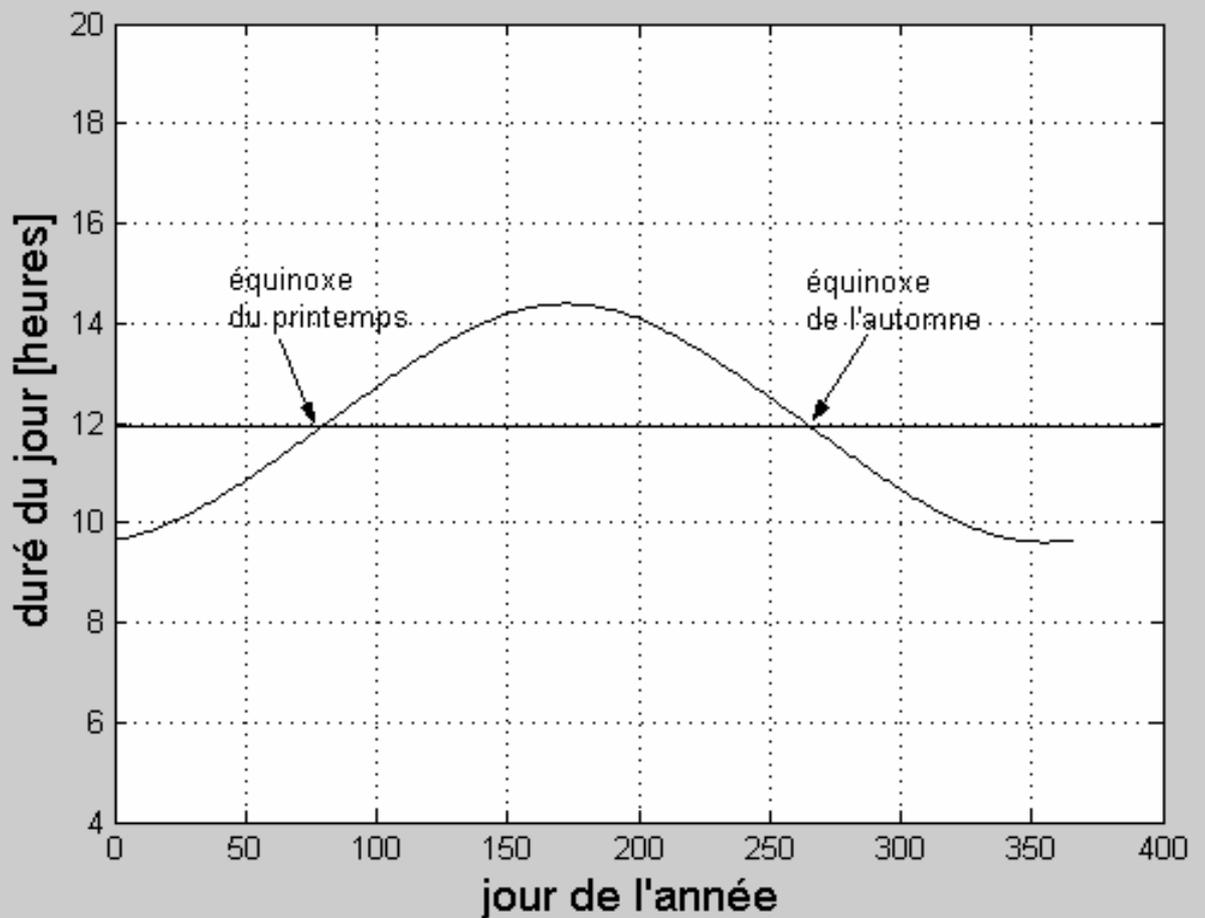


Figure (IV-1) : Variation de la durée du jour tout au long de l'année pour la région de Batna (Latitude = 35.33°)

IV-3-2-Influence de la latitude sur la durée du jour

On a aussi tracé la variation de la durée du jour au cours de l'année pour différentes latitudes, on constate suivant la figure (IV-2) que la durée du jour augmente avec la latitude pour la période d'été et diminue avec la latitude pour la période d'hiver. A l'équateur pour la latitude zéro les journées sont égales à 12 h tout au long de l'année.

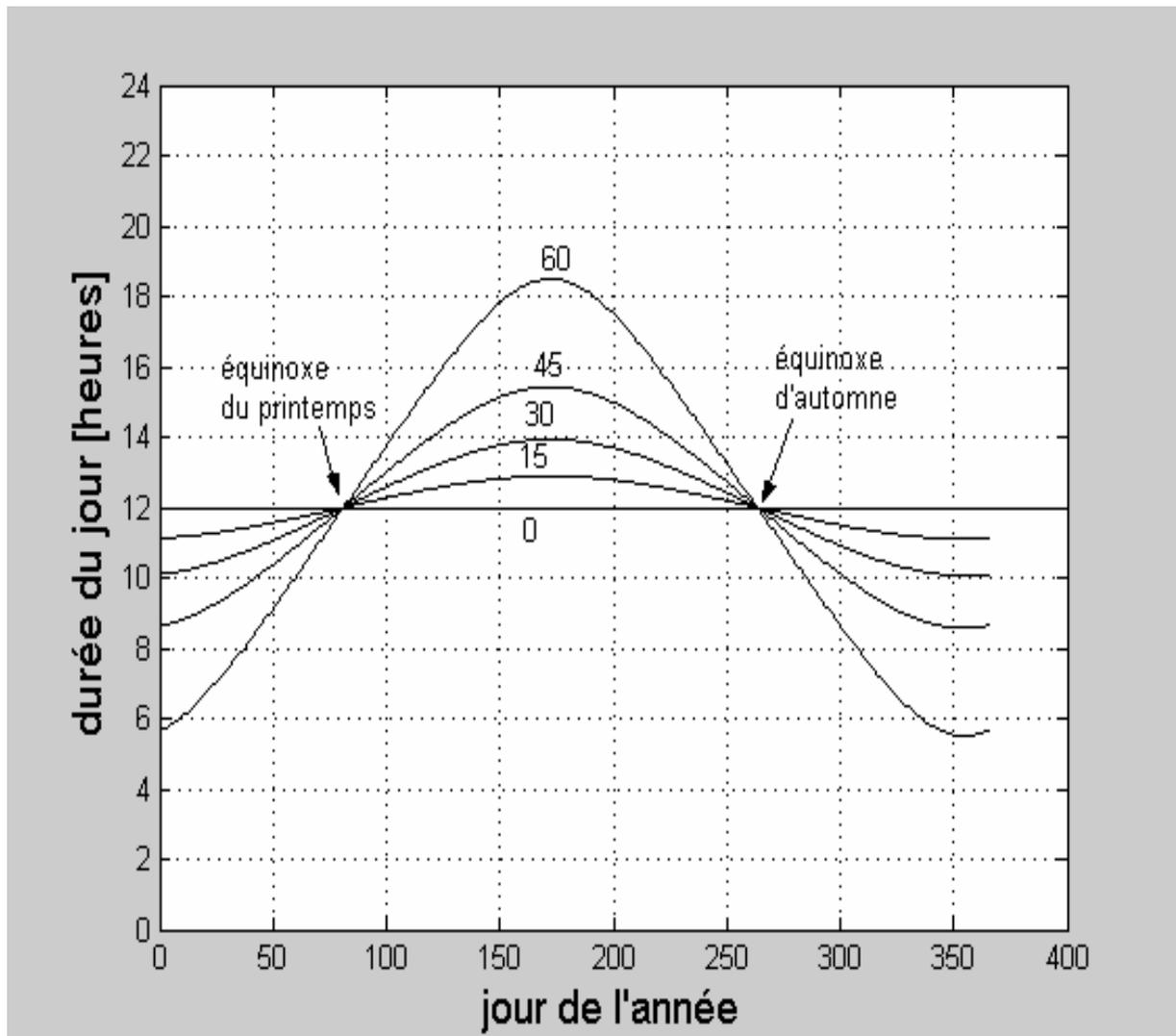


Figure (IV-2) : Variation de la durée du jour durant l'année pour différentes latitudes

IV-4-Rayonnement hors atmosphère

L'irradiation hors atmosphère est donnée par l'équation suivante :

$$G_{\text{e}} = (24/\pi) \cdot g_{\text{n}}^{\text{e}} \cdot [\cos(\varphi) \cdot \cos(\delta) \cdot \sin(H_{\text{c}}) + \sin(\varphi) \cdot \sin(\delta) \cdot (\pi/180) \cdot H_{\text{c}}]$$

Avec :

$$g_{\text{n}}^{\text{e}} = I_0 \cdot [1 + 0.033 \cdot \cos(360 \cdot N/365)]$$

$$H_{\text{c}} = \arccos(-\text{tg}(\varphi) \cdot \text{tg}(\delta))$$

I_0 : constante solaire (W/m²)

φ : Latitude du lieu

δ : Déclinaison du soleil

N : Numéro du jour de l'année

La figure montre que l'énergie hors atmosphère peut dépasser 11000 Wh/m² dans la période d'été.

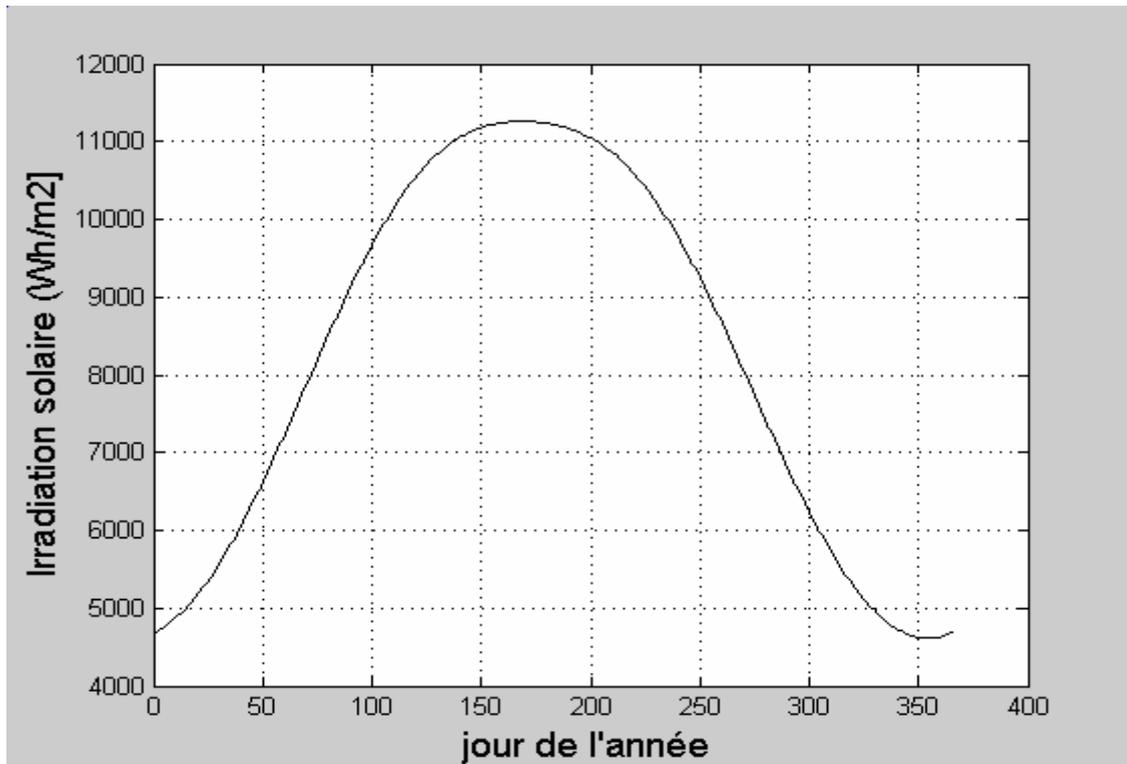


Figure (IV-3) : Variation de l'énergie hors atmosphère durant l'année

IV-4-1-Variation de l'énergie hors atmosphère en fonction de la latitude

On a tracé la variation de l'énergie hors atmosphère pour différentes latitudes, on remarque d'après la figure (IV-4) pour les latitudes proches de l'équateur l'énergie hors atmosphère est constante en moyenne elle varie aux alentours de 10000 Wh/m² et plus on s'éloigne de l'équateur plus l'énergie solaire hors atmosphère diminue.

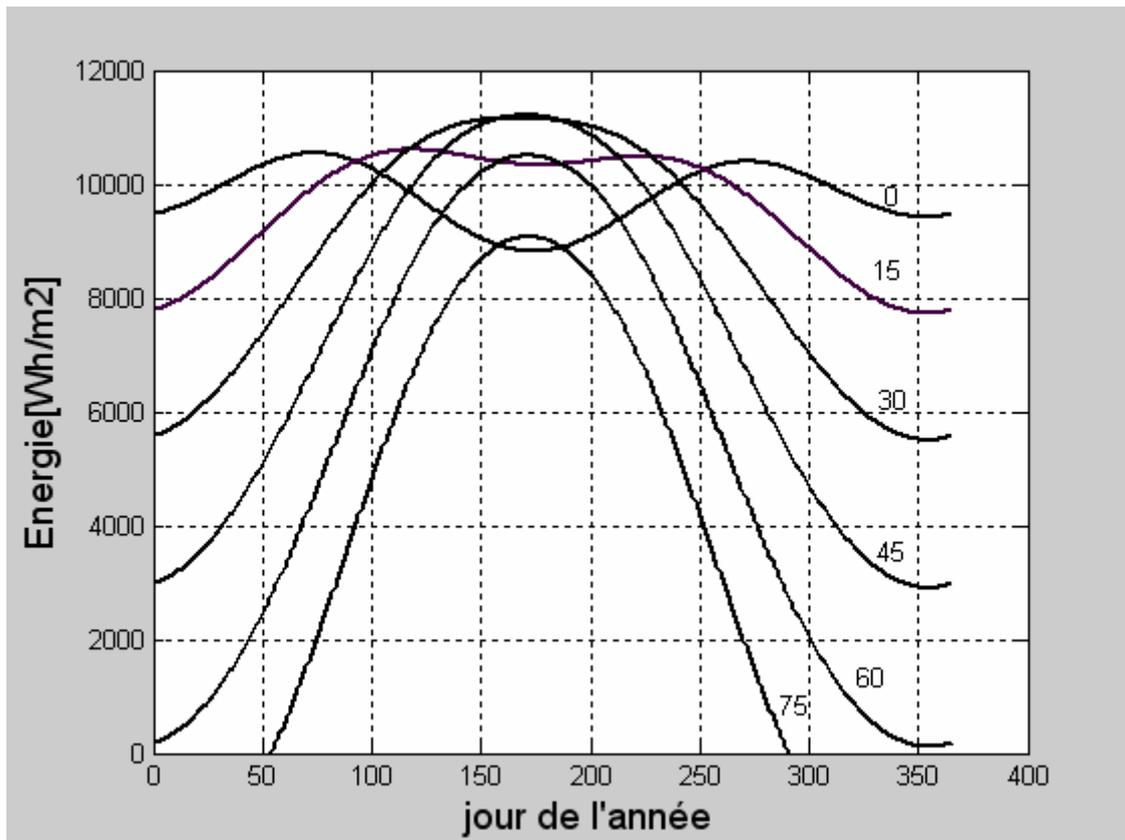


Figure (IV-4) : Variation de l'énergie hors atmosphère en fonction de la latitude

IV-5-Puissance du rayonnement solaire reçue au sol sur un plan horizontal et un plan incliné

On a fait l'application des formules de PERRIN DE BRICHAMBAUT concernant la puissance du rayonnement solaire vues au chapitre précédent on a obtenu les résultats suivants:

- Composantes de la puissance du rayonnement solaire global, direct et diffus (g , s , d) sur un plan horizontal pour un jour clair figure (III-7).
- Composantes de la puissance du rayonnement solaire global, direct et diffus (g , s , d) sur un plan TEL pour un jour clair voir figure (III-8).

On remarque que la composante direct est plus importante sur le plan horizontal que celle sur le plan incliné alors que la composante diffusée est plus importante sur le plan incliné que celle sur le plan horizontal.

La composante du global qui est la somme du direct et du diffus est meilleure sur le plan incliné que celle sur le plan horizontal.

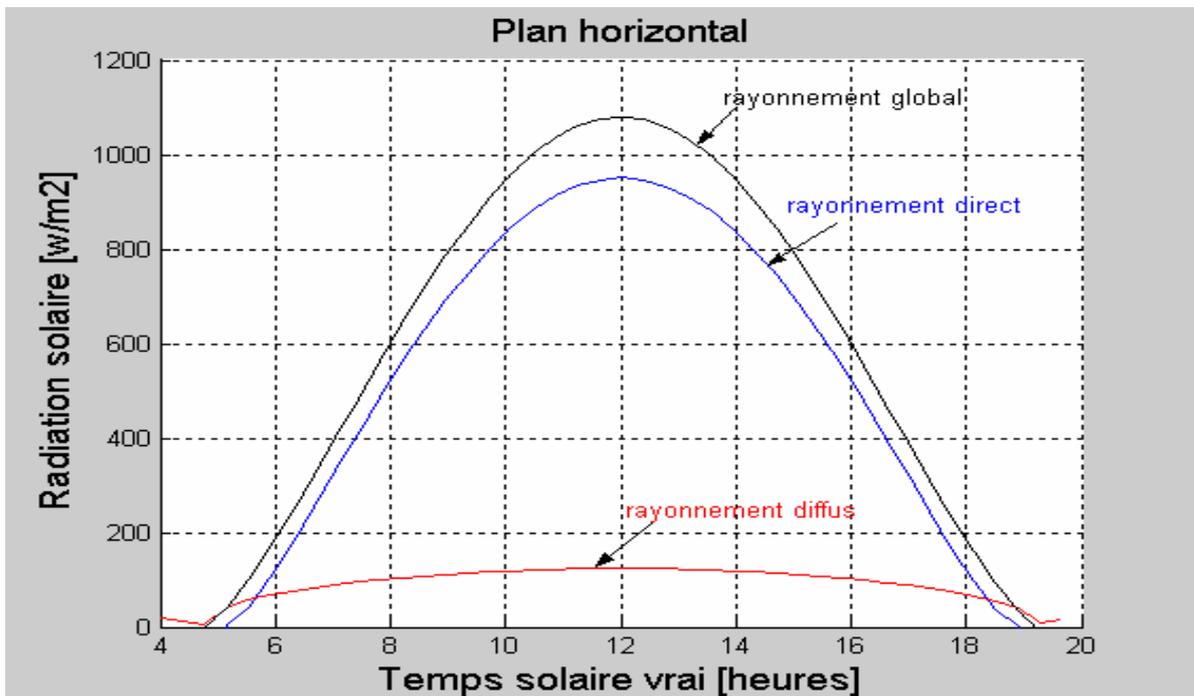


Figure (IV-5) : Variation de la puissance globale, directe et diffusée au cours du jour pour un jour clair (le 21 juin) sur un plan horizontal.

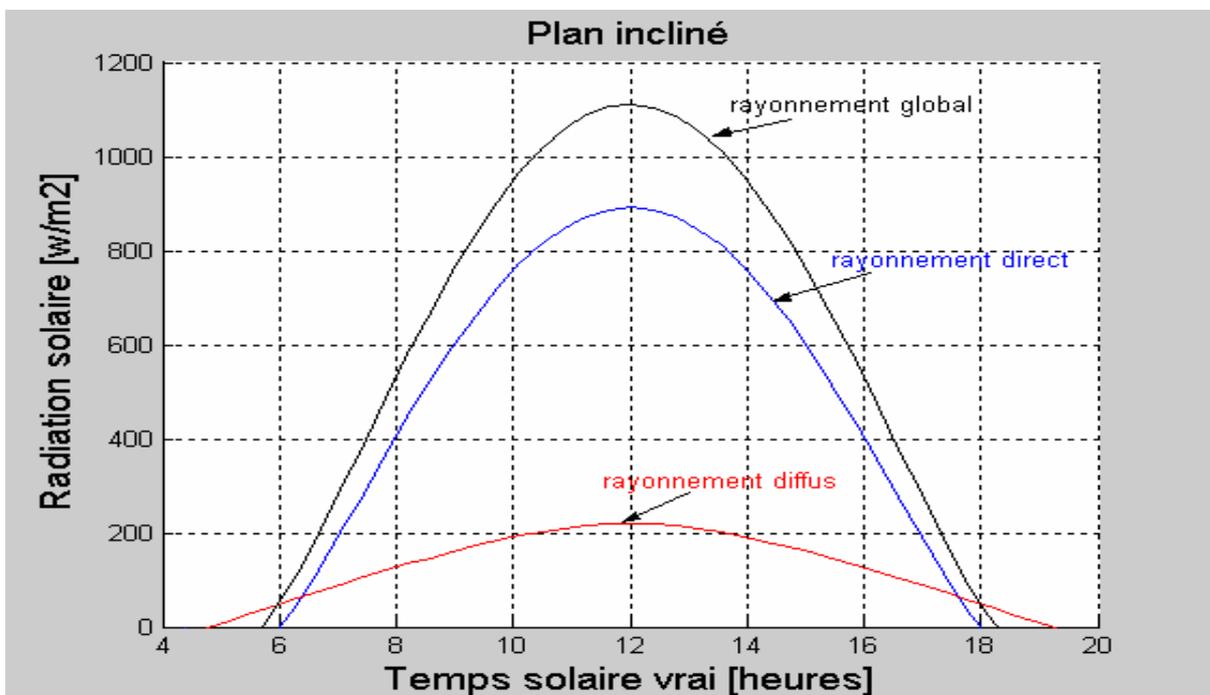


Figure (IV-6) : Variation de la puissance globale, directe et diffusée au cours du jour pour un jour clair (le 21 juin) sur un plan incliné à la latitude $=35.33^{\circ}$.

- Composantes de l'énergie du rayonnement solaire Global , Direct et Diffusé sur un plan horizontal durant l'année en utilisant les formules simplifiées de Bernard, Menguy et Schwartz équations (III-20-21) voir figure (III-7).

On voit que l'énergie globale dépasse 8000 Wh/m² pour la période d'été.

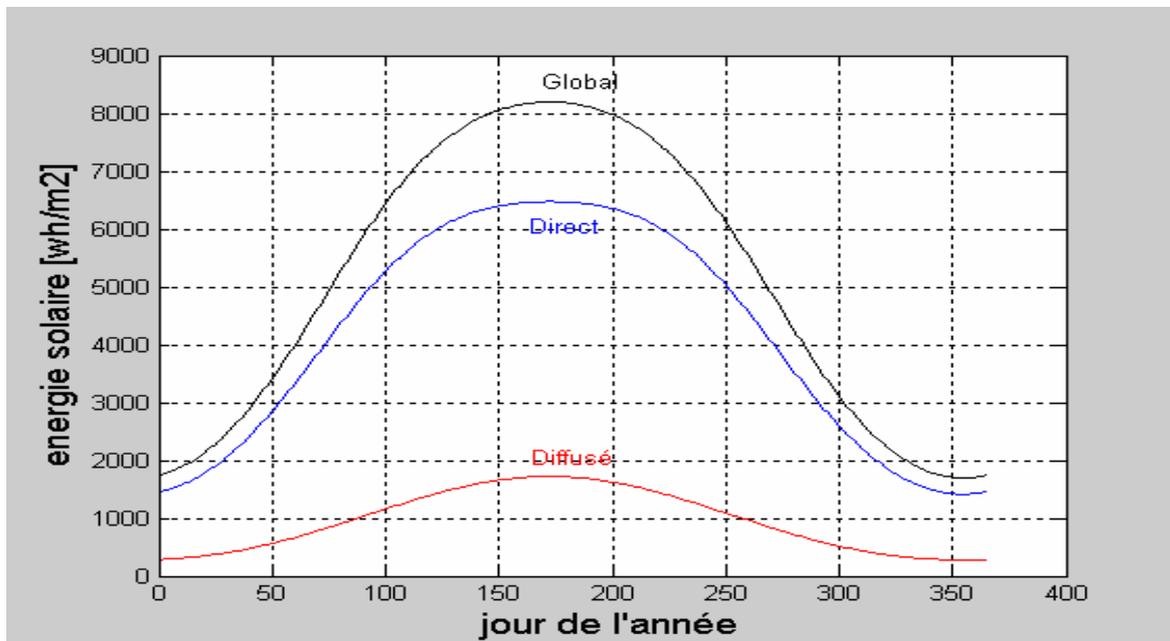


Figure (IV-7) : Variation de l'énergie globale, directe et diffusée sur un plan horizontal au cours de l'année (latitude=35.33°).

IV-6-Vérification expérimentale des modèles du rayonnement solaire

En utilisant les formules théoriques données par les deux modèles celui de PERIN DE BRICHAMBAUT et celui DE LIU JORDAN , on a tracé les graphes de la puissance globale sur un plan horizontal pour la région de Batna et on les a comparés avec les valeurs expérimentales prises du site EUROSOLAIR à l'université de Batna.

Les résultats obtenus sont simulés du lever au coucher du soleil selon les valeurs expérimentales relevées au site respectivement pour le 20 Mars, 21 Juin, 11 Novembre et le 24 Décembre de l'année 2007 qui correspondent aux quatre saisons de l'année.

L'analyse des figures montre que les deux modèles sont proches aux valeurs expérimentales au lever et au coucher du soleil et pour le midi solaire c'est le modèle de Perrin De Brichambaut qui est plus commode.

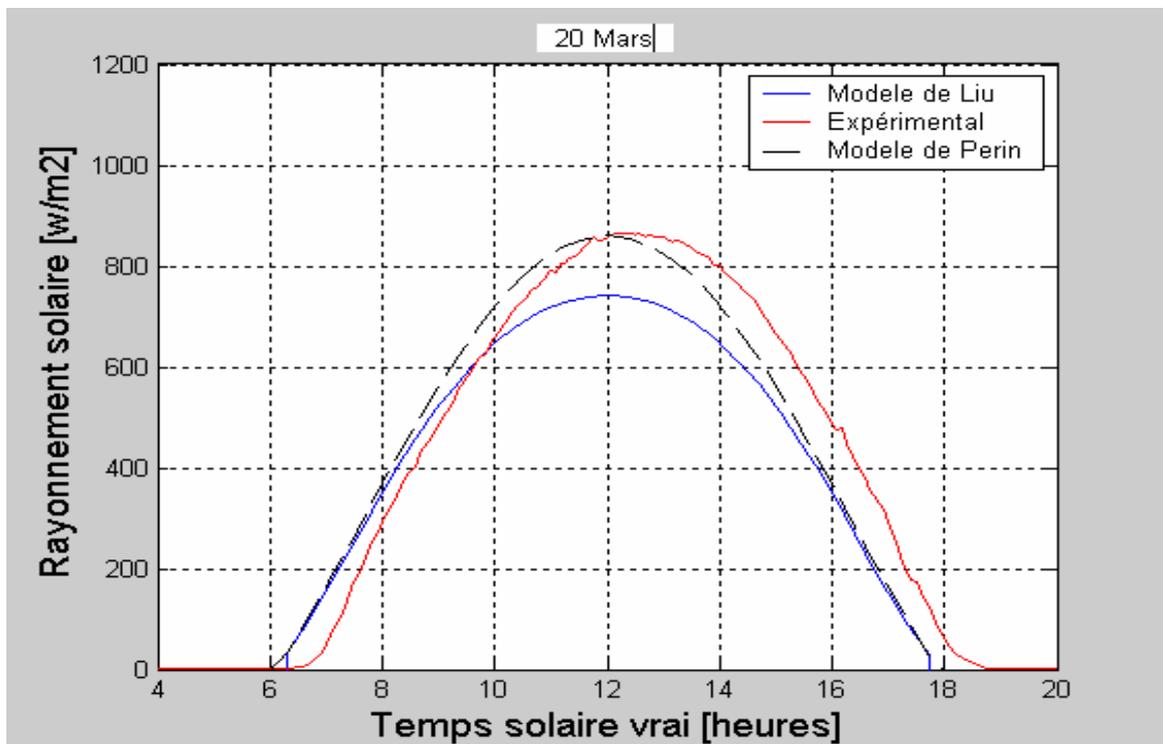


Figure (IV-8) : Rayonnement globale sur un plan horizontal pour le 20 Mars

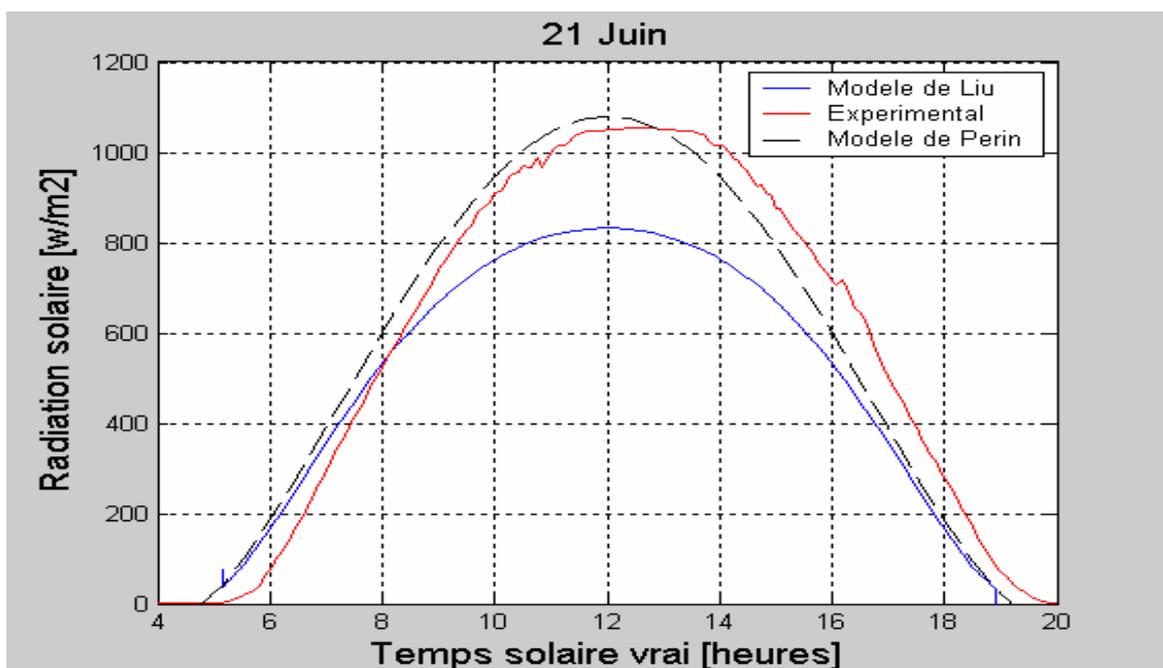


Figure (IV-9) Rayonnement global sur un plan horizontal pour le 21 Juin

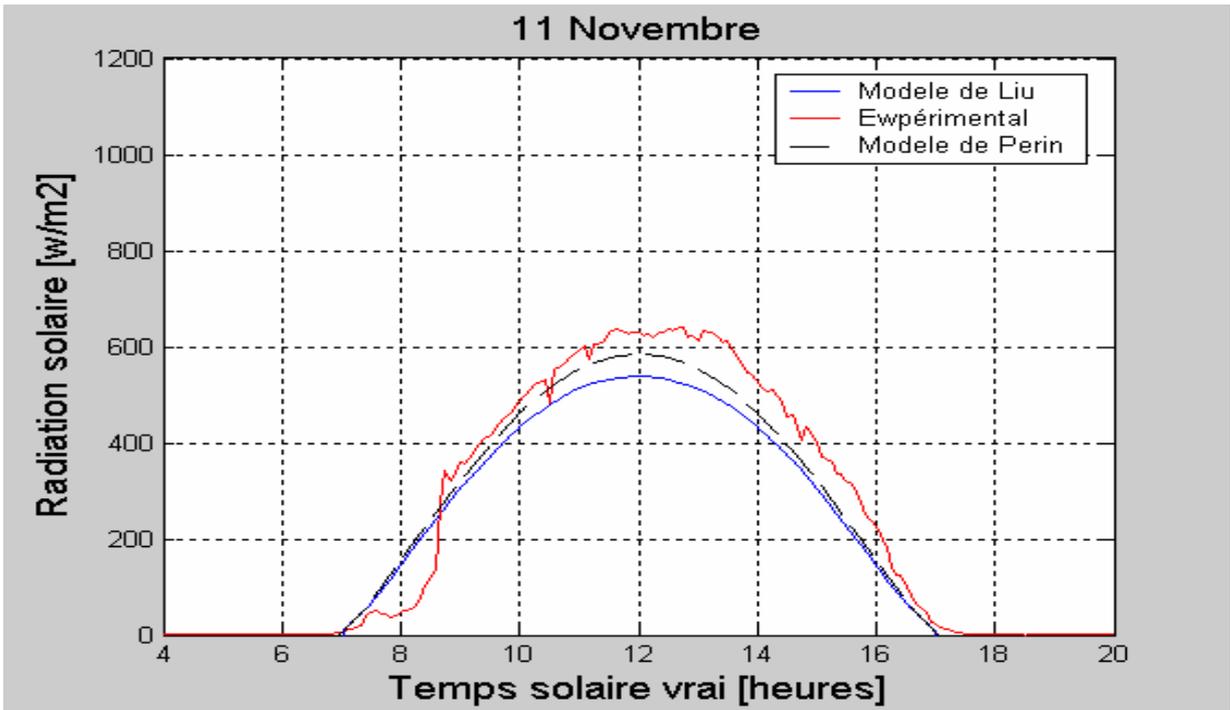


Figure (IV-10) Rayonnement solaire sur un plan horizontal pour le 11 Novembre

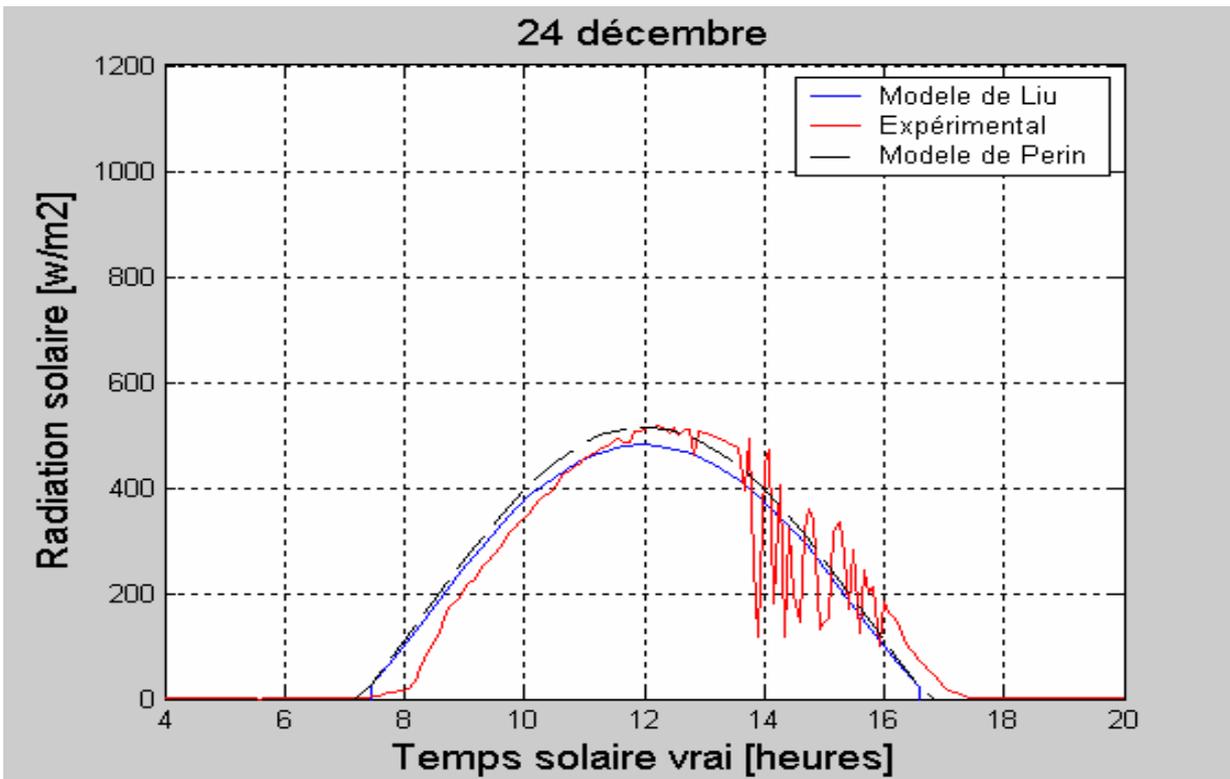


Figure (IV-11) Rayonnement global sur un plan horizontal pour le 24 Décembre

IV-7-Energie journalière mensuelle moyenne pour un jour clair sur un plan horizontal

Pour calculer l'énergie mensuelle moyenne pour un jour clair sur un plan horizontal on utilise les modèles simplifiées vus au chapitre (III), en considérant les jours types du mois on obtient le tableau suivant :

Mois	Jour type du mois	Déclinaison δ ($^{\circ}$)	G_*[Wh/m ²]
Jan	17	-20.9170	3606
Fév	47	-12.9546	4691
Mar	75	-2.4177	6026
Avr	105	9.4149	7303
Mai	135	18.7919	7996
Jun	162	23.0859	8127
Jull	198	21.1837	7912
Aout	228	13.4550	7308
Sep	258	2.2169	6183
Oct	288	-9.5994	4828
Nov	318	-18.9120	3721
Déc	344	-23.0496	3248

Tableau [IV-2-] : Valeur de l'énergie journalière mensuelle moyenne pour un jour clair sur un plan horizontal

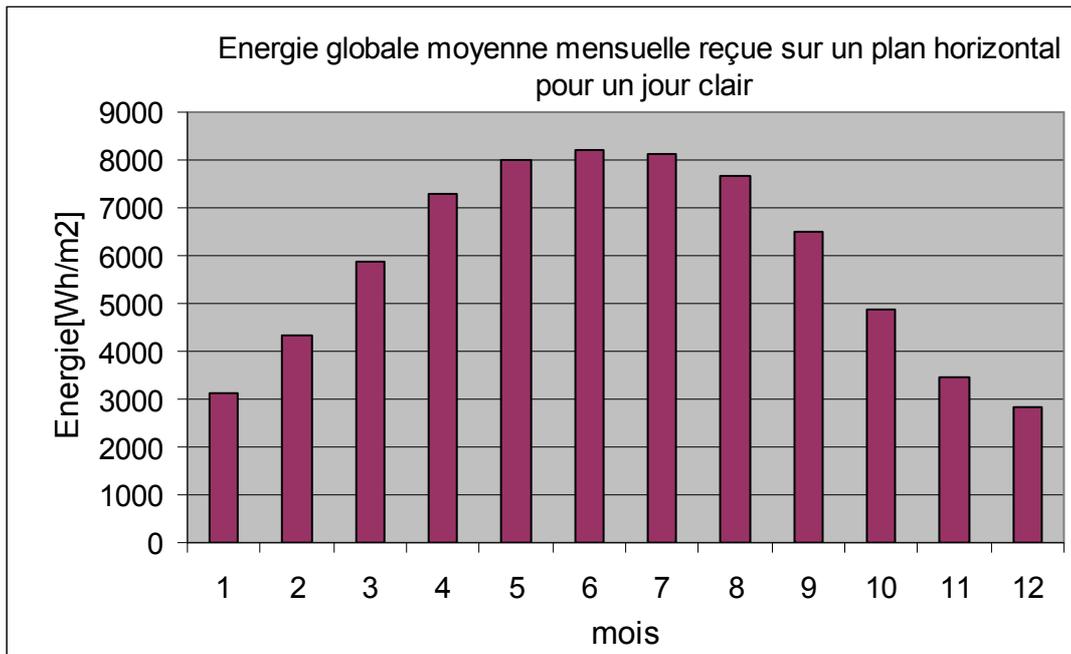


Figure (IV-12) : Variation de l'énergie globale moyenne mensuelle sur un plan horizontal pour un jour clair durant l'année

IV-8- Energie solaire reçue au sol sur un plan horizontal pour un jour quelconque

L'énergie solaire reçue au sol sur un plan horizontal pour un jour quelconque est liée à l'énergie solaire reçue au sol sur un plan horizontal pour un jour clair par la relation suivante donnée par Angstrom :

$$G_{\text{r}}/G_{\text{c}} = a\bar{\sigma} + b$$

Tel que :

$$\bar{\sigma} = D/D_0$$

Avec : a et b des constantes ; a = 0.58 et b = 0.41

D : La durée d'ensoleillement moyenne mesurée

D₀: C'est la durée astronomique du jour.

$$D_0 = (2/15) \cdot \arccos(-\text{tg}(\varphi) \cdot \text{tg}(\delta))$$

Le taux d'insolation $\bar{\sigma}$ est donné par le tableau [IV-2-] en se basant sur les mesures faites pour l'Atlas solaire Algérien prise de la référence [8].

Mois	Durée d'insolation mesurée D(h)	Durée d'insolation astronomique D ₀ (h)	Taux d'insolation $\bar{\sigma}$
Jan	5.54	9.90	0.56
Fév	5.70	10.75	0.53
Mar	6.35	11.77	0.54
Avr	7.09	12.90	0.55
Mai	9.28	13.86	0.67
Jun	10.61	14.35	0.74
Jull	11.58	14.13	0.82
Aout	10.50	13.30	0.79
Sep	8.54	12.21	0.70
Oct	7.20	11.08	0.65
Nov	6.98	10.12	0.69
Déc	5.69	9.66	0.59

Tableau [IV-3]: Valeur moyenne d'insolation mensuelle.

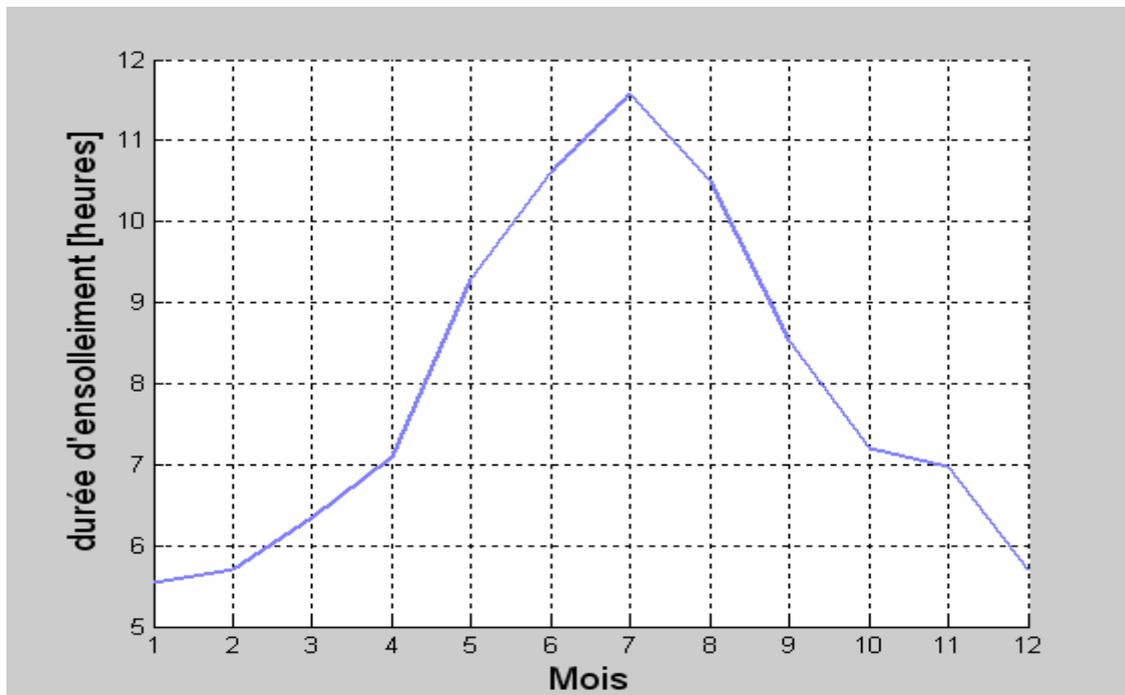


Figure (IV-13): Variation de l'insolation mensuelle durant l'année.

Finalement les valeurs de l'énergie reçue au sol sur un plan horizontal sont données par le tableau [IV-3] .Ces valeurs sont bien illustrées sur la figure (IV-13)

Mois	$\bar{\sigma}$	\bar{G}_h [Wh/m ²]
Jan	0.56	2650
Fév	0.53	3365
Mar	0.54	4358
Avr	0.55	5324
Mai	0.67	6385
Jun	0.74	6820
Jull	0.82	7007
Aout	0.79	6345
Sep	0.70	5045
Oct	0.65	3799
Nov	0.69	3015
Déc	0.59	2443

Tableau [IV-4] : Valeurs de l'énergie globale moyenne mensuelle sur un plan horizontale pour un jour quelconque.

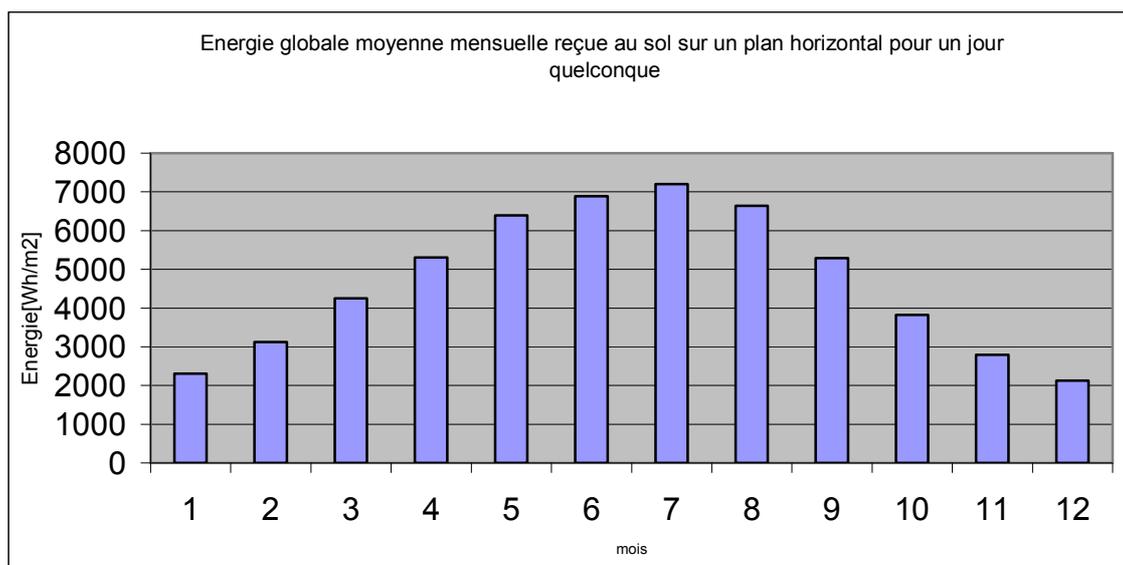


Figure (IV-14) : Energie globale moyenne mensuelle reçue sur un plan horizontal pour un jour quelconque.

La figure (IV-15) ci-dessous montre l'influence du climat sur l'énergie reçue au sol pour un jour clair et celle reçue pour un jour quelconque.

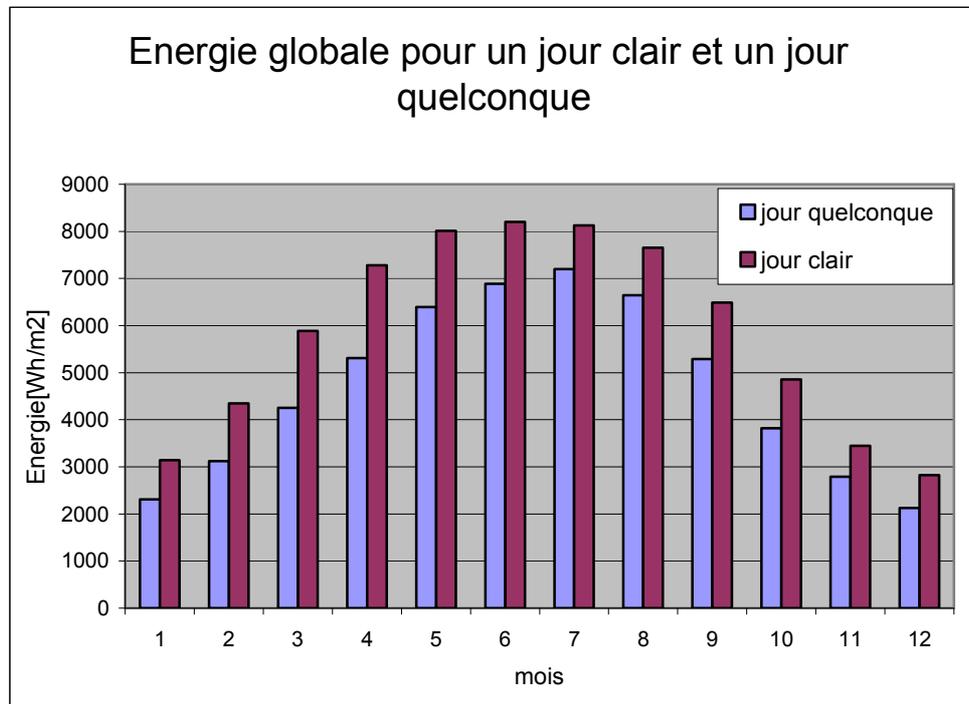


Figure (IV-15): Comparaison entre l'énergie globale moyenne reçue sur un plan horizontal pour un jour clair et pour un jour quelconque.

IV-8-1-Estimation de l'énergie solaire directe et diffus sur un plan horizontal

A partir de l'énergie solaire globale moyenne reçue au sol on peut estimer l'énergie diffusée et l'énergie directe moyenne par la relation (3,27) vue au chapitre(III):

$$D_{-} / G_{-} = a_1 \bar{\sigma} + b_1$$

Avec:

$$a_1 = -0.35$$

$$b_1 = 0.53$$

L'énergie directe est obtenue par la soustraction de l'énergie diffusée de l'énergie globale

$$S_{-} = G_{-} - D_{-}$$

On obtient le tableau [IV-4) suivant :

Mois	S_{-} [Wh/m ²]	D_{-} [Wh/m ²]	$\overline{G_{-}}$ [Wh/m ²]
Jan	1765	885	2650
Fév	2206	1159	3365
Mar	2872	1486	4358
Avr	3527	1797	5324
Mai	4498	1887	6385
Jun	4972	1848	6820
Jull	5304	1703	7007
Aout	4736	1609	6345
Sep	3607	1438	5045
Oct	2650	1149	3799
Nov	2145	870	3015
Déc	1653	790	2443

Tableau [IV-5] : Valeurs de l'énergie moyenne mensuelle globale, directe et diffusée reçue au sol sur un plan horizontal pour un jour quelconque

La figure (IV-16) représente les énergies moyennes mensuelles globales, directes et diffusées pour un plan horizontal pour un jour quelconque.

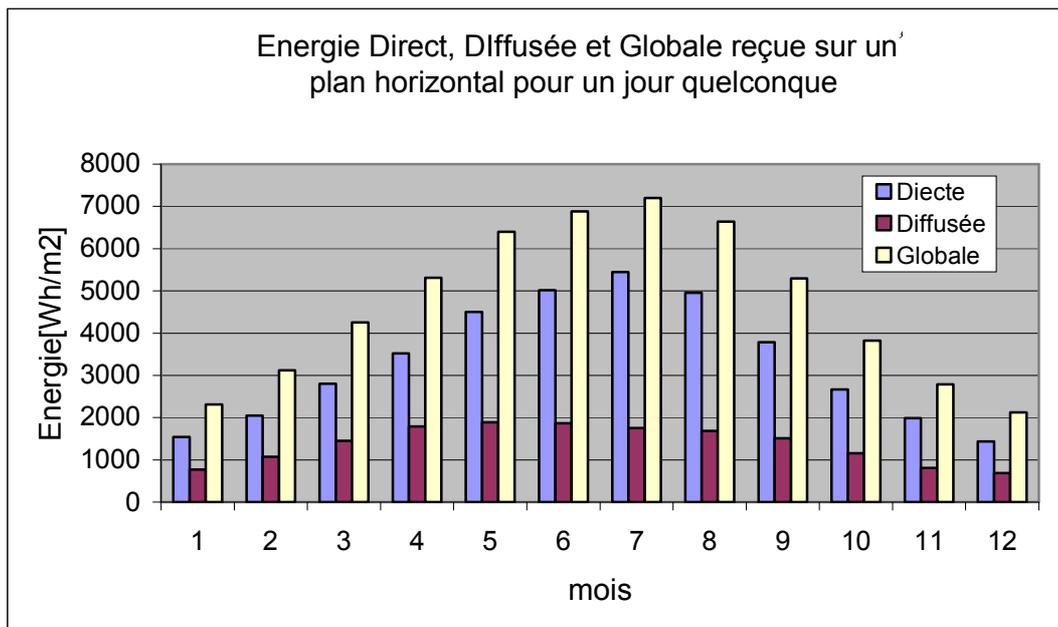


Figure (IV-16) : Energie moyenne mensuelle globale, directe et diffusée reçue au sol sur un plan horizontal

IV-9-Energie solaire globale mensuelle reçue sur un plan incliné

L'énergie solaire reçue au sol sur un plan incliné est estimée en fonction de l'énergie reçue sur un plan horizontal par le model de Liu Jordan par l'équation suivante :

$$G_{incl} = S_{-}.R_b + D_{-} \cdot (1 + \cos(\beta)) / 2 + G_{-} \cdot \rho \cdot (1 - \cos(\beta)) / 2$$

Tel que R_b c'est le facteur d'inclinaison:

$$R_b = \frac{\cos(\varphi - \beta) \cdot \cos(\delta) \cdot \sin(H_s) + H_s \cdot \sin(\varphi - \beta) \cdot \sin(\delta)}{\cos(\varphi) \cdot \cos(\delta) \cdot \sin(H_c) + H_c \cdot \sin(\varphi) \cdot \sin(\delta)}$$

Avec :

β : angle d'inclinaison

ρ : albédo du sol

H_c : angle horaire du coucher du soleil sur le plan horizontal .

$$H_c = \arccos(-\text{tg}(\varphi) \cdot \text{tg}(\delta))$$

H_s : angle horaire du coucher du soleil sur un plan incliné

$$H_s = \text{Min}[H_c, \arccos(-\text{tg}(\varphi - \beta) \cdot \text{tg}(\delta))]$$

IV-9-1-Energie solaire reçue au sol sur un plan incliné à la latitude

Les valeurs moyennes mensuelles de l'énergie globale incidente sur un plan incliné d'un angle égale à la latitude de la région de Batna sont présentées dans le tableau[IV-6] suivant :

Mois	β [degré]	G_{lat} [Wh/m ²]
Jan	35.33	4271
Fév	35.33	4653
Mar	35.33	5140
Avr	35.33	5382
Mai	35.33	5776
Jun	35.33	5843
Jull	35.33	6132
Aout	35.33	6139
Sep	35.33	5659
Oct	35.33	5069
Nov	35.33	4794
Déc	35.33	4150

Tableau [IV-6] : Valeurs moyennes mensuelles de l'énergie globale incidente sur un plan incliné d'un angle égale à la latitude

IV-9-2-Energie solaire reçue au sol sur un plan d'une inclinaison optimale

On fait varier l'angle d'inclinaison β pour le jour type du mois jusqu'à l'obtention de l'énergie maximale, ainsi on obtient l'angle d'inclinaison optimale mensuelle.

Dans le tableau [IV-7] on présente l'angle optimal pour chaque mois ainsi que l'énergie maximale correspondante.

Mois	β [degré]	\bar{G} [Wh/m ²]
Jan	63	4793
Fév	54	4892
Mar	39	5189
Avr	20	5552
Mai	4	6395
Jun	0	6820
Jull	0	7007
Aout	14	6479
Sep	31	5708
Oct	49	5249
Nov	61	5321
Déc	65	4770

Tableau [IV-7] : Valeurs de l'angle optimal pour chaque mois et l'énergie maximale correspondante.

IV-10- Comparaison des trois cas

On a tracé la variation de l'énergie moyenne mensuelle pour les trois cas d'inclinaison :

- Plan horizontal
- Plan d'inclinaison égale à la latitude
- Plan d'inclinaison optimale

On remarque selon la figure (IV-16) que pour la période d'hivers l'inclinaison optimale du plan est proche de la latitude alors que pour la période d'été le plan horizontal donne le maximum d'énergie.

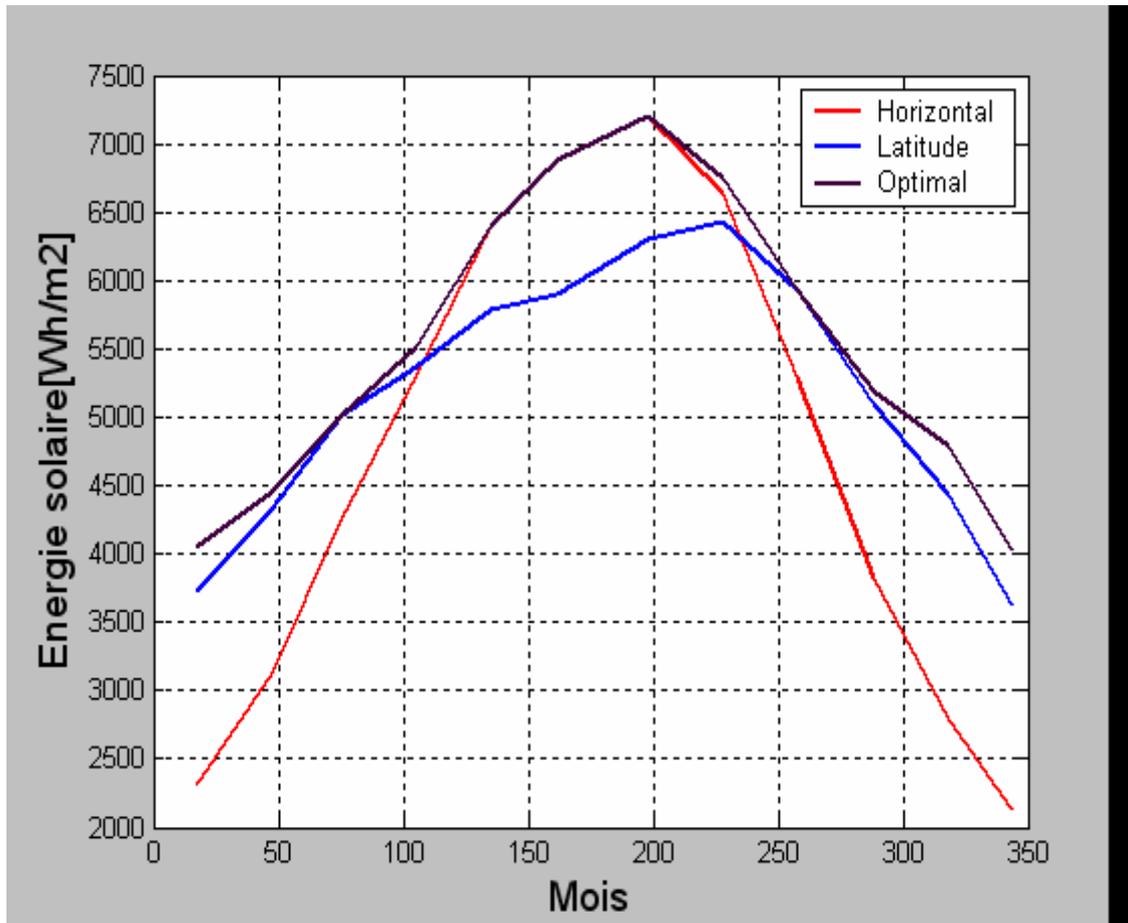


Figure (IV-17) : L'énergie moyenne mensuelle pour trois cas :
 Plan horizontal – Plan d'inclinaison égale à la latitude –
 Plan d'inclinaison optimale.

IV-11-Angle d'inclinaison optimale saisonnière

On peut en déduire l'angle d'inclinaison saisonnière de la valeur de l'inclinaison mensuelle, ce qui permet de changer l'inclinaison des panneaux quatre fois par an au lieu de les changer chaque mois.

On obtient le tableau suivant :

Saison	Mois	β (degrés)	\overline{G} [Wh/m ²]
Hivers	Déc	60.3	4609
	Jan		4657
	Fév r		4763
Printemps	Mars	21.3	4995
	Avr		5533
	Mai		6197
Eté	Jun	4.3	6779
	Jull		6986
	Aout		6411
Automne	Sep	47.3	5501
	Oct		5171
	Nov		5083

Tableau [IV-8] : Valeurs des angles moyennes d'inclinaison saisonnière et de l'énergie globale correspondante

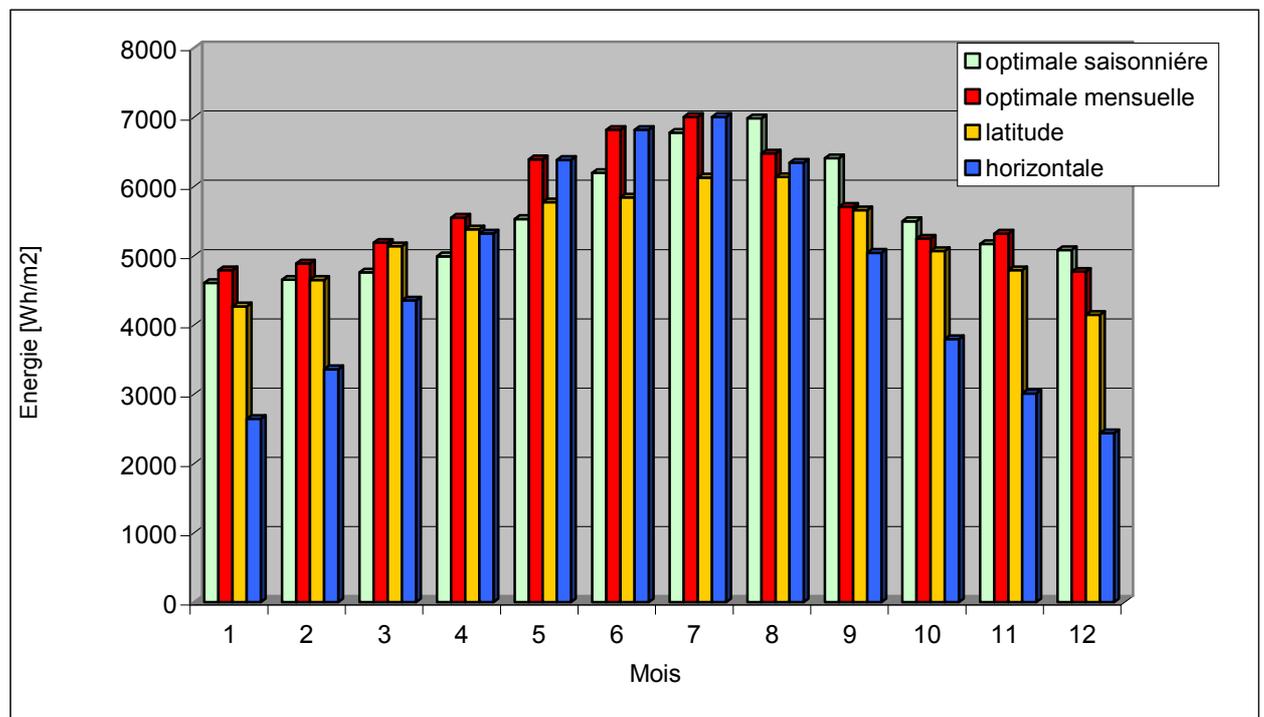


Figure (IV-18) : Variation de l'énergie moyenne mensuelle pour quatre inclinaisons.

Le tableau [IV-9] représente les valeurs des énergies annuelles obtenues pour différentes inclinaisons du plan. Ces valeurs sont plus visibles sur l'histogramme de la figure (IV-16)

Angle d'inclinaison	β =inclinaison optimale saisonnière	β =inclinaison optimale	β =latitude	β =0
Energie [kWh/m ²]	2030	2074	1917	1721

Tableau [IV-9] : Valeurs des énergies annuelles pour différentes inclinaisons du plan

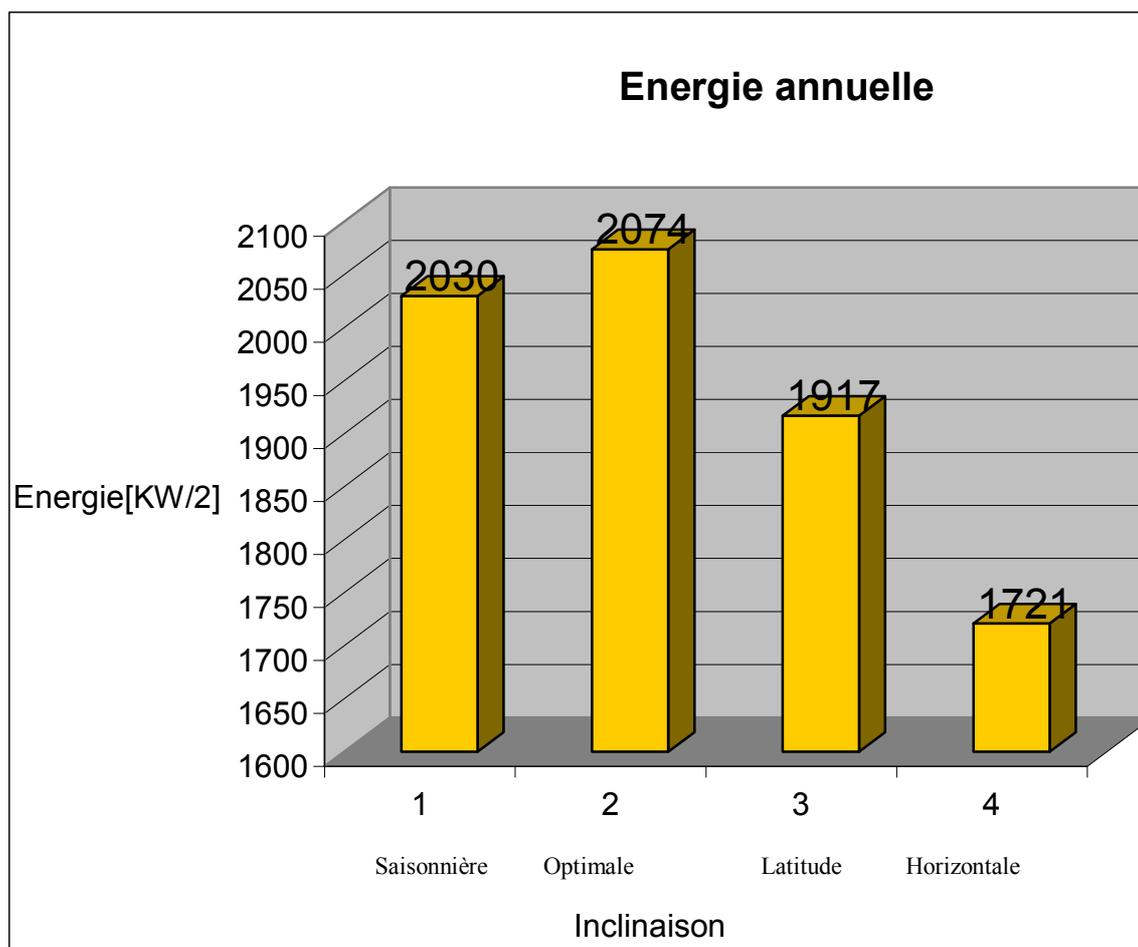


Figure (IV-19) : Valeurs des énergies annuelles pour différentes inclinaison du plan

IV-12-Optimisation de l'énergie solaire par la méthode des systèmes de poursuite du soleil

IV-12-1-Principe de la méthode

Des systèmes permettent de suivre la course du soleil au cours de la journée à fin de minimiser l'angle d'incidence des rayons solaires sur le plan récepteur. Ces systèmes sont classés selon le nombre d'axes et le type de suivi continue ou quotidienne.

IV-12-2- Poursuite continue à un seul axe

C'est un système qui se déplace sur un seul axe. Le panneau peut être fixé sur un seul angle dirigé vers le sud. Ce système à un seul axe est la solution la plus simple et la plus utilisée pour augmenter l'efficacité des panneaux.

L'angle d'incidence sera calculé à chaque instant selon l'axe de suivi.

a- Axe horizontal orienté Est-Ouest

L'angle d'incidence des rayons solaires sur le plan récepteur est donné comme suit:

$$\text{Cos}(i) = (1 - (\cos(d) \cdot \sin(H))^2)^{1/2}$$

b- Axe horizontal orienté Nord-Sud

L'angle d'incidence des rayons solaires sur le plan récepteur est donné comme suit:

$$\text{Cos}(i) = (1 - (\cos(\delta) \cdot \cos(H) \cdot \sin(\varphi) - \sin(\delta) \cdot \cos(\varphi))^2)^{1/2}$$

c- Axe vertical

L'angle d'incidence des rayons solaires sur le plan récepteur est donné comme suit:

$$\text{Cos}(i) = (1 - (\cos(\delta) \cdot \cos(H) \cdot \cos(\varphi) + \sin(\delta) \cdot \sin(\varphi))^2)^{1/2}$$

d- Axe parallèle à l'axe de rotation de la terre

Ce montage est dit montage polaire. L'angle d'incidence des rayons solaires sur le plan récepteur est donné comme suit:

$$\text{Cos}(i) = \cos(\delta)$$

IV-12-3- Poursuite quotidienne à un seul axe

Ce type de suivi nécessite un seul ajustement par jour. L'angle d'incidence des rayons solaires sur le plan récepteur est donné comme suit:

$$\cos(i) = (\cos(\delta))^2 \cdot \cos(H) + \sin(\delta)^2$$

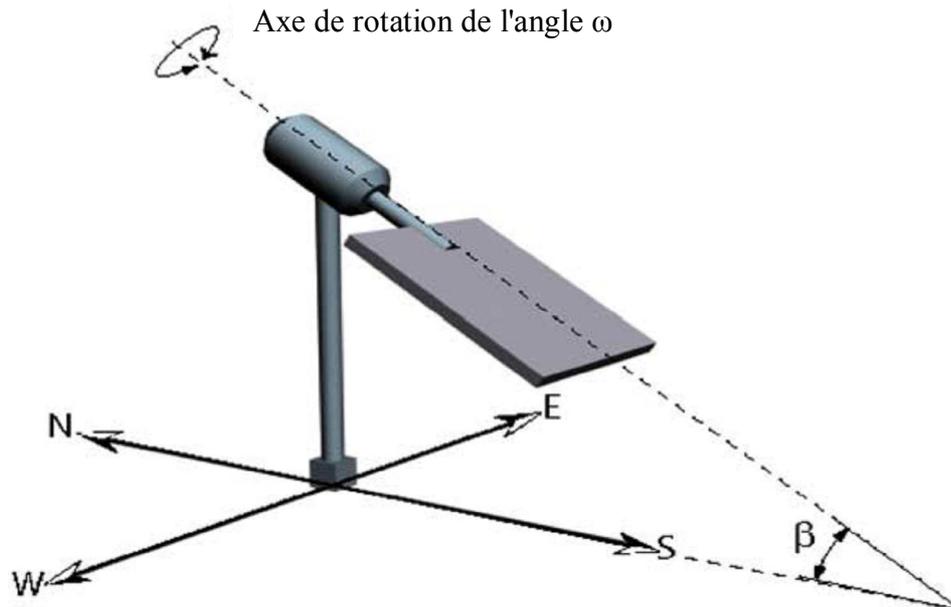


Figure (IV-20): Système de suivi à un seul axe avec l'angle d'inclinaison égale à la latitude du lieu [19] .

IV-12-4- Poursuite à deux axes

C'est un système à deux degrés de liberté assurant que l'angle d'incidence des rayons du soleil soient à 100 % normal au panneau. Ce type de système peut augmenter l'efficacité des panneaux de 30 à 40 % par rapport au système fixe.

L'angle d'incidence des rayons solaires sur le plan récepteur est donné comme suit:

$$\cos(i) = 1$$

Axe de rotation de l'angle ω

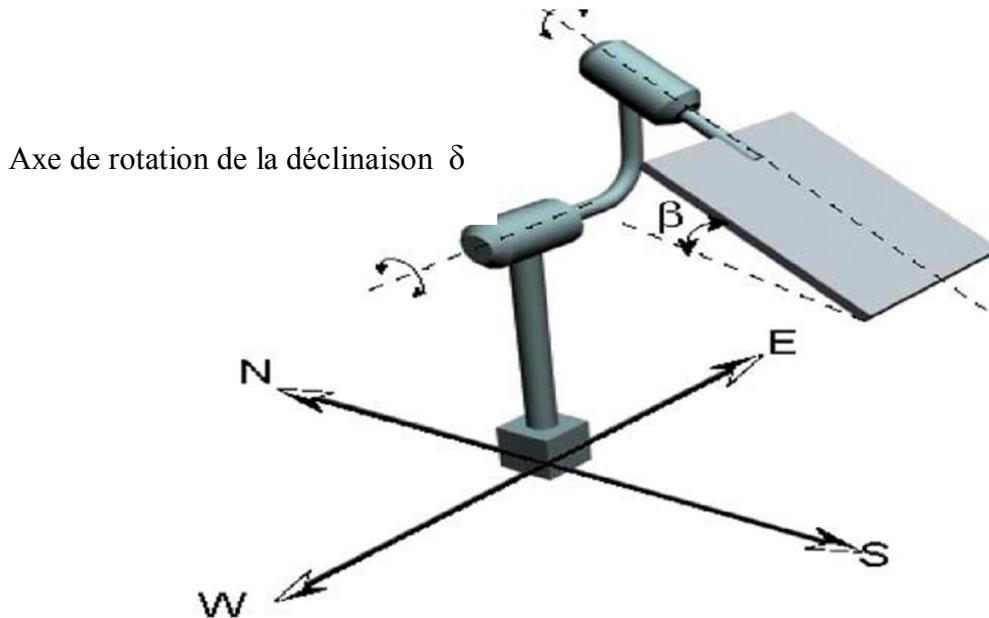


Figure (IV-21): Système de suivi à deux axes avec l'angle d'inclinaison égale à la latitude du lieu [19].

IV-13- Vérification théorique de l'amélioration du gain de l'énergie incidente sur un capteur par le système de poursuite du soleil

On a tracé la courbe de variation de la puissance instantanée sur un plan pour un système fixe et un système mobile à un seul axe et à deux axes pour la période d'Eté et la période d'Hivers et on a calculé l'énergie correspondante on a obtenu les figures (IV-22- 23) et le tableaux (IV-10-11) :

a- Période d'été

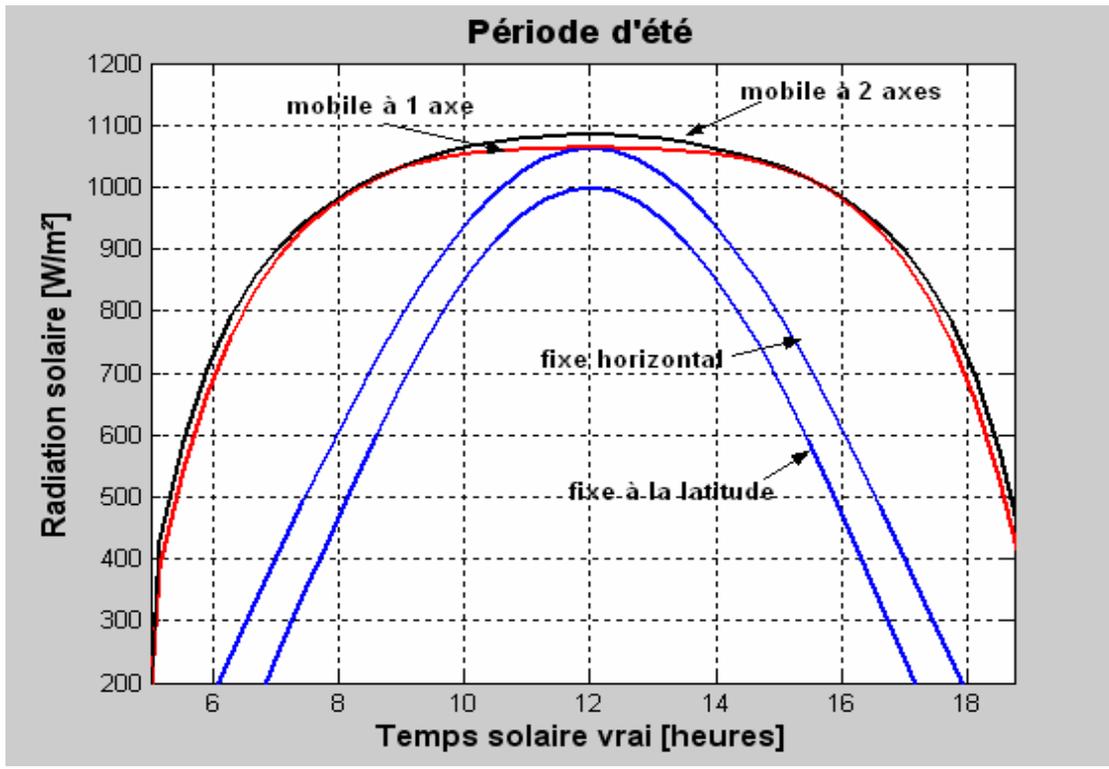


Figure (IV-22): Variation de la radiation solaire pour une journée d'Eté pour trois modes (fixe- mobile avec un seul axe –mobile avec deux axes)

Type de système	deux axes	un axe	Fixe horizontal
Energie incidente (kWh/m ²)	11.07	10.87	7.61
Gain de l'énergie incidente par rapport au système fixe horizontal (%)	45.45	42.84	

Tableau [IV-10-]: Comparaison de l'énergie incidente sur un plan fixe à l'horizontal et un plan mobile à un seul axe et à deux axes

b- Période d'hivers

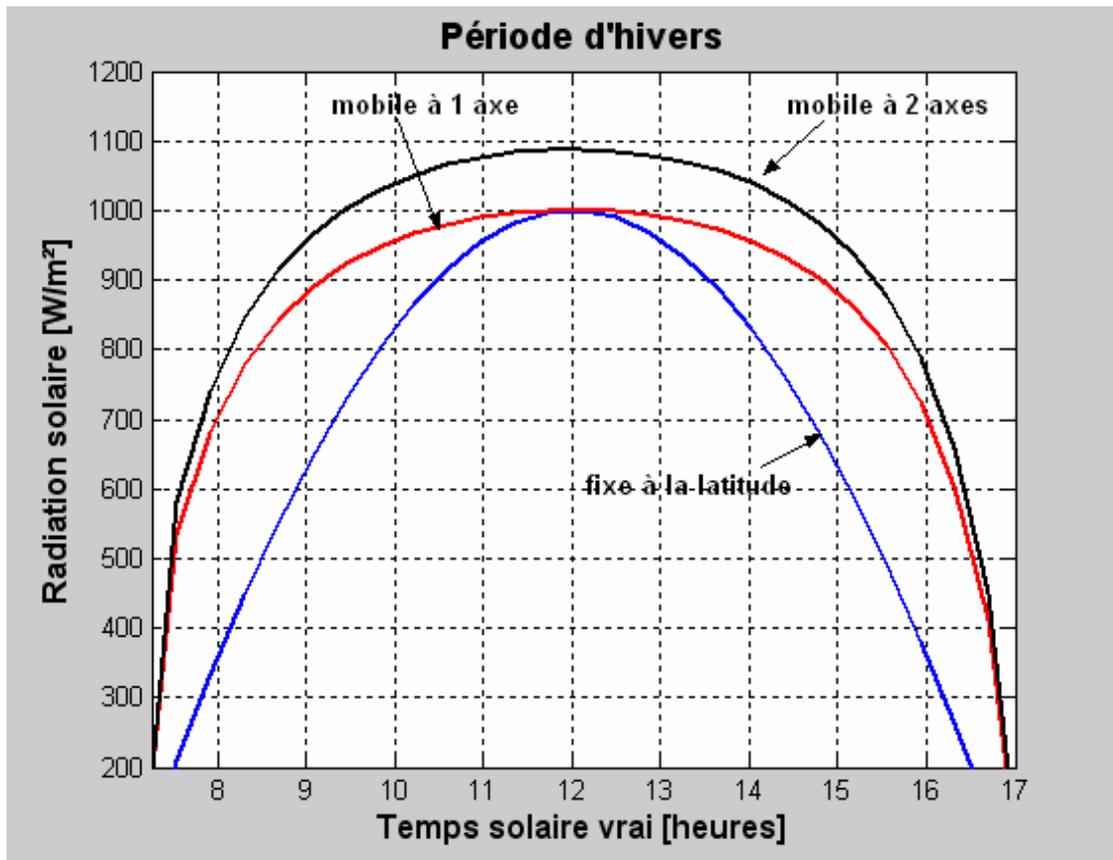


Figure (IV-23) : Variation de la radiation solaire pour une journée d'Hivers pour trois modes (fixe- mobile avec un seul axe –mobile avec deux axes)

Type de système	deux axes	un axe	Fixe à la latitude
Energie incidente	7.58	6.98	5.59
Gain d'énergie incidente par rapport au système fixé à la latitude (%)	35.60	18.39	

Tableau [IV-11]: Comparaison de l'énergie incidente sur un plan fixe à la latitude et un plan mobile à un seul axe et à deux axes

On remarque que pour la période d'été le gain d'amélioration de l'énergie incidente dépasse 40% et pour la période d'hivers il dépasse 30% pour le système à deux axes.

IV-14-Exemple de réalisation d'un système de poursuite du soleil

Un groupe de chercheurs à l'université de Batna ont conçu un système de poursuite du soleil à deux axes (vertical et horizontal) pour une station de pompage photovoltaïque. Ce groupe est dirigé par le Docteur BARKAT Belkacem [20].

Le système est constitué de deux éléments essentiels, la structure porteuse et les mécanismes de réduction. La structure porteuse est une structure métallique rigide, légère et a été dimensionnée pour supporter les panneaux solaires et en même temps résister aux différentes influences extérieures telles que la neige et les rafales de vent figure (IV-17-18).

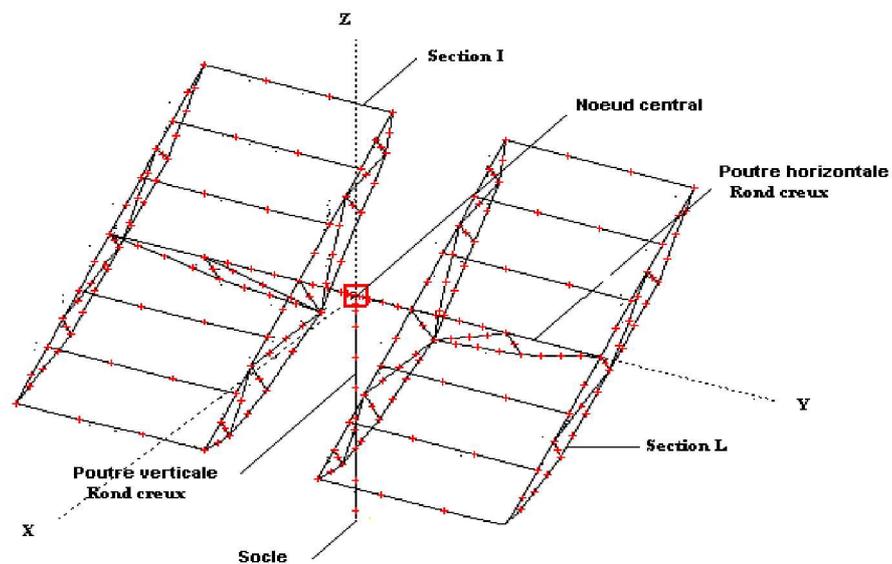


Figure (IV-24) : Structure du système de poursuite du soleil [20].



Figure (IV-25) : Vue du système dans un jour de neige [20].

Le mécanisme de réduction du mouvement vertical est un réducteur ayant un rapport de réduction de $1/26750$ figure (IV-19) et le mécanisme pour l'orientation en élévation est un vérin mécanique figure (IV-20). Ces deux mécanismes sont actionnés par des moteurs électriques de faible puissance.

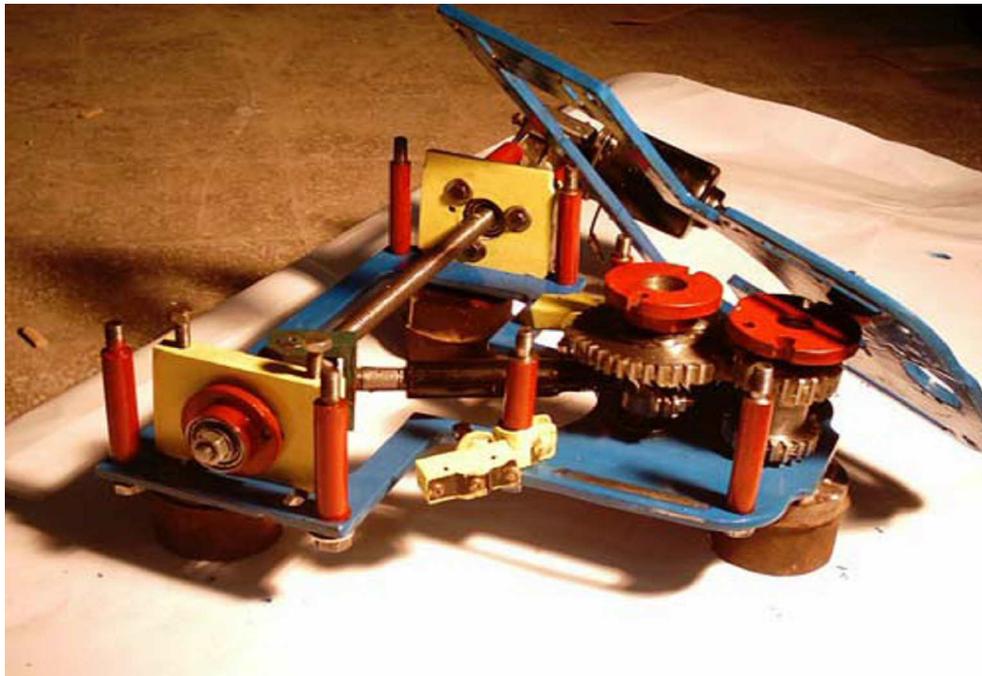


Figure (IV-26) : Mécanisme de réduction du mouvement [20].



Figure (IV-27): Mécanisme d'orientation [20].



Figure (IV-28) : Vue générale du système de poursuite du soleil [20].

IV-15- Comparaison des valeurs théoriques avec les résultats expérimentaux

Des essais ont été faits expérimentalement pour des jours d'été pour une inclinaison de 35° . Les résultats suivants ont été obtenus:

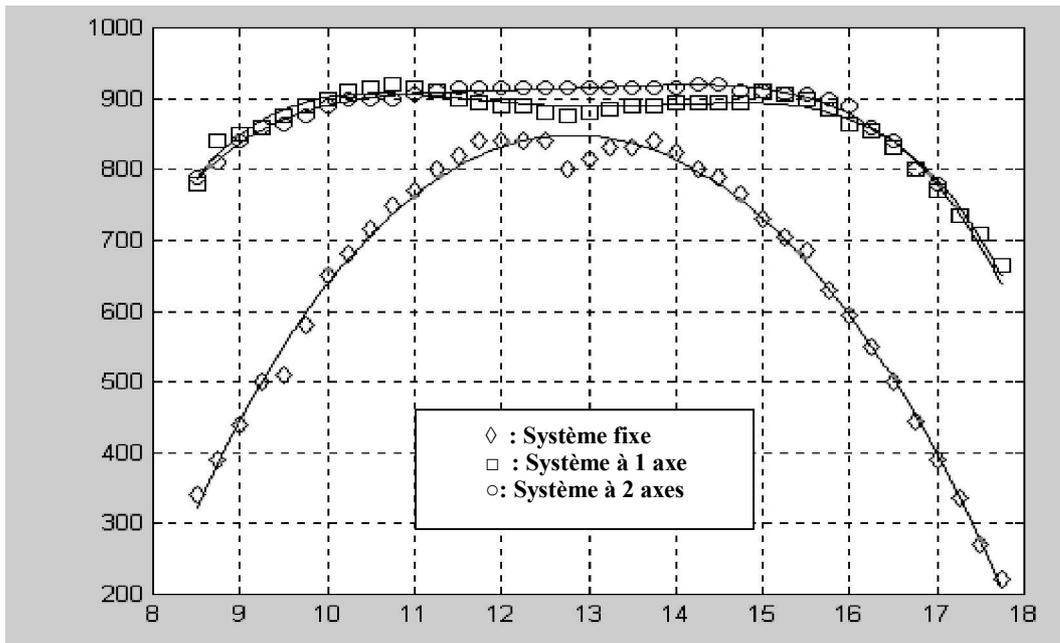


Figure (IV-29) : Variation de l'éclairage pour les trois modes [20]

Type de système	02 axes	01 axe	fixe (35°)
Energie incidente (kWh/m2)	8.098	8.035	6.099
Gain d'énergie par rapport au système fixe (%)	32.77	31.74	
Gain de pompage d'eau par rapport au système fixe (%)	27.1	24.7	

Tableau [IV-12] : Comparaison de l'énergie incidente sur un plan fixe à la latitude et un plan mobile à un seul axe et à deux axes [20].

En comparant les résultats expérimentaux avec les résultats théoriques pour la période d'été on remarque que théoriquement on obtient un gain qui dépasse 40% pour un axe ou pour deux axes par rapport au système fixe à l'horizontal. Le gain obtenu expérimentalement est de l'ordre de 31% à 32%, il est inférieur au gain théorique parce que l'inclinaison qui a été choisie n'est pas convenable pour la période d'été.

IV-16- Comparaison de l'énergie incidente annuelle pour un système fixe et un système mobile à un axe et à deux axes

On a tracé les courbes théoriques de la variation annuelle de l'énergie incidente pour un système fixe et un système mobile à un seul axe et à deux axes. On remarque bien l'amélioration qu'apporte le système mobile par rapport au système fixe figure (IV-30). Les résultats sont bien clairs sur l'histogramme de la figure (IV-31).

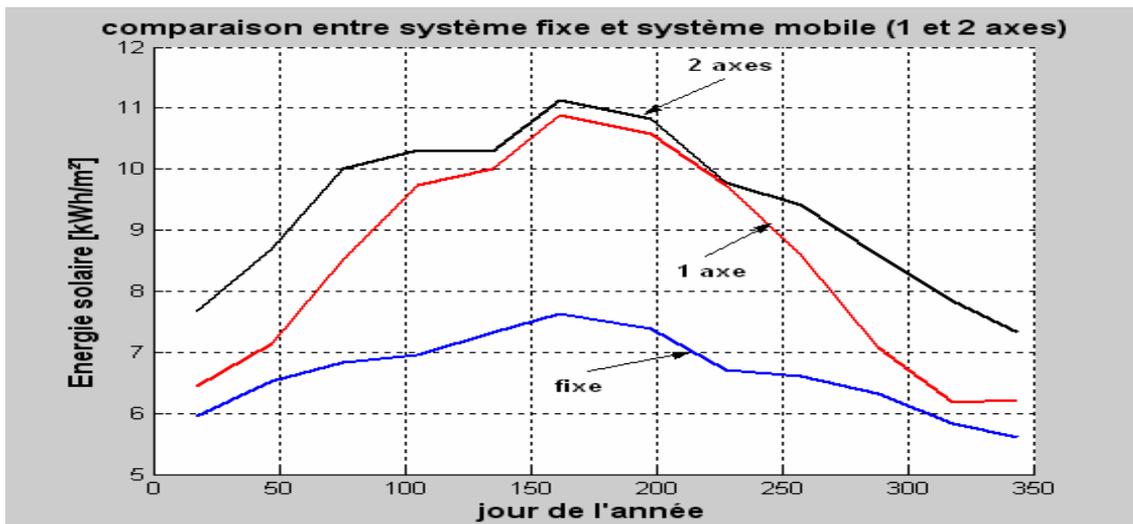


Figure (IV-30): Variation annuelle de l'énergie incidente pour un système fixe et un système mobile à un seul axe et à deux axes

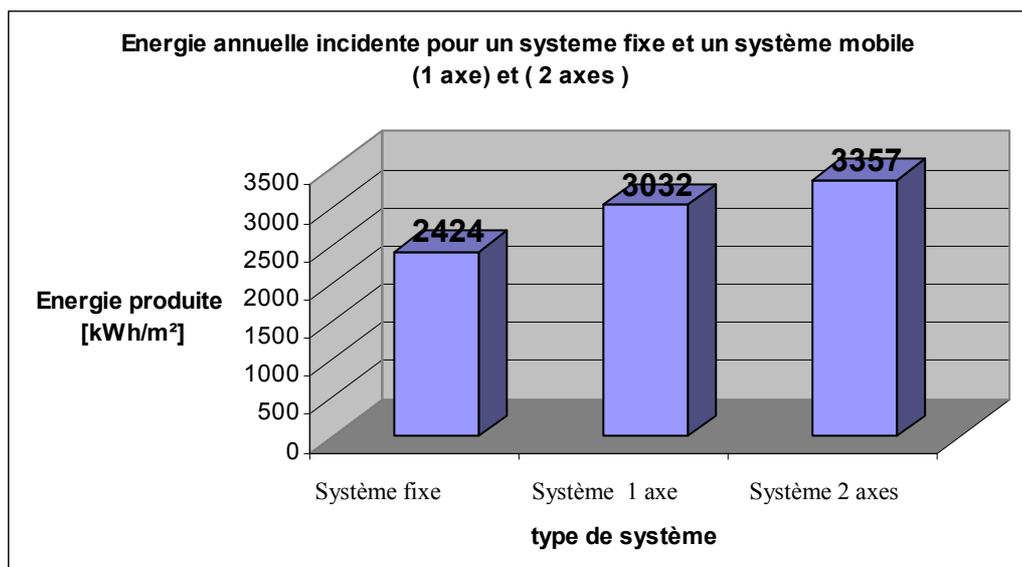


Figure (IV-31): Energie annuelle incidente pour un système fixe et un système mobile (1 axe) et (2 axes)

On a calculé le pourcentage d'amélioration de l'énergie incidente d'un système mobile par rapport au système fixe. On a comparé les résultats obtenus pour le système à deux axes avec les résultats de la ville d'Albuquerque (New México) (35.16°) qui est presque à la même latitude que la ville de Batna (35.33°), on remarque que les gains sont presque les mêmes , tableau[IV-13].

<i>Type de système</i>	<i>2 axe</i>	<i>1 axes</i>	<i>fixe</i>
<i>Energie incidente (kWh/m²) pour Batna (Algérie)</i>	3357	3032	2424
<i>Gain de l'énergie en pourcentage par rapport au système fixe [%]</i>	38.5	25	
<i>Energie incidente (kWh/m²) pour Albuquerque (New México)[5]</i>	3500		2500
<i>Gain de l'énergie en pourcentage par rapport au système fixe [%]</i>	40		

Tableau[IV-13] Comparaison de l'énergie annuelle incidente pour un système fixe et un système mobile (1 axe) et (2 axes).

Le rendement du système de poursuite dépend énormément du climat et de l'application. Dans les régions très brumeuses ou nuageuses, les suiveurs ne serviront pas à grand-chose puisque la lumière est disséminée. Ce sera également le cas pour des applications où la consommation est la même tous les mois, parce qu'ils n'améliorent pas beaucoup le rendement du système dans les pires conditions (en hiver généralement). Dans des conditions idéales, les systèmes de poursuite permettent d'améliorer la production photovoltaïque d'un maximum de 40% par jour mais ils rendent le système plus complexe et plus cher et ne sont généralement pas aussi solides que des systèmes fixes. Leur emploi se limite généralement à des applications pour lesquelles l'augmentation de production correspond à une augmentation de la demande (répartition d'eau dans les points d'élevage de bétail,

par exemple) ou dans des régions plus arides où l'ensoleillement direct est élevé [21].

IV-17- Conclusion

L'application des formules du rayonnement solaire pour la région de Batna donne de bons résultats en comparaison avec les valeurs expérimentales. L'utilisation des formules simplifiées permet l'estimation rapide de la puissance incidente et de l'énergie journalière et mensuelle. La détermination de l'angle d'inclinaison optimal est très importante pour pouvoir obtenir le maximum d'énergie. On constate d'après le calcul de l'énergie globale qu'on peut utiliser un angle optimal mensuel ou bien plus facilement un angle saisonnier et cela en changeant l'inclinaison des plans récepteurs du rayonnement solaire quatre fois par an. Une autre méthode qui permet d'obtenir le maximum d'énergie c'est la méthode du système de poursuite du soleil qui est très efficace surtout dans des conditions idéales dépendant du climat.

Conclusion Générale

Dans ce travail on a essayé d'étudier le rayonnement solaire avec ses deux aspects géométrique et énergétique. L'aspect géométrique concerne les mouvements de la terre; le mouvement de la rotation autour de l'axe des pôles et le mouvement de translation autour du soleil. Ces deux mouvements qui permettent à la terre de recevoir continuellement de l'énergie solaire à chaque point tout au long de l'année. Cette énergie est variable au cours de la journée et au cours de l'année, elle est influencé par la position du soleil dans le ciel qui varie le long de la journée du lever au coucher du soleil et durant l'année selon les saisons. L'énergie solaire est influencé aussi par l'atmosphère terrestre car en pénétrant dans celle-ci le rayonnement solaire subit des atténuations par effet d'absorption et diffusion causé par les composants de l'atmosphère.

L'étude de l'aspect énergétique du rayonnement solaire est caractérisé par la modélisation du flux solaire incident basé sur les modèles semi-empiriques de Perrin de Brichambaut et de Liu-Jordan. A travers ces modèles en utilisant le logiciel Matlab on a pu estimer l'énergie solaire rayonnante pour une journée précise de l'année et pour des conditions climatiques.

Une partie de ce travail a été consacrée pour l'application des modèles du rayonnement solaire pour la région de Batna (35.33°N , 6.11°E). L'évolution du rayonnement global sur un plan horizontal et incliné a été représentée pour des journées types de l'année, on a essayé d'identifier l'angle d'inclinaison optimale mensuelle et saisonnière qui permet d'obtenir le maximum d'énergie pour cette région. Une idée est donnée sur l'utilisation des systèmes de poursuite qui permettent l'amélioration de la production des installations solaires jusqu'à 40% par rapport aux installations fixes, avec la présentation d'un exemple de réalisation de système de poursuite qui a été faite par un groupe de chercheurs au site Auresolaire situé à l'université Alhaj Lakhdar à Batna.

On a constaté d'après l'application faite pour le site de Batna que cette région dispose d'un gisement solaire important. La durée d'insolation dépasse 2000 heures annuellement. L'énergie acquise quotidiennement sur une surface horizontale de 1 m² peut dépasser 7 kWh/m² dans la période d'été et annuellement elle est de l'ordre de 1780 kWh/m² pour un plan horizontal et peut dépasser 2000kWh/m² pour une inclinaison optimale mensuelle ou saisonnière.

Ces résultats montre que la région de Batna dispose d'un climat très favorable à l'utilisation de l'énergie solaire et cela peut encourager l'exploitation de cette énergie surtout dans les régions isolées de la ville qui ne sont pas atteints par le réseau électrique ou celle où la charge est très grande ce qui provoque les coupures d'électricité.

REFERENCES

- [1] V. Daniel, 2003, Le rayonnement thermique , bilan radiatif et effet de serre » en ligne sur le site ENS-DEGESCO planet-terre :
<http://planet-terre.ens-lyon.fr>
- [2] Rayonnement , www.pameseb.be/rayon.html
- [3] Michel Capderou , Atlas solaire de l'Algérie, tome 1,2 ;O.P.U. 1986.
- [4] Définition ; Les coordonnées horizontale.
- [5] MR Maouedj Rachid, Application de l'énergie photovoltaïque au pompage hydraulique sur les sites de Tlemcen et de Bouzareah , Mémoire de magister, Université Abou Bekr Belkaïd Faculté des Sciences Département de physique 2005.
- [6] Introduction to solar energie : [http:// www.Newport cooperation. Com/ Introduction-ac-rayonnement-solaire/ 411919/1036/ catalog.aspx](http://www.Newport.cooperation.Com/Introduction-ac-rayonnement-solaire/411919/1036/catalog.aspx)
- [7] Energie solaire photovoltaïque Semaine 08
www.lei.ucl.ac.be/~matagne/SOLAIRE/SEM08/S08P10.HTM - 14k -
- [8] Coordonnées célestes: [sciences- physiques.ac-dijon.fr /astronomie/ lexique_ astronomique /lexique_ astro/c/coordonnees_ celestes.htm](http://sciences-physiques.ac-dijon.fr/astronomie/lexique_astronomique/lexique_astro/c/coordonnees_celestes.htm)1 - s
- [9] Mr Bouna Ould Zeidane, Contribution to the study of the Grid Connected Photovoltaïque System, Mémoire de magister. 2006.
- [10] Newport Corporation | Sources lumineuses | Simulateurs-solaires
[http:// www.Newport cooperation. Com/Introduction -ac-rayonnement-solaire/ 411919/1036/ catalog.aspx](http://www.Newport.cooperation.Com/Introduction-ac-rayonnement-solaire/411919/1036/catalog.aspx)
- [11] G. Vidal, « La structure de l'atmosphère »
en ligne sur le site ENS-DEGESCO planet-terre:<http://planet-terre.ens-lyon.fr/planetterre/XML/db/planetterre/metadata/LOM-structure-mosphere.xml>
- [12] L'absorption de l'énergie solaire par l'atmosphère et le sol
lamap.inrp.fr/?Page_Id=16&Element_Id=528&DomainScienceType_Id=5
- [13] Tom Markvart and Luis Castafier, Practical Handbook of Photovoltaics: Fundamentals and Applications. ELSEVIER
- [14] fr.wikipedia.org/wiki/Albedo30 - k

- [15] Anne Labouret – Michel Viloz , "Energie solaire photovoltaïque , le manuel du professionnel".
- [16] Hamani Nadjet ;Mémoire de magister «Modélisation du flux solaire incident et de la température de sortie dans un capteur solaire à eau avec effet de concentration du rayonnement solaire incident» (2005).
Université Mohamed Khider-Biskra Faculté des Sciences et Sciences de l'Ingénieur .Département de Physique
- [17] Sommaire*Introduction*Historique*La photométrie
www.chez.com/rpauchet/lapageTIPE/TIPEkevin/TIPEsolaire/tipe.htm
- [18] Site Auresolar université Elhaj Lakhdar Batna
www1.univ-batna.dz/labolrb/CUVTBarkat.pdf
- [19] Mohanad Alata *, M.A. Al-Nimr, Yousef Qaroush "Developing a multipurpose sun tracking system using fuzzy control" Department of Mechanical Engineering, Jordan University of Science and Technology (JUST),PO Box3030, Irbid 22110, Jordan
- [20] Barkat B. , Azoui B., Chara K, Bouali A, Achour M.R. et Achi K.
Expérimentation du système de poursuite solaire "AURESOLAR"2001 : Identification énergétique et tests de pompage. Université de Batna- Faculté des Sciences de l'ingénieur
- [21] Tout ce que vous avez toujours voulu savoir sur l'énergie solaire.
www.ecosolaire.com/faq.aspx-
- [22] Mouvement de la terre: www.astro-rennes.com/initiation / rotation_ revolution.php
www.astrosurf. com/orion/France/Astro_ Encyclopedie/definition.htm
- [23] rapport complet- Version HTML.
www-loa.univ-lille1.fr/Aerosols/publications/rapport_cedric.pdf
- [24] Pierre Bessemoulin(1) et Jean Oliviéri(2),Le rayonnement solaire et sa composante ultraviolette www.netport.com/Introduction-au-rayonnement-solaire/411919/1036/catalog.aspx
- [25] M. Salmi, M. Chegaaret P. Mialhe « Modeles d'estimation de 'irradiation

- Solaire globale sur une surface horizontale au sol » Revue internationale d'électrotechnique Energie-Environnement-No 35 (2007) 19-24
<http://www.comples.org>
- [26] Bernard LACHAL « Potentialités et limites de l'énergie solaire pour un développement durable» www.unige.ch/sebes/textes/1995/95BLpost_sol.html.
- [27] A.Moummi, N.Hanan, N.Moummi et Z.Mokhtari «Estimation du rayonnement Solaire par deux approches semi empiriques dans le site de Biskra » C.U.BECHAR, ALGERIE-SIPE8 (2006).
www.univ-bechar.dz/sipe8/Documents/Moummi.pdf -
- [28] B.E. Western, The estimation of solar radiation in new Zeland, Paramata, Wellington 6250, New Zealand.
- [29] Bulletin N°2 Décembre 2002. Evaluation du potentiel énergétique solaire. Equipe de Recherche : A.Mefti Chargé de Recherche.
www.cder.dz/?rub=bulletin&srub=bull2&pag=page12 - 20k
- [30] B.E.Western .Parameta, Wellington 6250,New Zealand « Estimate of solar radiation in new Zealand ».
- [31] P. C. Jain (Italy),Solar Energy, 1990 « A model for diffus and global irradiation on horizontal surface ».
- [32] Calcul énergie solaire, thermique, radiation, rayonnement, vitrages ...
www.thermexcel.com/french/program/bilanth1.htm
- [33] Production d'énergie électrique : Energie solaire photovoltaïque
www.iufmrese.cict.fr/catalogue/2006/Toulouse/PV/A_-_Introduction_PV/Energie_solaire_photovoltaique.pdf
- [34] F Ahmad, I Ulfat - Turk J Phys, 2004 - journals.tubitak.gov.t, Ampirical Models for the Correlation of Monthly Average Daily GlobalSolar Radiation with Hours of Sunshine on Horizontal Surface at Karachi; Pakistan
- [35] Nombre d'air masse :www.chez.com/rpauchet/lapageTIPE/TIPEkevin

