

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université d'Adrar
Faculté des sciences et de la technologie
Département des sciences de la matière



Mémoire de Fin d'Etudes en vue de l'Obtention du Diplôme de
Master en Physique Energétique

Thème

Modélisation et analyse du rayonnement solaire sur un
plan incliné sur site d'Adrar

Soutenu le:11/12/2013

Présenté par :

BEKRAOUI Keltoum
AZIZI Zeyneb

Membres de jury :

Président :

Mr. OMMARI BOUMEDIAN

Encadré par :

Mr. KHELIFI CHERIF

Examineurs

Mr. MEDIANI AHMED

Remerciements

Nous remercions avant tout Dieu tout puissant de nous avoir donné le courage et la patience qui nous ont permis d'accomplir ce petit et modeste travail.

Nous tenons en premier lieu à remercier Mr. HAMOUDA Messaoud Directeur d'URERMS d'Adrar.

Nous tenons aussi à remercier profondément notre promoteur du mémoire Mr. KHELIFI Cherif pour tous le temps et les efforts qu'il nous a consacré, pour son aide et pour ses orientations pendant la réalisation de ce travail.

Nous tenons également à remercier les membres du jury qui ont pris sur leur temps et aménager leur volonté pour examiner et porter une analyse critique sur notre travail.

Mes sincères remerciements s'adressent à Mr. KOUHILI, Mr. OMMARI, Mr. BOUSSAKAIA et à tous les enseignants de faculté des Sciences et de la Technologie.

Nous remercions particulièrement tous nos amis surtout MOUSSAOUI et BENRAMDAN.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à :

Mes très chers parents

Mes très chères sœurs

Mon très cher frère

Tous mes amis (es) et collègues

keloum

Dédicaces

Je dédie ce travail:

A Ma mère ;

A Mon père ;

A mes chers frères, A mes chères sœurs

Et à toute la famille;

A tout mes voisins;

A Tous mes amis et collègues ;

A Tous ceux qui me sont chers

Zeyneb

Résumé

La connaissance de la radiation solaire sur plan incliné est cruciale pour décrire, comprendre et optimiser les performances énergétiques des systèmes de conversion de l'énergie solaire en énergie photovoltaïque ou thermique. Le modèle de Brichambaut à ciel clair utilisé dans cette approche pour caractériser le gisement solaire du site d'Adrar sur plan horizontal et incliné à la latitude du lieu d'Adrar plein sud sous estime l'irradiation solaire de 20%. L'adoption de deux orientations durant l'année hivernale et estivale permet d'augmenter l'énergie récoltée de 4% par rapport à l'orientation inclinée et de 13.25% par rapport au plan horizontal. La corrélation est acceptable si on tient compte de toutes les sources d'erreur

Mots clés: Irradiation solaire , plan horizontal et incliné, modélisation, ciel clair, optimisation

ملخص:

إن معرفة الإشعاع الشمسي على مستوى مائل هام جدا لوصف، فهم والبحث عن الخصائص الحدية للخواص الطاقوية لأجهزة تحويل الكهروحراري والكهروضوئي إن النموذج الرياضي للإشعاع لسماء صافية في هذه المقاربة من أجل تجسيد المكنم الشمسي لموقع أدرار على المستويين الأفقي والمائل على خط عرض الموقع في اتجاه الجنوب قارب وقدّر الإشعاع بنسبة خطأ تصل إلى عشرين بالمائة. كما أن استعمال ميلين للاقط الشمسي صيفي وشتوي يسمح من رفع كمية الطاقة الملتقطة حوالي 4 % بالنسبة للمستوى المائل و 13.25 % بالنسبة للمستوى الأفقي، نموذج المقاربة مقبولا إذا ما أخذ بعين الاعتبار كل مصادر الأخطاء المرتكبة.

الكلمات المفتاحية: الإشعاع الشمسي، المستوى المائل والأفقي، مقاربة رياضية، سماء صافية.

Abstract

The knowledge of solar radiation on inclined plane is crucial to describe, understand and optimize energetically behaviors of the systems transforming photovoltaic or photothermique energy. Brichambaut model is used in this work to approach solar irradiation on an horizontal an inclined area at 27.88°, south of Adrar map site, characterized by a clear sky. The approach shows that the model sub-estimates the average daily solar radiation in the year of 20%. Also, using two orientation of the collector (flat plate) in the year allowed increasing the energy captured of 4% on horizontal collector to 13.25% on inclined plate at site latitude. Therefore, the correlation is to be accepted is we take compete of all error sources.

Keywords: Solar radiation, Horizontal an inclined plate, Clear sky model.

Table de matière

Introduction générale

CHAPITRE I

01

I-1- Introduction

03

I-2- Aspect Géométrique et Energétique du Rayonnement Solaire

03

- Distance Terre-Soleil

03

- Correction de distance terre –soleil

04

- La constante solaire

05

I-2-1- Aspect géométrique du rayonnement Solaire

05

I.2.1.1 Les mouvements de la terre

05

I.2.1.2 Mouvement Apparent du Soleil

08

- La sphère céleste

09

a)- Repère géographique

09

- La latitude φ

09

- La longitude L

10

b)- Repère équatorial

10

- La déclinaison δ

10

- Angle horaire (ω)

11

c) Repère horizontal

12

- La hauteur (h)

12

- L'azimut solaire Z	12
d) Angle horaire de coucher et de lever du soleil	14
e) Orientation d'un plan	15
f) Angle d'incidence du rayonnement solaire sur un plan d'orientation quelconque	16
- Plans particuliers importants	16
g) Equation du temps	18
- Les paramètres de temps	19
I-2 - Aspect énergétique du rayonnement solaire	21
I-2-1- Concepts et définitions du rayonnement solaire	21
a) Flux énergétique	21
b) Intensité énergétique	21
c) Luminance énergétique	21
d) Luminance énergétique spectrale	21
e) Excitance énergétique	21
f) Densité spectrale	22
g) Corps noir	23
h) Effet-serre	24
I-2-2- Lois de transfert du rayonnement solaire	24
a) Loi de Planck	24
b) Loi de Lambert	25
c) Loi de Wien	25
d) Loi de Stefan-Boltzmann	26
e) Loi de Kirchhoff	26
I-3- Conclusion	26

CHAPITRE II

II- 1- Introduction	27
II-2 - Rayonnement solaire hors atmosphère	27
II-2-1- Expression de la puissance et de l'énergie du rayonnement hors atmosphère	27
- Expression de l'énergie pour le plan horizontal	28
II-2-2- Influence de l'atmosphère sur le rayonnement solaire	29
II-2-2- 1- Rôle de l'atmosphère	29
II-2-2-2- Structure de l'atmosphère	29
II-2-3- Nombre d'air-masse	30
II-2-4- Interaction du rayonnement solaire	32
II-2-4- 1- Interaction du rayonnement solaire avec l'atmosphère	32
a- Phénomène de diffusion	32
- Diffusion de Rayleigh	33
- Diffusion de Mie	33
- Diffusion non sélective	33
b- Phénomène d'absorption	33
II-2-4-2- Interaction du rayonnement solaire avec la matière	33
II-2-5- Définition d'une atmosphère de référence	34
II-2-6- Facteur de trouble total de LINKE	35
II-2-6-1- Facteur de trouble par ciel clair	35
II-2-6- 2- Facteur de trouble additionnel du à la présence de nuages	36
II-3- Rayonnement solaire au niveau du sol	36

II-3-1- Le gisement solaire en Algérie	37
- Notation	38
II-3-2- Modèles de calcul du rayonnement solaire	38
II-3-2-1- Modèle de Perrin de Brichambaut	38
a- Eclairement reçue sur un plan horizontal par ciel clair	39
b- Eclairement solaire reçue sur un plan incliné par ciel clair	39
- Diffus du ciel	39
Composante directe ou circumpolaire	39
Composante isotrope	40
Composante du cercle de l'horizon	40
- Le diffus du sol	40
Diffusion rétrodiffusée	41
II-3-2-1-1- Modèle de Perrin de Brichambaut simplifié pour la puissance du rayonnement solaire sur le plan horizontal par ciel clair	41
II-3-2-1-2- Modèle de Perrin de Brichambaut simplifié pour la puissance du rayonnement solaire sur un plan incliné par ciel clair	42
II-3-2-1-3- Estimation de l'énergie instantanée (ciel couvert)	43
II-3-2-2- Modèle de HOTTEL et LIU JORDAN	43
- Composante directe	44
- Composante diffuse	45
- Composante réfléchie	46
II-3-2-2-1- Modèle de Perrin de Liu_jordan simplifié pour la puissance du rayonnement solaire sur un plan incliné par ciel clair	46
II-3-3- La fraction d'insolation	47

II-3-4- Relations concernant les énergies	47
a- Formule de Black	48
- Indice de clarté	48
b- Formule d'Angstrom	49
c- Relation entre le diffus H_d et σ	49
II-3-5- Appareils de mesure	50
II-3-5-1- L'héliographe	50
- L'héliographe Campbell-Stokes	50
II-3-5-2- Le pyranomètre	52
II-3-5-3- Le pyréliomètre	53
II-3-5-4- L'albédomètre	53
II-3-5-5- Chaîne de mesure	53
II-4- Conclusion	55

CHAPITRE III

III- Application et vérification des modèles du rayonnement solaire	56
III-1- Introduction	56
III-2- Situation de site Adrar	56
III-3- Application des différents modèles	56
III-3-1- Durée du jour	56
III-3-2- Influence de la latitude sur la durée du jour	57
III-4- Evaluation du rayonnement solaire global extraterrestre	58
III-4-1- Irradiation solaire sur plan horizontal	58

III-4-2- Irradiation solaire sur plan incliné	58
III-5- Estimation du rayonnement solaire par ciel clair	60
III-5-1- Estimation de l'irradiation horizontale par ciel clair	60
III-5-2- Estimation de l'irradiation inclinée par ciel clair	61
III-6- Conclusion	69
III-7- Perspectives	69
IV- Conclusion générale	70
V- Bibliographie	71
VI- Glossaire	74

Liste des figures

Figure (I-1) : Variation de distance terre –soleil en fonction du jour de l'année	04
Figure (I-2) : Variation de Correction de distance terre –soleil en fonction du jour de l'année	04
Figure (I-3) : Variation de constante solaire en fonction du jour de l'année	05
Figure (I-4) : Rapports géométriques : terre-soleil	07
Figure (I-5) : Mouvement de la terre autour du soleil	07
Figure (I-6) : Angle d'inclinaison de l'axe de la terre	08
Figure (I-7) : Mouvement apparent du Soleil observé d'un point de latitude L	08
Figure (I-8) : La sphère céleste	09
Figure (I-9) : Les coordonnées géographique	10
Figure (I-10) : Variation de la déclinaison en fonction du jour de l'année	11
Figure (I-11) : Les coordonnées horaires	11
Figure (I-12) : les coordonnées horizontales	13
Figure (I-13) : Variation de l'hauteur du soleil en fonction de l'azimut	13
Figure (I-14) : Variation de l'hauteur du soleil en fonction du jour de l'année	14
Figure (I-15) : Variation de lever et coucher du soleil en fonction du jour de l'année	15
Figure (I-16) : Variation de l'angle d'incidence et l'hauteur du soleil en fonction du Temps	18
Figure (I-17) : Variation de l'équation de temps en fonction du jour de l'année	19
Figure (I- 18) : Distribution spectrale du rayonnement solaire	22
Figure (I- 19) : Raies d'absorptions	23
Figure (I- 20) : Rayonnement du corps noir pour différentes températures	23
Figure (I- 21) : L'effet de serre	24
Figure (I-22): La loi Cosinus de Lambert indique dans quelle mesure l'intensité (I) dépend de l'angle	25
Figure (II-1) : La structure de l'atmosphère	30
Figure (II-2) : Définition de l'air masse	31
Figure (II-3): Normes de mesures du spectre d'énergie lumineuse émis par le soleil, notion de la convention AM	32
Figure (II-4) : Composantes du rayonnement solaire au niveau du sol	37
Figure (II-5) : Carte du monde de l'enseleillent moyen annuel	37

Figure (II-6) : Moyenne annuelle de l'irradiation solaire globale reçue sur un plan incliné à la latitude du lieu	38
Figure (II- 7) : Les composantes du rayonnement solaire reçues par un plan incliné	42
Figure (II-8): Eclaircissement solaire direct sur plans horizontal et incliné	44
Figure (II-9):Indice de clarté du site d'Adrar	49
Figure(II-10) :Héliographe de Campbell-Stokes	51
Figure (II- 11-a) : L'une des deux faces de la bande de papier où apparaissent les graduations en heures	51
Figure (II- 11-b) : L'autre face de la bande de papier où apparaissent la période et la situation géographique du lieu de	51
Figure (II-12-a) : Un pyranomètre pour la mesure du rayonnement solaire global	52
Figure (II-12 -b) : Un pyranomètre bande pare-soleil pour la mesure du rayonnement solaire diffus, où l'ombre de la bande apparait sur la demi-sphère de l'instrument	52
Figure (II-13) : Un pyréliomètre pour la mesure du rayonnement solaire direct	53
Figure (II-14) : Un L'albédomètre pour la mesure du l'albédo	54
Figure (II-15) : Chaine de mesure	54
Figure (III-1) : Variation de la durée du jour en fonction du rang du jour dans l'année	57
Figure (III-2) : Variation de la durée du jour durant l' année pour différentes	57
Figure (III-3) : Comparaison du rayonnement extraterrestre sur un plan horizontal et sur un plan incliné à latitude du site d'Adrar	58
Figure (III-4) : la maximisation du rayonnent extraterrestre avec l'utilisation des deux plans	59
Figure (III-5) : Indice de clarté du site d'Adrar	60
Figure (III-6) : Composantes des irradiations solaires horizontales par ciel clair site d'Adrar, (H global, H_s direct et H_d diffus)	61
Figure (III-7): Irradiations inclinée à la latitude du lieu plein sud par ciel clair site d'Adrar, (H_i global, H_{si} direct et H_{di} diffus)	62
Figure (III-8) : Comparaison des irradiations solaires par ciel clair horizontale et inclinée à plein sud à la latitude du site d'Adrar (H global horizontale, H_i globale inclinée)	62
Figure (III-9) : Maximisation du rayonnent global avec l'utilisation des deux orientations	63
Figure (III-10): Comparaison des irradiations globales horizontales à ciel clair sur site d'Adrar mesurées et estimées	64
Figure (III-11): Précision du modèle de prédiction de l'irradiation à ciel clair	64

Figure (III-12) : Irradiations globales horizontales par tranche horaire à la latitude du lieu d'Adrar aux équinoxes et aux solstices	66
Tableau (III-13) : Irradiations globales inclinée à la latitude du lieu plein sud d'Adrar par tranche horaire (tsv) aux équinoxes et aux solstices	66
Tableau (III-14) : Irradiations globales moyennes annuelles par tranches horaires	67
Figure (III-15) : Irradiations horaires par tranche horaire annuelle sur plan horizontal	67
Figure (III-16) : Irradiations horaires par tranche horaire annuelle inclinées à la latitude du lieu plein sud sur site d'Adrar	67
Figure (III-17): Corrélation des irradiations journalières par tranches horaires sur plan incliné à la latitude du site d'Adrar	68

Liste des tableaux

Tableau (II-1): valeurs des constantes A, B et C	41
Tableau (II-2) : valeurs des coefficients A, B, C, A" et B"	43
Tableau (II-3) : valeurs des coefficients A, B et C	47
Tableau (III-1): Irradiations globales par tranches horaires	65

Introduction générale

Introduction Générale

L'énergie a toujours constitué un enjeu vital pour l'homme et les sociétés humaines. 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... et la croissance économique rapide dans le monde rendent urgentes l'utilisation et le développement des énergies renouvelables.

Le rayonnement solaire est à l'origine de plus de 90% de l'énergie consommée, il constitue la ressource énergétique la mieux partagée sur la terre et la plus abondante. L'énergie solaire peut se transformer en chaleur, en électricité ou en une forme d'énergie plus facilement stockable (électrochimie, chaleur, hauteur d'eau, pile à combustible, huiles, 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 du lieu géographique. 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 photothermiques ou photovoltaïques.

Le manque des moyens de mesure et la non disponibilité des stations météorologiques à grande échelle, représentent des difficultés qui ont obligé les chercheurs à penser à une mise au point de modèles mathématiques 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. [1, 2]
La région d'Adrar (27.88° N, 0.18° E, 264 m d'altitude) en Algérie dispose d'un climat très favorable à l'utilisation de l'énergie solaire à outrance.

L'objectif de ce travail est d'étudier les potentiels du rayonnement solaire sur site d'Adrar à travers un modèle à ciel clair permettant de calculer les composantes du rayonnement solaire d'une manière rapide, efficace et pratique.

Dans le premier chapitre traite les grandeurs astronomiques et énergétiques intervenant dans le calcul du rayonnement solaire reçu sur le site de l'étude.

Introduction Générale

Le deuxième chapitre présente des modèles pour faire la modélisation de l'énergie solaire reçue sur un capteur inclinée d'une inclinaison égale à la latitude du lieu.

Le troisième chapitre est consacré à l'application du modèle de rayonnement solaire à ciel clair choisi en fonction des spécificités de la région d'Adrar en utilisant le logiciel Matlab. Les valeurs théoriques sont confrontées aux résultats expérimentaux pour une base de données d'une année.

Enfin, le mémoire se termine par une synthèse des résultats obtenus pour la région d'Adrar et les perspectives de développement dans le proche avenir.

Chapitre I

Généralité sur le Rayonnement Solaire

I-1- Introduction :

Ce chapitre, décrit l'aspect énergétique et géométrique du rayonnement solaire hors atmosphère, et en atmosphère au niveau des surfaces de collecte au sol. Ainsi, la nature et le mode de transfert du rayonnement électromagnétique sont détaillés.

I-2- Aspect Géométrique et Energétique du Rayonnement Solaire :

L'énergie peut se transmettre d'un corps à un autre par propagation des ondes électromagnétiques, en présence ou non d'un milieu matériel. L'énergie rayonnante est appelée rayonnement électromagnétique. Ce rayonnement se propage en lignes droites à une vitesse constante dans le vide égale à 299792.5 km/s. Le spectre électromagnétique comprend entre autre les rayonnements : radio, infra-rouge, visible, ultra-violet, X et gamma. Ce rayonnement peut être considéré soit par sa longueur d'onde λ , soit par sa fréquence ν . Son énergie est donnée en fonction de la fréquence. [3]

$$E = h\nu \quad (\text{I-1})$$

$$h = 6.626 \times 10^{-34} \text{ J.s} \quad (\text{Constante de Planck})$$

$$\text{Où : } \nu = \frac{c}{\lambda}$$

Avec :

c : vitesse de la lumière, λ : longueur d'onde

- Distance Terre-Soleil :

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

$$d(n) = 1 - 0.017 \cos\left(\frac{360}{365} \times (n - 2)\right) \quad (\text{I-2})$$

Avec:

n : le numéro du jour de l'année compté à partir du 1er janvier. [1]

La variation de la distance terre –soleil en fonction du jour de l'année est représentée par la figure (I-1) :

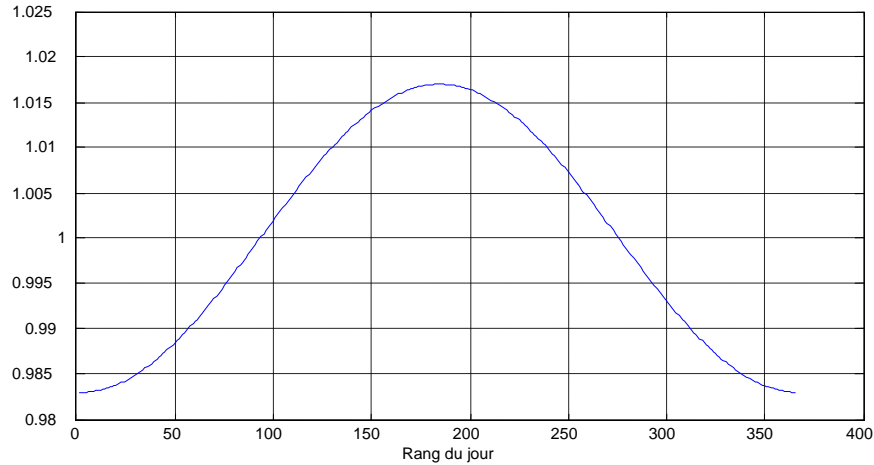


Figure (I-1) : Variation de distance terre –soleil en fonction du jour de l'année

- **Correction de distance terre –soleil : C_{t-s}**

C_{t-s} est le facteur par lequel il faut multiplier la constante solaire pour trouver la densité de flux extraterrestre (le flux à travers une surface normale aux rayons à la limite supérieure de l’atmosphère). [4]

$$C_{t-s} = 1 - \frac{\sin^2(\delta)}{11.5} \tag{I-3}$$

Avec: δ déclinaison.

La formule (I-3) est équivalente à :

$$C_{t-s} = 1.000129 + 0.03337 \cos\left[\frac{360 \times n}{365.24} - 0.0486\right] + 0.000711 \sin\left[\frac{2 \times 360 \times n}{365.24} + 1.48\right] \tag{I-4}$$

La variation de correction distance terre –soleil en fonction du jour de l'année est représentée par la figure (I-2) :

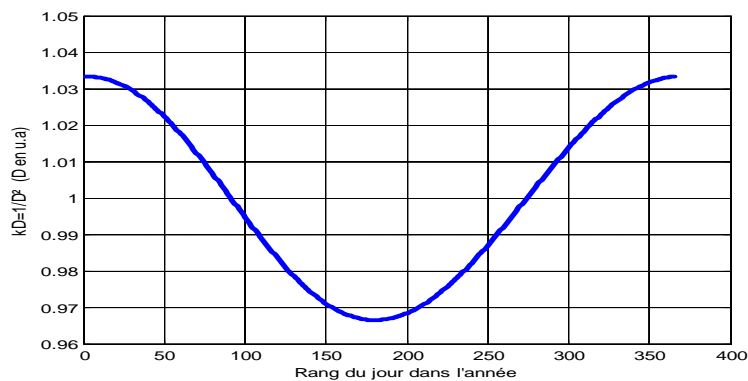


Figure (I-2) : Variation de Correction de distance terre –soleil en fonction du jour de l'année

- **La constante solaire :**

Elle désigne le flux énergétique reçue par une surface unité orienté perpendiculairement aux rayons solaire en dehors de l'atmosphère terrestre. La valeur moyenne qui a été retenue en 1980 est : $I_0=1367 \text{ w/m}^2$.

- I_0 est variable autour de l'année puisque la distance terre soleil est elle-même variable. [2]

La constante solaire corrigée est :

$$I = I_0 \times C_{t-s} \quad (\text{I-5})$$

La variation de constante solaire en fonction du jour de l'année est représentée par la figure (I-3) :

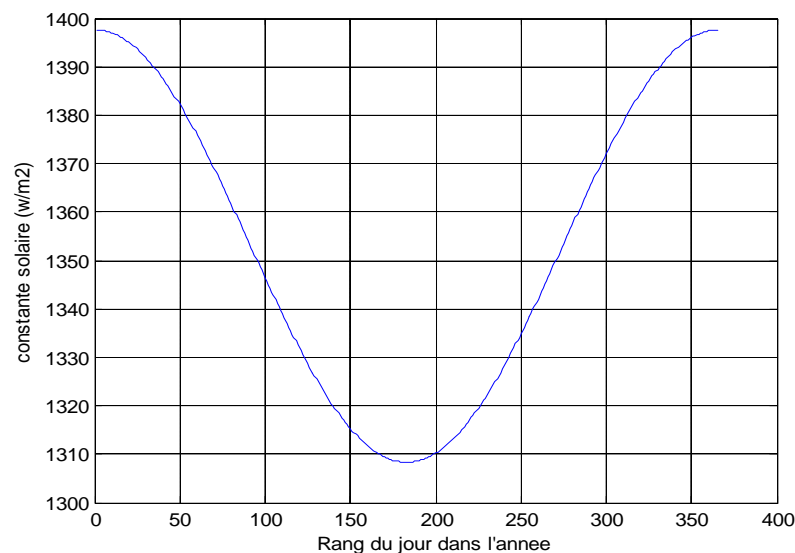


Figure (I-3) : Variation de constante solaire en fonction du jour de l'année

I-2-1- Aspect géométrique du rayonnement Solaire :

Dans le but ultérieur de calculer le flux reçu par un plan incliné placé à la surface de la terre et orienté dans une direction fixée, notre intérêt va porter dans ce qui suit sur les aspects géométriques du rayonnement solaire intercepté par la terre. La connaissance de ce flux est la base du dimensionnement de tout système solaire. [5]

I.2.1.1 Les mouvements de la terre :

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

- 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 : $T_r \approx 24\text{h}$. [6]

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 : [1,7]

$$V_r(\varphi) = V_r(\cos(\varphi)) \quad (\text{I-6})$$

- Elle tourne autour du soleil une fois par an (exactement en 365.25 jours) sur une orbite elliptique où le soleil est considéré comme un point fixe de cette ellipse. on note cependant une variation de distance durant son parcours annuel d'environ 3.3% entre les valeurs suivantes :

Distance maximum :	152 millions km.
Distance minimum :	147 millions km.

La distance moyenne de 149.5 millions km porte le nom d'une unité astronomique (1UA). A la vitesse de la lumière, cette distance correspond à 8.32 minutes. Cela signifie que la lumière solaire atteint la terre après 8.32 min. la variation de la distance entre le soleil et la terre influence l'intensité de l'irradiation sur le sol terrestre. Elle est également l'une des causes de la variation des saisons. [6]

L'angle formé par le soleil et la terre quand ils sont séparés par cette unité astronomique à une valeur de 32 min ce qui signifie que les rayons solaires incidents ne sont pas tout à fait parallèles, cette divergence est tellement minime qu'elle est souvent négligée dans les calculs.

Le point de l'orbite terrestre le plus proche du soleil porte le nom de périhélie. il a une distance de 147 millions de Km et tombe le 3 janvier. A cette période de l'année, l'hémisphère nord est en hiver pendant que l'hémisphère sud se trouve en été.

Par contre, le point le plus éloigné du soleil l'aphélie est atteint le 3 juillet avec une distance de 150 millions de km où l'hémisphère nord est en été pendant que l'hémisphère sud se trouve en hiver. [6]

Les rapports géométriques : terre-soleil est représentés par la figure (I-4) :

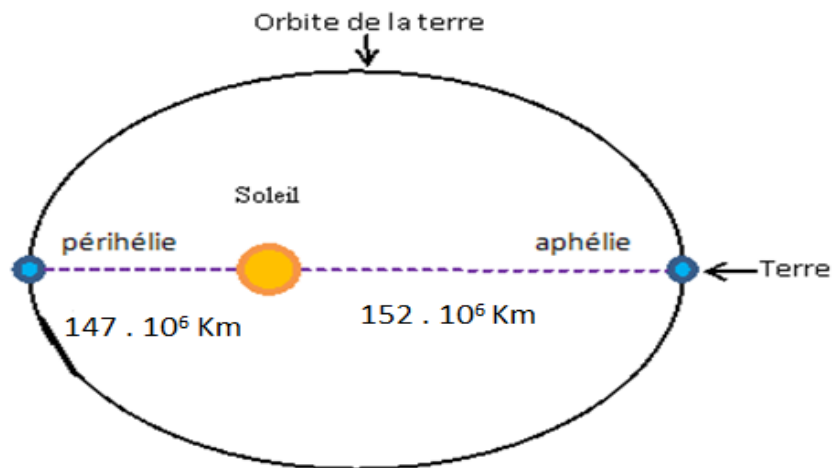


Figure (I-4) : Rapports géométriques : terre-soleil

Le mouvement de la terre autour du soleil est représenté par la figure (I-5) :

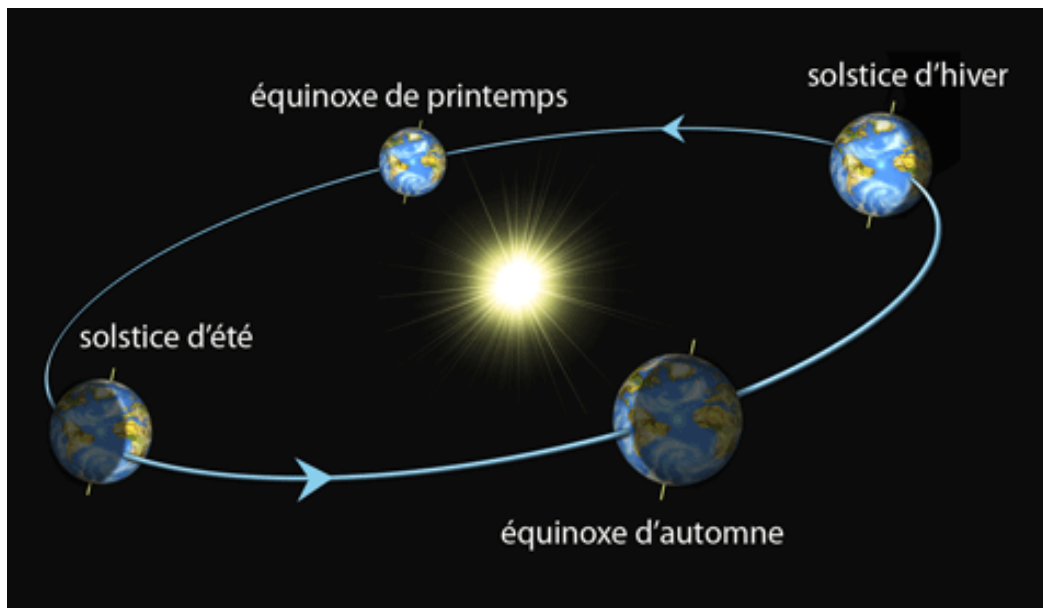


Figure (I-5) : Mouvement de la terre autour du soleil

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 $23^{\circ}27'$. [1]

L'angle d'inclinaison de l'axe de la terre est représenté par la figure (I-6) :

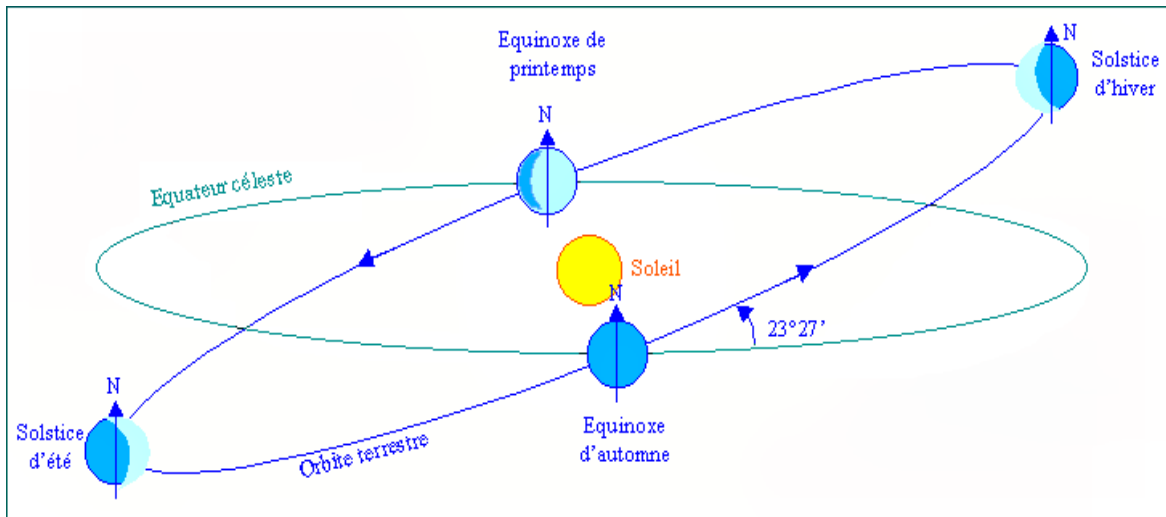


Figure (I-6) : Angle d'inclinaison de l'axe de la terre

1.2.1.2 Mouvement Apparent du Soleil :

Le mouvement apparent du Soleil vu par un observateur fixe en un point de latitude L au nord de l'équateur est représenté sur la figure (1-7).

Au midi solaire, l'angle que fait la direction du soleil avec la verticale du lieu est égal à $(L - d)$.

La durée du jour est de 12h aux équinoxes, elle est inférieure à 12h entre le 21 septembre et le 21 mars, supérieure à 12h entre le 21 mars et le 21 septembre. [8]

Le mouvement apparent du Soleil observé d'un point de latitude L est représenté par la figure (I-7) :

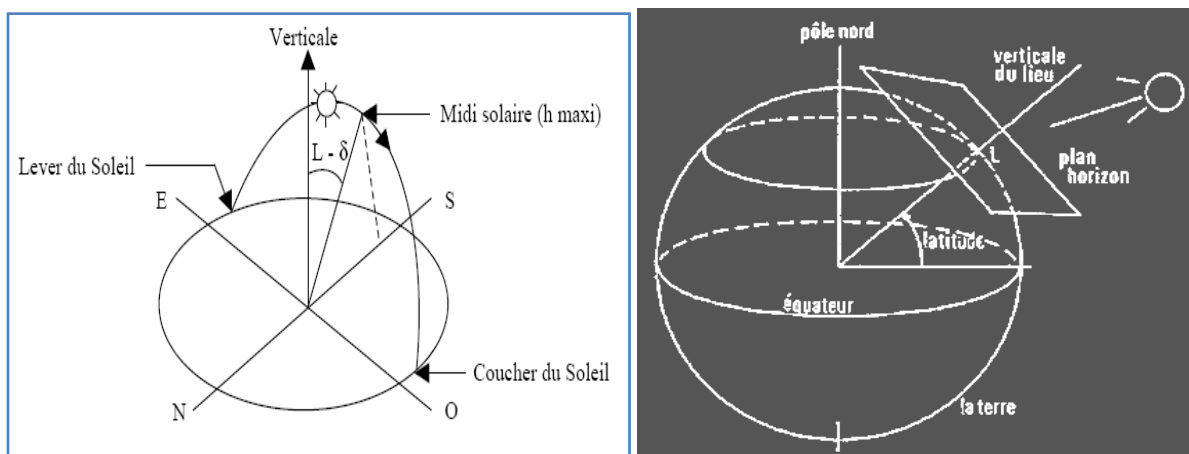


Figure (I-7) : Mouvement apparent du Soleil observé d'un point de latitude L [8]

- La sphère céleste :

La sphère céleste est une sphère imaginaire d'un diamètre immense, qui admet pour centre la terre, et pour rayon la distance (terre – soleil). On considère que tous les objets visibles dans le ciel se trouvent sur la surface de la sphère céleste. On peut résumer les différentes Caractéristiques sur la sphère elle-même comme c'est indiqué sur la figure (figure I-8). [5, 9]

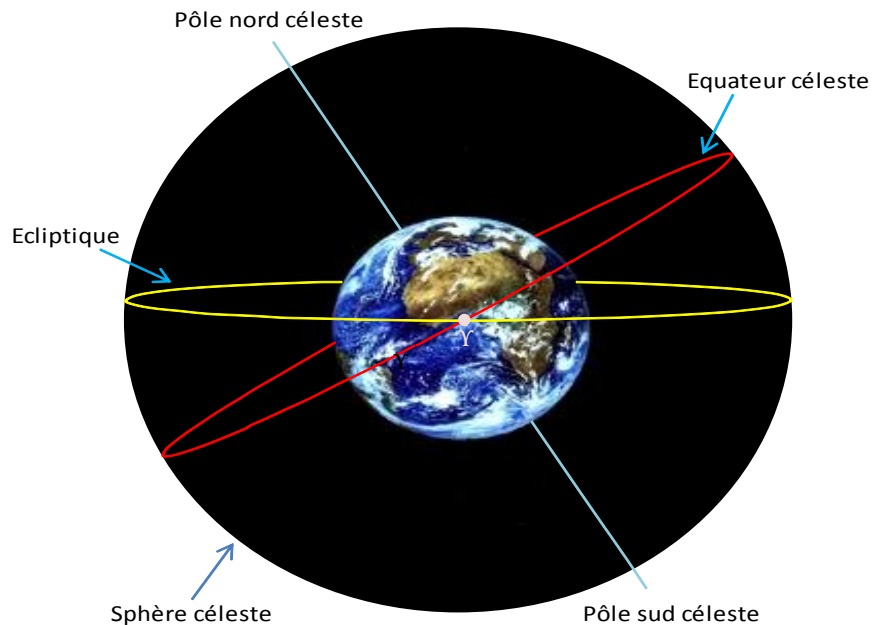


Figure (I-8) : La sphère céleste

La direction des objets peut être quantifiée de façon précise à l'aide d'un système de coordonnées célestes.

a)- Repère géographique :

Ce sont les coordonnées angulaires qui permettent le repérage d'un point sur la terre.

- La latitude φ :

Donne la localisation d'un point par rapport à l'équateur, elle varie de 0° à l'équateur à 90° Nord (ou Sud) 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 : $\varphi > 0$ vers le nord, $\varphi < 0$ vers le sud. [5]

- **La longitude L :**

permet de localiser un point à l'Est ou à l'Ouest d'une ligne Nord- Sud de référence appelée le méridien Greenwich, L varie de -180° à $+180^\circ$

Tel que: $L > 0$ à l'est du méridien de Greenwich, $L < 0$ à l'ouest du méridien de Greenwich. [5]

Les coordonnées géographiques sont représentées par la figure (I-9) :

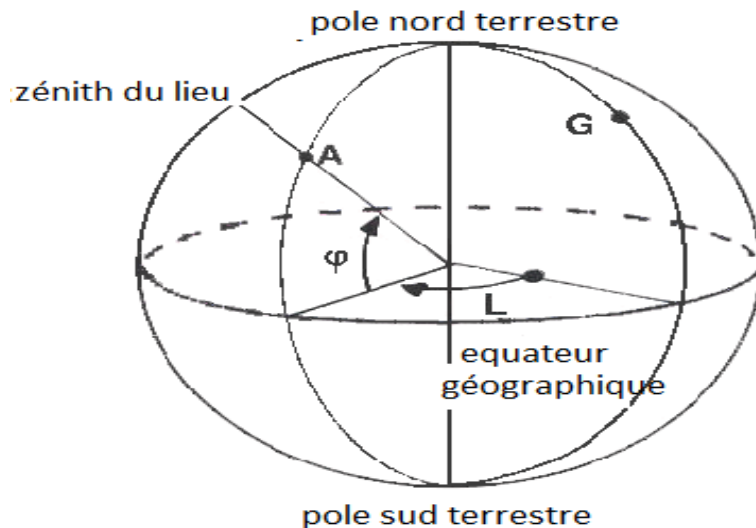


Figure (I-9): Les coordonnées géographiques

b)- Repère équatorial :

- **La déclinaison δ :**

C'est l'angle formé par la direction du soleil et le plan équatorial terrestre. Elle varie tout au long de l'année, entre deux valeurs extrêmes : $-23^\circ 27'$ (au solstice d'hiver) et $+23^\circ 27'$ (au solstice d'été), et elle s'annule aux équinoxes de printemps et d'automne, sa valeur peut être calculée par la formule : [9]

$$\delta = 23.45 \sin \left[\frac{360}{365} (284 + n) \right] \quad (\text{I-7})$$

La variation de la déclinaison en fonction du jour de l'année est représentée par la figure (I-10) :

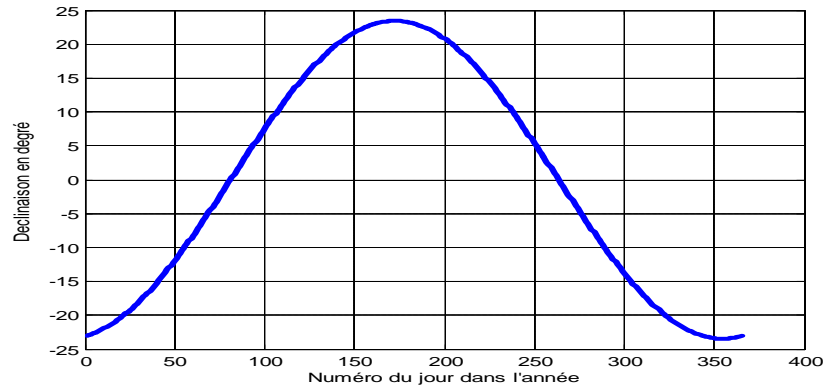


Figure (I-10) : Variation de la déclinaison en fonction du jour de l'année

- **Angle horaire (ω) :**

L'angle horaire ω (encore noté AH) du soleil est l'angle formé par le plan méridien du lieu et celui qui passe par la direction du soleil si l'on prend comme origine le méridien de Greenwich, l'angle horaire est compris entre 0° et 360° . La valeur de l'angle horaire est nulle à midi solaire, négative le matin, positive dans l'après midi et augmente de 15° par heure. Elle est donnée par la formule suivante :

$$\cos \delta \sin \omega = \cos h \sin Z \quad (\text{I-8})$$

Se qui donne:

$$\omega = \arcsin\left(\frac{\cos h \sin Z}{\cos \delta}\right) \quad (\text{I-9})$$

Ou encore : $\omega = 15(TSV - 12)$; en degrés, où TSV est le temps solaire vrai. [9]

Les coordonnées horaires sont représentées par la figure (I-11) :

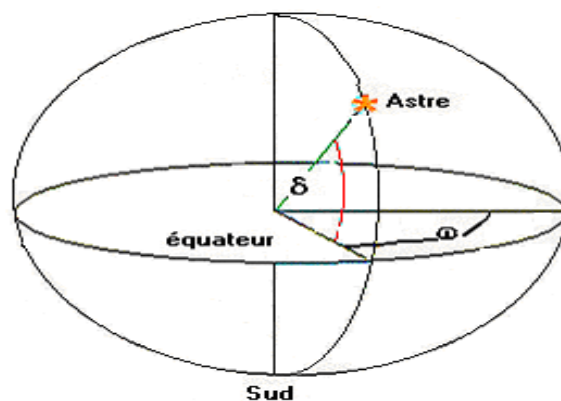


Figure (I-11) : Les coordonnées horaires [9]**c) Repère horizontal :**

Le repérage du soleil se fait par l'intermédiaire de deux angles :

- La hauteur (h)

C'est l'angle que fait la direction du soleil avec sa projection. Il est compté de 0° à 90° vers le zénith et de 0° à -90° vers le nadir, On appelle quelquefois distance zénithale le complément de l'angle h : $z + h = 90^\circ$, elle est donnée par la formule suivante : [5]

$$h = \arcsin(\cos \varphi \cos \delta \cos \omega + \sin \varphi \sin \delta) \quad (I - 10)$$

Où encore : $h = 90 - (\varphi - \delta)$ en degrés.

- L'azimut solaire Z :

C'est l'angle mesuré dans le sens des aiguilles d'une montre entre le point cardinal Sud (dans l'hémisphère nord) ou Nord (dans l'hémisphère sud) et la projection sur le plan horizontal local de la droite reliant la terre au soleil. Il est compté de 0° à 360° d'ouest en est, ou de 0° à 180° à partir du sud vers l'ouest.

Note : l'azimut solaire est négatif le matin (direction Est), nul ou égal à 180° à midi et positif l'après-midi (direction Ouest), sur tout le globe. Il diffère de l'azimut géographique, lequel est toujours mesuré dans le sens des aiguilles d'une montre à partir du Nord, indépendamment de l'hémisphère du point d'observation. [5]

Elle est donnée par la formule suivante :

$$Z = \arcsin\left(\frac{\cos \delta \sin \omega}{\cos h}\right) \quad (I - 11)$$

Les coordonnées horizontales sont représentées par la figure (I-12) :

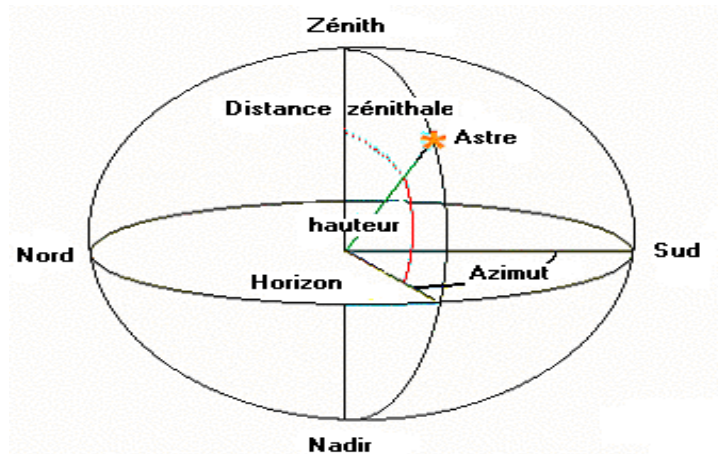


Figure (I-12) : les coordonnées horizontales [9]

La variation de l'hauteur du soleil en fonction de l'azimut est représentée par la figure (I-13) :

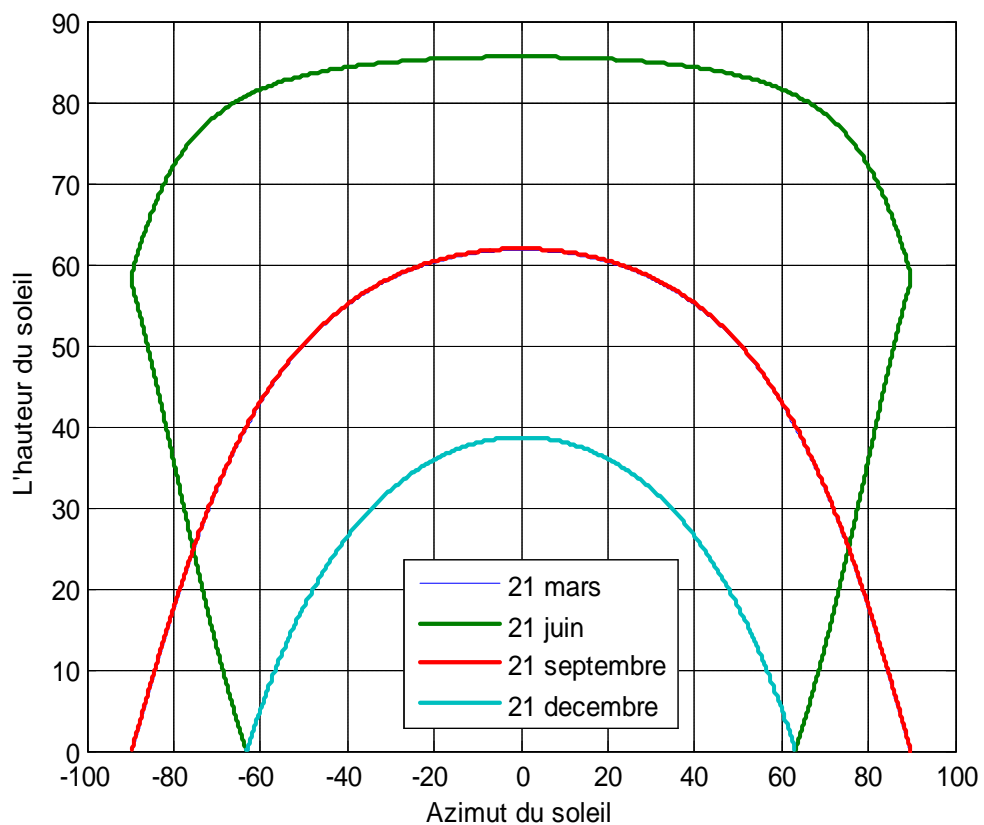


Figure (I-13) : Variation de l'hauteur du soleil en fonction de l'azimut

La variation de l'hauteur du soleil en fonction du jour de l'année est représentée par la figure (I-14) :

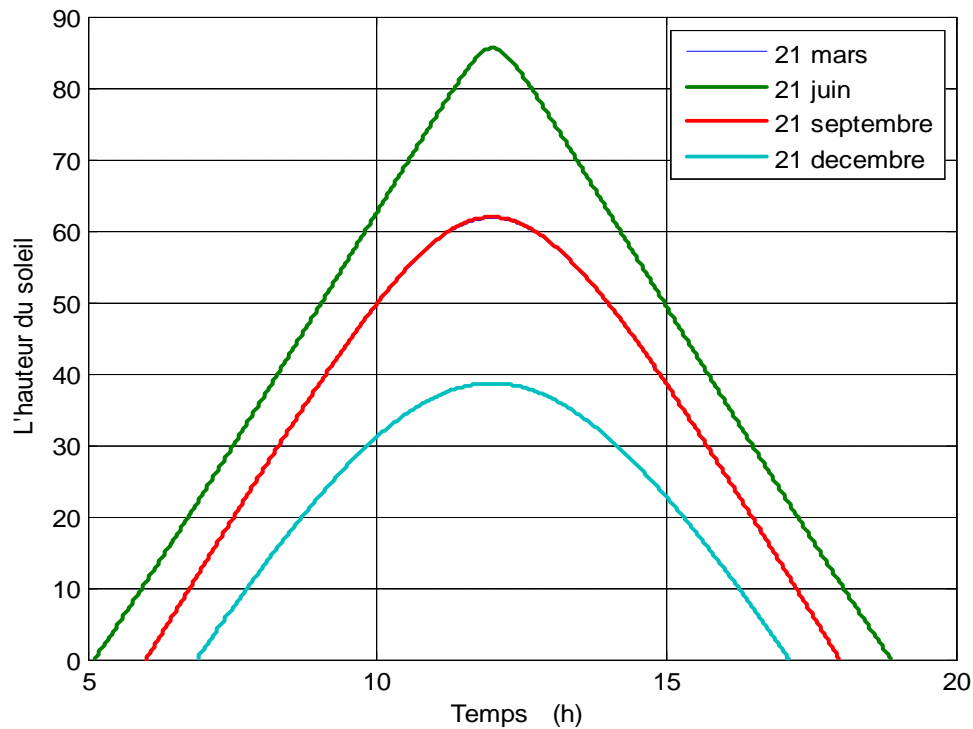


Figure (I-14) : Variation de l'hauteur du soleil en fonction du jour de l'année

d) Angle horaire de coucher et de lever du soleil :

Le coucher et le lever du soleil sont symétriques par rapport à midi solaire et définis par une hauteur h nulle ; alors en annulant la relation de l'hauteur du soleil on obtient l'angle horaire du coucher et du lever (ils ne diffèrent que par le signe) du soleil ω_s : [3]

$$\omega_s = \omega_c = -\omega_l = \arccos\left(\frac{-\sin \varphi \sin \delta}{\cos \varphi \cos \delta}\right) \quad (\text{I-12})$$

Donc les heures de lever et de coucher du soleil sont :

$$TSV_{lever} = 12 - \frac{1}{15} \arccos\left(\frac{-\sin \varphi \sin \delta}{\cos \varphi \cos \delta}\right) \quad (\text{I-13})$$

$$TSV_{coucher} = 12 + \frac{1}{15} \arccos\left(\frac{-\sin \varphi \sin \delta}{\cos \varphi \cos \delta}\right) \quad (\text{I-14})$$

La variation de lever et coucher du soleil en fonction du jour de l'année est représentée par la figure (I-15) :

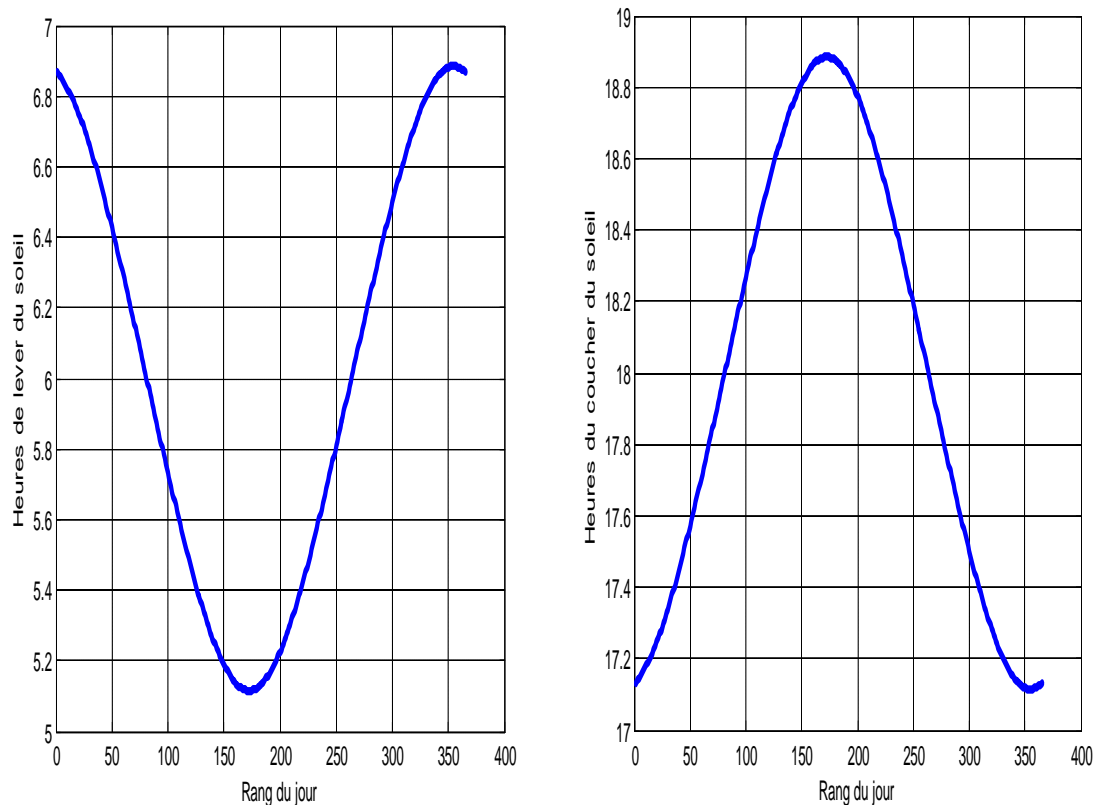


Figure (I-15) : Variation de lever et coucher du soleil en fonction du jour de l'année

Et la durée astronomique du jour est donnée par La formule suivante:

$$D_0 = \frac{2}{15} \arccos(\sin \varphi \cos \delta) \quad (\text{I-15})$$

e) Orientation d'un plan :

L'orientation d'un plan quelconque est définie par deux angles (α , γ) :

α : azimut du plan, c'est l'angle que fait la projection de la normale sur le plan horizontal et la direction du sud.

γ : hauteur du plan, c'est l'angle que fait la normale du plan et sa projection sur le plan horizontal. L'inclinaison β du plan par rapport au plan horizontal est donnée par : **[12]**

$$\beta = 90 - \gamma$$

f) Angle d'incidence du rayonnement solaire sur un plan d'orientation quelconque:

L'angle d'incidence i est l'angle entre la direction du soleil et la normale du plan, elle détermine le pourcentage de lumière directe interceptée par la surface. Il est défini par l'inclinaison du plan β et l'azimut de la normale du plan α (orientation du plan). L'angle d'incidence sur un plan quelconque est donnée par [Capderou]; en fonction de l'angle horaire ω , par l'expression suivante:

$$\cos(i) = A \sin(\omega) + B \cos(\omega) + C \quad (I - 16)$$

Avec :

$$A = \cos(\delta) \times \sin(\beta) \times \cos(\gamma)$$

$$B = \cos(\varphi) \times \sin(\beta) \cos(\delta) + \sin(\varphi) \times \sin(\beta) \cos(\delta) \times \cos(\gamma)$$

$$C = \sin(\varphi) \times \cos(\beta) \sin(\delta) - \cos(\varphi) \times \sin(\beta) \sin(\delta) \times \cos(\gamma)$$

Où : β est Orientation du capteur (inclinaison du capteur par rapport à l'horizontal)

γ est Azimut du plan (angle formé par la projection du plan sur l'horizontal avec la direction nord-sud) [1, 13, 14]

- **Plans particuliers importants :**

- **Plan horizontal :**

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

Avec : $A=0$, $B=\cos(\varphi)$ et $C=\sin(\varphi)$

$$\text{D'où: } \cos(i) = \cos(\varphi) \cos(\delta) \cos(\omega) + \sin(\varphi) \sin(\delta) \quad (I-17)$$

- **Plan vertical**

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

Avec: $A= \sin(\alpha)$, $B = \cos(\alpha) \sin(\varphi)$, $C = - \cos(\alpha) \cos(\varphi)$

D'où:

$$\cos(i) = \sin(\alpha) \cos(\varphi) \sin(\omega) + \cos(\alpha) \sin(\varphi) \cos(\delta) \cos(\omega) - \cos(\alpha) \cos(\varphi) \sin(\delta) \quad (I-18)$$

➤ **Plan Sud**

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

$$A = 0, B = \sin(\gamma + \varphi), C = -\cos(\gamma + \varphi)$$

$$D'où: \cos(i) = \sin(\gamma + \varphi) \cos(\delta) \cos(\omega) - \cos(\gamma + \varphi) \sin(\delta) \quad (I-19)$$

➤ **Plan orienté plein sud à la latitude du lieu**

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

$$A = 0, B = 1, C = 0$$

$$D'où: \cos(i) = \cos(\delta) \cos(\omega) \quad (I-20)$$

✚ **Exemple de calcul :**

Calculer l'angle d'incidence sur un plan orienté plein sud lorsqu'il est 12h30 le 21 décembre à Adrar avec une inclinaison β égale à la latitude du site.

La latitude est $\varphi = 27.88^\circ\text{N}$ et la longitude est $L = 0.18^\circ\text{O}$.

Nous obtenons par le calcul : $E_t = 2.1742$ mn.

Nous en déduisons : $TSV = 12,5 - 1 + 2.1742/60 - 0.18/15 = 11.5242$ h.

D'où $\omega = 15(TSV - 12) = -7.1365^\circ$

Et la déclinaison $\delta = 32.45 \times \sin(360 \times (n+284)/365) = -32.4497^\circ$

$\cos(i) = \sin(\varphi - \beta) \cos(\omega) \cos(\delta) - \cos(\varphi - \beta) \sin(\omega) \sin(\delta) = 0.8373$. D'où: $i = 33.14^\circ$.

Calculer l'angle d'incidence sur un plan horizontal lorsqu'il est 12h30 le 21 juin à Adrar.

La latitude est $\varphi = 27.88^\circ\text{N}$ et la longitude est $L = 0.18^\circ\text{O}$.

Nous obtenons par le calcul : $E_t = -1.3247$ mn.

Nous en déduisons : $TSV = 12,5 - 1 - 1.3247/60 - 0.18/15 = 11.4659$ h.

D'où $\omega = 15(TSV - 12) = -8.0112^\circ$

$$\text{Et la déclinaison } \delta = 32.45 \times \sin(360 \times (n+284)/365) = 32.4497^\circ$$

$$\cos(i) = \sin(\varphi - \beta) \cos(\omega) \cos(\delta) - \cos(\varphi - \beta) \sin(\omega) \sin(\delta) = 0.9895. \text{ D'où: } i = 8.29^\circ.$$

La variation de l'angle d'incidence et l'hauteur du soleil en fonction du temps pour le 21 décembre sur un plan orienté plein sud est représentée par la figure (I-16) :

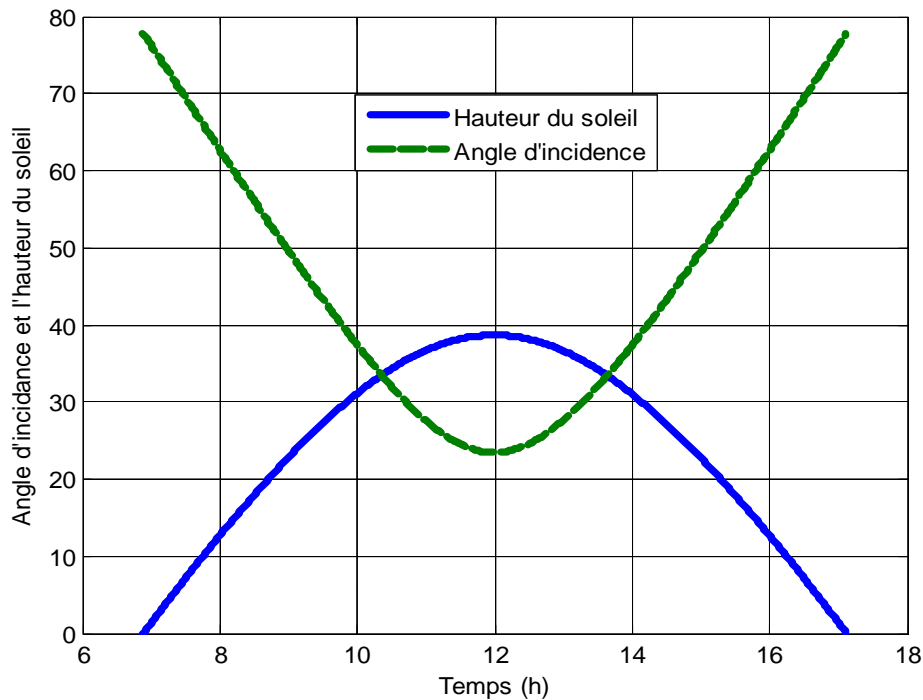


Figure (I-16) : Variation de l'angle d'incidence et l'hauteur du soleil en fonction du temps pour le 21 décembre sur un plan orienté plein sud

g) Equation du temps :

Le mouvement apparent du Soleil n'est pas parfaitement régulier pour deux raisons :

- ✓ La rotation de la terre se fait selon l'axe nord-sud, alors que le mouvement de la terre par rapport au soleil s'effectue dans le plan de l'écliptique.
- ✓ La vitesse angulaire de la Terre dans son mouvement héliocentrique n'est pas constante (loi des aires).

La durée des journées va donc varier légèrement (entre 23 h 59 m 39 s et 24h 00m 30s).

Cette variation entraîne l'existence d'un écart entre le temps solaire vrai et le temps solaire moyen. Cet écart porte le nom d'équation du temps ; autrement dit $Et = TSV - TSM$.

Par ailleurs, elle est donnée par la formule suivante :

$$Et = 7,678. \sin(B + 1,374) - 9,87. \sin(2B) \quad (I-21)$$

Avec : $B = (n-81) \times (360/365)$.

Où : Et est exprimée en minutes. : **[15, 16]**

La variation de l'équation de temps en fonction du jour de l'année est représentée par la figure (I-17)

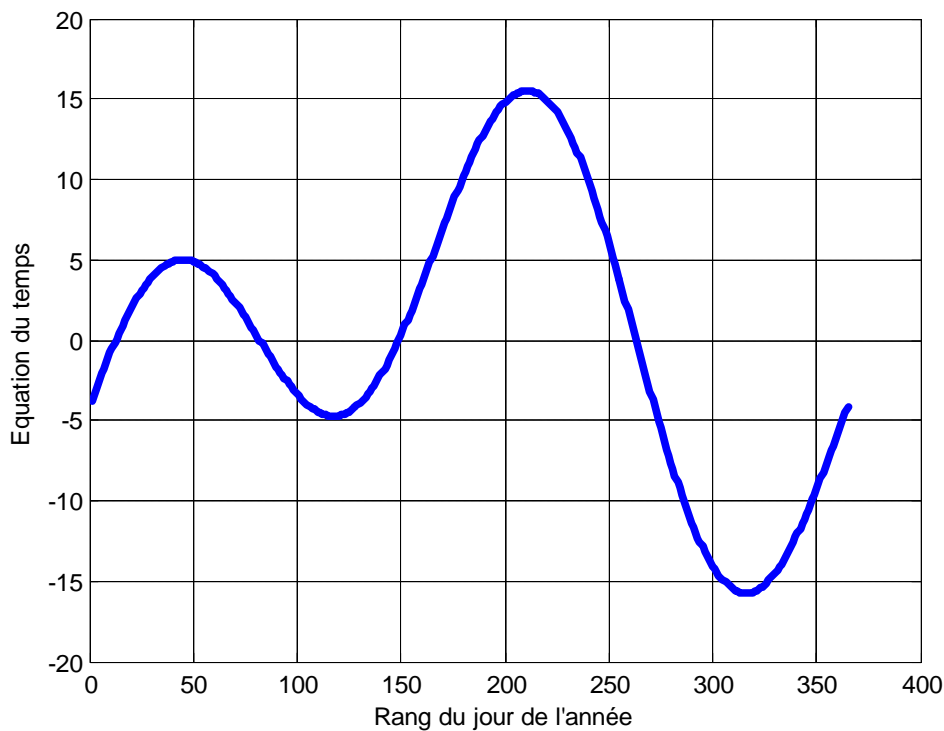


Figure (I-17) : Variation de l'équation de temps en fonction du jour de l'année

- **Les paramètres de temps :**

On distingue :

- ✓ Le temps solaire vrai (TSV) est l'angle horaire entre le plan méridien passant par le centre du soleil et le méridien du lieu considéré, il est donné par l'expression:

$$TSV = 12 + \frac{\omega}{15} \quad (I - 22)$$

- ✓ Le temps solaire moyen (TSM) est donné par :

$$Et = TSV - TSM \quad (I - 23)$$

- ✓ Le temps universel (TU) est le temps moyen de Greenwich, il est donné par la formule :

$$TU = TSM - \frac{L}{15} \quad (I - 24)$$

- ✓ Le temps légal (TL) est le temps officiel d'un état, il est donné par :

$$TL = TU + \Delta H \quad (I - 25)$$

Où : ΔH le décalage horaire entre le méridien de Greenwich et l'état considéré.

$\Delta H = 1$ heure pour l'Algérie. [9, 16, 17, 18, 19]

Pour un lieu de longitude L, il existe une correspondance entre l'angle horaire, temps solaire vrai, temps solaire moyen, temps solaire local, et temps universel :

$$\omega = 15 \times (TSV - 12)$$

$$Et = TSV - TSM$$

$$TU = TSM - \frac{L}{15}$$

$$TL = TU + \Delta H$$

$$\omega = 15(TL - \Delta H + \frac{L}{15} + Et - 12)$$

✚ Exemple de calcul :

Calculer la hauteur du Soleil et l'azimut lorsqu'il est 12h30 le 21 mars à Adrar. La latitude est $\phi = 27.88^\circ N$ et la longitude est $L = 0.18^\circ O$.

Nous obtenons par le calcul : $Et = -7.8626 \text{ mn}$.

Nous en déduisons : $TSV = 12,5 - 1 - 7.8626/60 - 0.18/15 = 11.3570 \text{ h}$

$$\text{D'où } \omega = 15 (\text{TSV} - 12) = -9.6457^\circ$$

$$\text{Et la déclinaison } \delta = 32.45 \times \sin(360 \times (n+284)/365) = -0.5586^\circ$$

$$\sin(h) = \sin(\varphi) \sin(\delta) + \cos(\varphi) \cos(\delta) \cos(\omega) = -0.0040 \text{ d'où : } h = -0.2276^\circ$$

$$\sin(Z) = \cos(\delta) \times \sin(\omega) / \cos(h) = -0.1675 \text{ d'où : } Z = -9.6453^\circ$$

I-2- Aspect énergétique du rayonnement solaire :

I-2-1- Concepts et définitions du rayonnement solaire :

a) Flux énergétique: F [J/s = W]

Flux énergétique ou flux radiatif c'est la quantité d'énergie émise par unité de temps par la totalité de la surface de la source dans toutes les directions; s'exprime en joule/seconde, donc en watts ; alors le flux énergétique est la puissance rayonnée par la source. [20]

b) Intensité énergétique:

L'intensité totale I (W/sr) d'une source et son intensité monochromatique I_λ (W/sr · m) sont respectivement définies comme les flux total et monochromatique rayonnés, par unité d'angle solide $d\omega$, dans une direction D donnée :

$$I_\Delta = \frac{d\Phi}{d\Omega} \quad (\text{I-26})$$

$$I_{\Delta\lambda} = \frac{d\Phi_\lambda}{d\Omega} \quad (\text{I-27})$$

Où : λ :longueur d'onde donnée.

c) Luminance énergétique: L [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$]

En anglais "radiance" c'est l'émittance rapportée à l'angle solide d'émission

d) Luminance énergétique spectrale : L_λ [$\text{W} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{sr}^{-1}$]

Luminance énergétique spectrale ou Luminance énergétique monochromatique c'est luminance énergétique rapportée à la longueur d'onde [21, 22]

e) Excitance énergétique: Φ [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$]

Excitance énergétique ou emittance c'est le flux émis par unité de surface de la source.

$$\text{(Surface d'une sphère : } s = 4 \pi r^2) \text{ donc: } \Phi = \frac{F}{4 \pi r^2} \quad [20]$$

f) Densité spectrale :

Le Soleil émet un rayonnement de type électromagnétique. La lumière blanche nous parvient en très peu de temps (elle met en moyenne environ 8 minutes et 19 secondes à nous parvenir) car il se déplace à la vitesse de la lumière, soit 299 792 458 m/s.

La distribution spectrale du rayonnement solaire est représentée par la figure (I-18) :

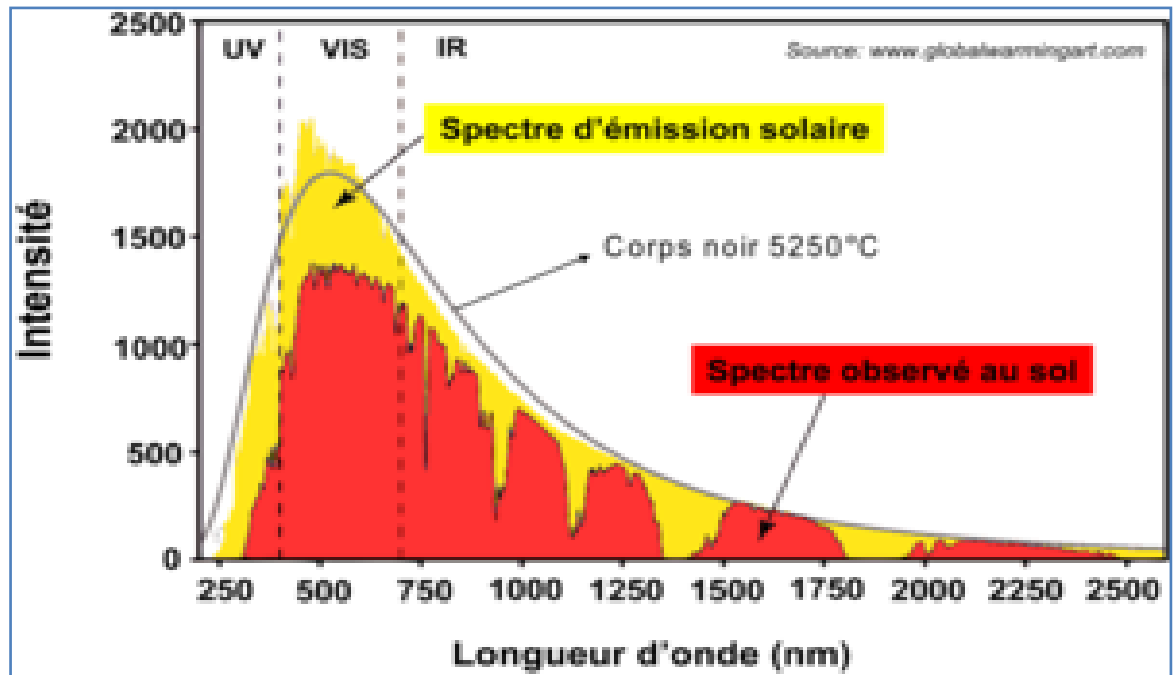


Figure (I- 18) : Distribution spectrale du rayonnement solaire [16]

Ce rayonnement constitue un spectre continu allant des ultra-violets à l'infra-rouge en passant par le visible ou il émet avec le maximum d'intensité (2). Cependant, en traversant la chromosphère du Soleil et l'atmosphère de la Terre, les atomes qui les composent absorbent certains photons.

Le spectre alors observable depuis la surface de la Terre est donc un spectre de raies d'absorptions.

Le spectre de raies d'absorptions est représenté par la figure (I-19) :

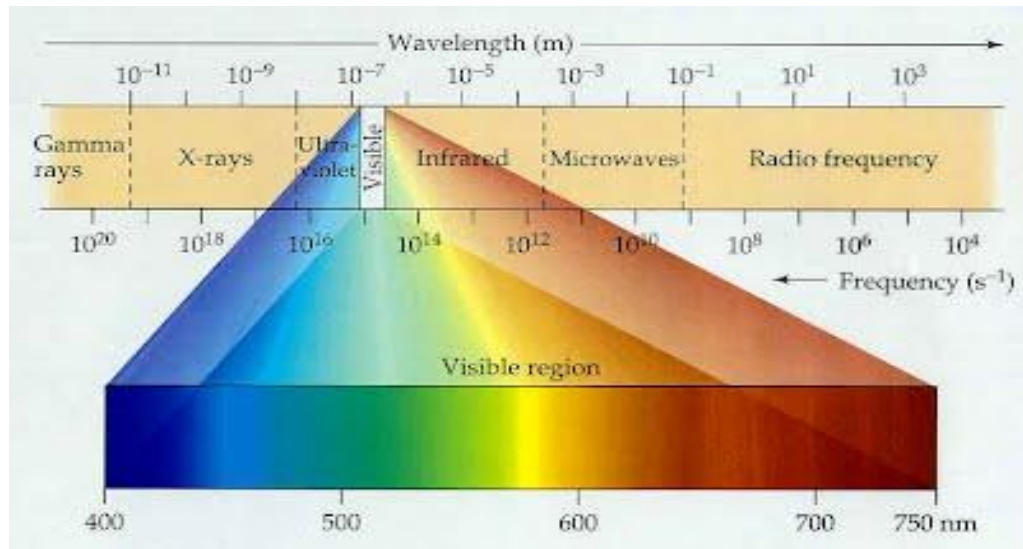


Figure (I- 19) : Raies d'absorptions

g) Corps noir :

Un corps noir est un objet théorique qui absorbe toutes les radiations qu'il reçoit. Par conséquent il ne réfléchit pas et ne transmet pas de radiation. Il absorbe 100% des rayonnements qu'il reçoit et convertit cette énergie en énergie interne. Le spectre d'émission d'un corps noir ne dépend que de son énergie interne et donc que de sa température. [23]

Le rayonnement du corps noir pour différentes températures est représenté par la figure (I-20) :

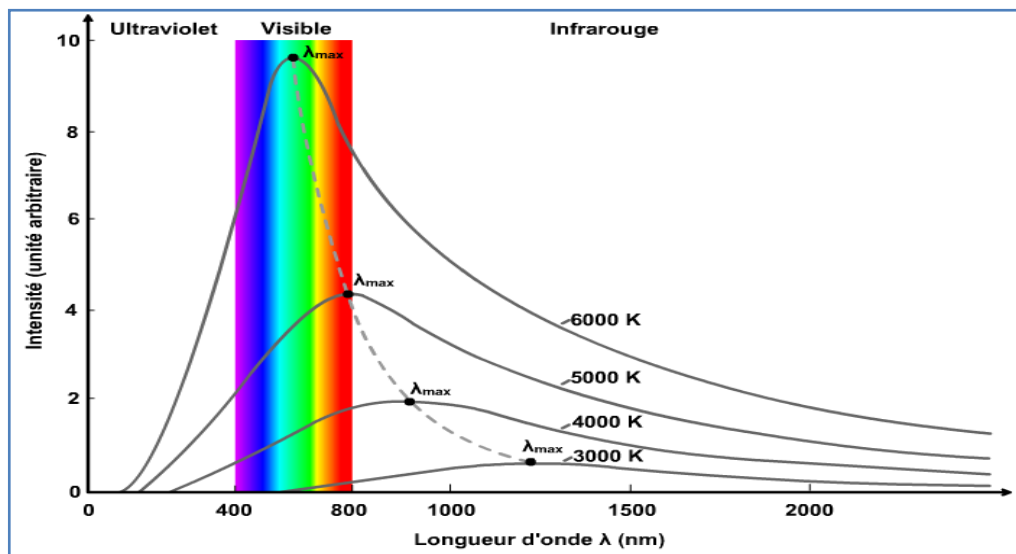


Figure (I- 20) : Rayonnement du corps noir pour différentes températures [23]

h) Effet-serre :

Phénomène thermique bien connu sur les planètes comme la Terre où l'atmosphère laisse passer une partie du rayonnement du soleil qui vient frapper le sol. Réchauffé, celui-ci émet un rayonnement infrarouge qui est en partie ou totalement piégé par l'atmosphère rendue "imperméable" par la présence de gaz dont principalement la vapeur d'eau sur Terre, et le CO₂ (sur Venus et à moindre degré sur Terre). [24]

L'effet de serre est représenté par la figure (I-21) :



Figure (I- 21) : L'effet de serre

I-2-2- Lois de transfert du rayonnement solaire:**a) Loi de Planck :**

La **loi de Planck** définit la distribution de luminance énergétique monochromatique du rayonnement thermique du corps noir en fonction de la température thermodynamique.

$$L_{\lambda} = \frac{2hc_{\lambda}}{\lambda^5} \times \frac{1}{\exp\left(\frac{hc_{\lambda}}{k\lambda T}\right) - 1} \quad (\text{I-28})$$

$c_{\lambda} = c / n_{\lambda}$ est la vitesse du rayonnement électromagnétique dans le milieu où se propage le rayonnement, avec : [25,26]

- n_λ indice de réfraction du milieu pour la longueur d'onde λ
- $c = 299\,792\,458$ m/s (vitesse de la lumière)
- $h = 6,626\,17 \times 10^{-34}$ J.s (constante de Planck)
- $k = 1,380\,66 \times 10^{-23}$ J/K (constante de Boltzmann)
- T est la température de la surface du corps noir en kelvins

b) Loi de Lambert:

La loi Cosinus de Lambert estime que la radiation par angle solide d'unité (l'intensité radiante) d'une surface plane varie avec le cosinus de l'angle par rapport à la surface normale.

La loi Cosinus de Lambert est représentée par la figure (I-22) :

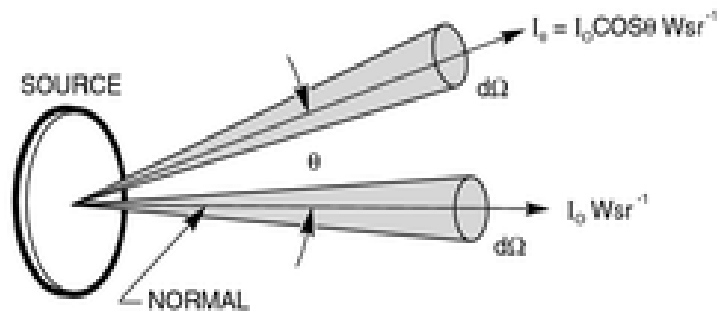


Figure (I-22): La loi Cosinus de Lambert indique dans quelle mesure l'intensité (I) dépend de l'angle. [27]

c) Loi de Wien:

On observe sur la figure (I-20) que la maximum de la luminance spectrale L_λ se décale vers les longueurs d'onde courtes (photons plus énergétiques) quand T augmente. La loi exacte, appelée loi de déplacement de Wien elle découle directement de la formule de Planck. En dérivant l'expression (I-24) par rapport à λ on montre que la luminance est maximale pour :

$$\lambda_{\max} = \frac{2,8998 \times 10^{-3}}{T} \quad (\text{I-29})$$

Pour une température donnée, elle donne la valeur de la longueur d'onde λ_{\max} (en mètre) où le flux est maximal : $\lambda_{\max} T = C = 3000 \mu\text{m} \cdot \text{K}$ (rayonnement spatial fossile) [28, 29]

d) Loi de Stefan-Boltzmann:

La loi de Stefan-Boltzmann est la simple intégration de la loi de Planck sur l'ensemble des longueurs d'onde est :

$$F_{emi}^{CN} = \int_{\lambda=0}^{\lambda=+\infty} \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \times \frac{1}{\exp \frac{hc}{k_B \lambda T} - 1} d\lambda = \sigma T^4 \quad (I - 30)$$

Avec $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-4}$ et F_{emi}^{CN} flux émies.

La formule de Stefan- Boltzmann est d'une importance capitale et rappelle que les flux incidents et partants ne sont fonction que de la température. On note la forte dépendance en T puisqu'il s'agit d'une puissance quatrième. Alors que la température du Soleil n'est que 20 fois plus élevée que celle de la Terre, son flux partant est 160.000 fois plus élevé.

e) Loi de Kirchhoff :**- Première loi de Kirchhoff :**

Tous les corps noirs de même température possèdent la même luminance.

- Seconde loi de Kirchhoff

Le corps noir est le corps qui, pour une température quelconque, émet le plus d'énergie. La loi de Kirchhoff affirme que l'émissivité d'une surface est égale à son absorption, où l'absorption d'une surface est le ratio de la puissance radiante absorbée par rapport à la puissance radiante incidente sur la surface. [23, 24]

$$\int \alpha(\lambda, T) d\lambda = \int \varepsilon(\lambda, T) d\lambda \quad \text{avec: } \alpha = \varepsilon \quad (I - 31)$$

I-3- Conclusion :

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

Chapitre II

Théorie du Rayonnement Solaire

II- 1- Introduction :

Dans ce chapitre on va présenter le rayonnement solaire hors atmosphère, son intensité avant d'entrer dans l'atmosphère et sa structure. On présente les différents changements que subit ce rayonnement en traversant cette atmosphère.

On va aussi présenter le rayonnement solaire sur le sol et quelques modèles simplifiés pour l'évaluation de la puissance et l'énergie solaire sur un plan horizontal et incliné pour un jour clair.

II-2 - Rayonnement solaire hors atmosphère :

L'énergie du soleil est produite par réactions de fusion thermonucléaire, les noyaux d'hydrogène s'assemblent en noyaux d'hélium avec dégagement d'énergie. Cette énergie est émise dans l'espace par la surface du soleil, notamment sous forme d'ondes électromagnétiques. Le spectre de ce rayonnement correspond à l'émission d'un corps noir porté à 5800°K, dont le maximum est situé dans le domaine visible.

La densité moyenne d'énergie reçue par la terre, appelée constante solaire, est de 1367 W/m². La valeur réelle du rayonnement extraterrestre varie de ±3.3% au cours de l'année du fait de l'ellipticité de l'orbite terrestre. [30]

Hors atmosphère, le rayonnement global ne possède qu'une seule composante directe.

$$S_n^e = G_n^e = 1367(1 + 0.034 \times \cos(\frac{360}{365}(n - 2))) \quad (\text{II-1})$$

Avec :

S_n^e : la puissance directe du rayonnement extraterrestre sur un plan normal.

G_n^e : la puissance globale du rayonnement extraterrestre sur un plan normal. [1,2]

II-2-1- Expression de la puissance et de l'énergie du rayonnement hors atmosphère :

Expression de la puissance du rayonnement hors atmosphère sur un plan quelconque est :

$$G^e = G_n^e \times \cos i \quad (\text{II} - 2)$$

Expression de l'énergie du rayonnement hors atmosphère sur un plan quelconque est :

$$H^e = \int_{\omega_l}^{\omega_c} G^e d\omega = G_n^e \int_{\omega_l}^{\omega_c} \cos^2 i d\omega \quad (II - 3)$$

Avec : ω_l et ω_c sont des angles horaire de lever et coucher du soleil.

$$j = \int_{\omega_l}^{\omega_c} \cos^2 i d\omega = A(\cos\omega_c - \cos\omega_l) + B(\sin\omega_c - \sin\omega_l) + C(\omega_c - \omega_l)$$

D'où :

$$H^e = G_n^e \times j$$

Avec :

H^e est exprimé en Wh/m², G_n^e est exprimé en W/m² et j est exprimé en radiant.

On a : 1 jour = 24h = 2π

$$\frac{H^e}{G_n^e} = \frac{24j}{2\pi} = \frac{12j}{\pi}$$

$$H^e = \frac{12}{\pi} G_n^e (A(\cos\omega_c - \cos\omega_l) + B(\sin\omega_c - \sin\omega_l) + C(\omega_c - \omega_l)) \quad (II - 4)$$

Avec :

$$A = \cos(\delta) \times \sin(\beta) \times \cos(\gamma)$$

$$B = \cos(\varphi) \times \sin(\beta) \cos(\delta) + \sin(\varphi) \times \sin(\beta) \cos(\delta) \times \cos(\gamma)$$

$$C = \sin(\varphi) \times \cos(\beta) \sin(\delta) - \cos(\varphi) \times \sin(\beta) \sin(\delta) \times \cos(\gamma) \quad [1]$$

- Expression de l'énergie pour le plan horizontal :

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

$$\cos i = \sin h = \cos\varphi \cos\delta \cos\omega + \sin\varphi \sin\delta$$

D'où :

$$H_h^e = \frac{24}{\pi} G_n^e (\cos\varphi \cos\delta \sin\omega_c + \omega_c \sin\varphi \sin\delta) \quad (II - 5)$$

Avec : $\omega_c = \arccos\left(\frac{\sin\delta}{\cos\varphi} - \tan\varphi \tan\delta\right)$

II-2-2- Influence de l'atmosphère sur le rayonnement solaire :**II-2-2-1- Rôle de l'atmosphère:**

L'atmosphère terrestre protège la terre des excès de rayonnement solaire et arrête les rayons les plus dangereux au développement de la vie sur terre, exemple du filtrage des rayons ultra violet par la fameuse couche d'ozone de la stratosphère. L'énergie solaire qui descend en ligne droite vers la terre ne peut pas nous parvenir en intégralité car elle va subir des transformations en traversant l'atmosphère: par absorption, réflexion, réfraction et par diffusion. La structure de cette atmosphère conditionne, par conséquent, les divers transferts énergétiques sol- atmosphère.

II-2-2-2- Structure de l'atmosphère

La stratification de l'atmosphère en trois grandes couches est représentée par:

- L'homosphère, comprise entre 0 et 90 km d'altitude.
- L'hétérosphère, comprise entre 90 et 700 km d'altitude.
- L'exosphère, comprise entre 700 et 3000 km d'altitude.

L'homosphère est subdivisée en trois principales couches énumérées ci-dessous:

- La troposphère: s'étend de la surface de la terre à une altitude de 10 à 16 km, où la température et la pression y décroissent, respectivement de 5,6°C par kilomètre et de 400 à 100 mbar jusqu'à la base de la couche immédiatement supérieur qui est la stratosphère. Plus de la moitié de la masse gazeuse de l'atmosphère se trouve dans la troposphère; elle contient une majorité d'azote et d'oxygène (respectivement 78 et 21%), du CO₂, de la vapeur d'eau, des aérosols, des nuages de gouttelette d'eau ou de cristaux de glace.
- La stratosphère: se situe entre 16km et 55km d'altitude elle contient plusieurs couches dont l'une particulièrement riche en ozone, présente une température voisine de 0°C à la limite supérieur de la couche. Ce réchauffement est du a l'absorption partielle du rayonnement ultraviolet émis par le soleil. La pression n'est plus que de 1mb à sa limite supérieure, la stratopause.
- l'ionosphère se situe entre 55km jusqu'à 500km d'altitude et où la température croît régulièrement pour atteindre 1500 °C. C'est elle qui contient les couches réfléchissantes pour les ondes radio.

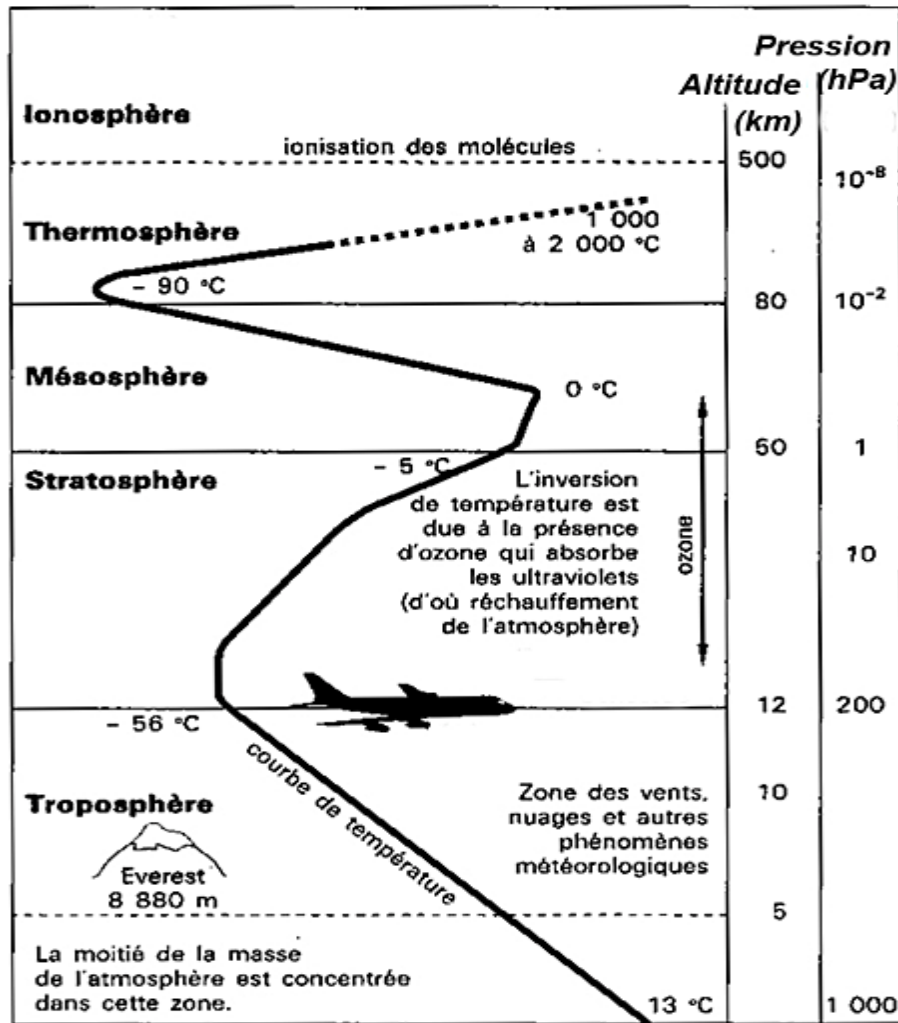


Figure (II-1) : La structure de l'atmosphère [1]

II-2-3- Nombre d'air-masse :

Pour traduire l'influence de l'atmosphère on introduit la notion d'air masse (AM) On appelle "masse d'air" m ou air mass en anglais, la masse d'atmosphère traversée par le rayonnement direct pour atteindre le sol, par rapport à une traversée verticale.

La longueur du trajet du soleil à travers l'atmosphère est:

$$OM = \frac{OA}{\sin(\theta)} \quad (II - 6)$$

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

$$m = \frac{p_m}{1013} \times \frac{1}{\sin(h)} \times \exp\left(-\frac{z}{7.8}\right) \quad (II - 7)$$

Où : p_m : la pression atmosphérique au niveau de la mer.

z : l'altitude (km) c'est la distance verticale exprimé en mètre, séparant le point considéré du relief terrestre du niveau de la mer, pris comme surface de référence.

1013 (mbar): pression de référence.

7.8 Km : épaisseur réduite de l'atmosphère.

Une autre formule est possible :

$$m = \frac{p_m}{1013} \times \frac{(0.88)^z}{\sin(h)} \quad (II - 8)$$

Dans les conditions normales et au niveau de la mer ($z = 0$), on trouve : **[1,30]**

$$m = \frac{1}{\sin(h)} \quad (II - 9)$$

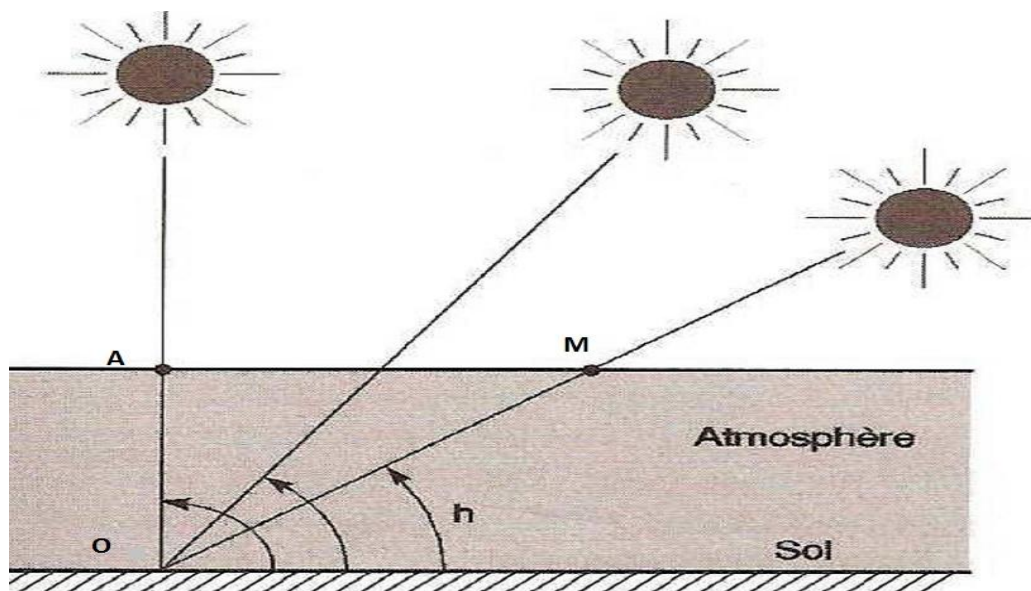


Figure (II-2) : Définition de l'air mass [1]

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 unitaire de 7.8 km.

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 [1]

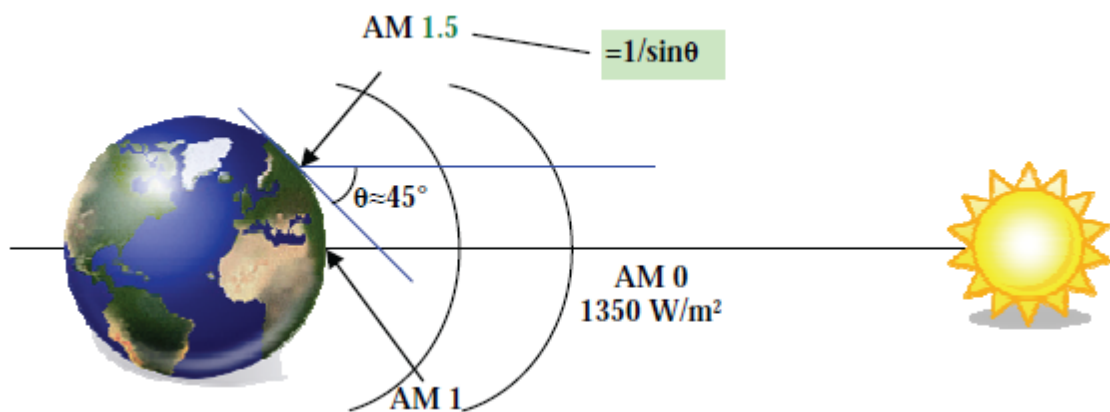


Figure (II-3): Normes de mesures du spectre d'énergie lumineuse émis par le soleil, notion de la convention AM. [31]

II-2-4- Interaction du rayonnement solaire :

II-2-4-1- Interaction du rayonnement solaire avec l'atmosphère:

Le rayonnement solaire avant d'atteindre le sol traverse les différentes couches atmosphériques où il subit le phénomène de diffusion et d'absorption.

a- Phénomène de diffusion:

La diffusion est la résultante des phénomènes de réflexion, réfraction et de diffraction par les particules et les gaz existant dans l'atmosphère. La diffusion varie d'un lieu à un autre, d'une saison à une autre. Le niveau de diffusion est corrélé à la longueur d'onde du rayonnement solaire, de l'épaisseur des couches atmosphériques traversées, ainsi que de la densité des particules et des molécules existantes dans ces couches. Il existe trois types de diffusion:

✓ *Diffusion de Rayleigh:*

Elle se produit lorsque les longueurs d'onde du rayonnement solaire sont supérieures aux dimensions des particules. La diffusion de Rayleigh par les molécules d'azote et d'oxygène existe dans toutes les couches de l'atmosphère; c'est elle qui rend le ciel visible en dehors du faisceau issu du soleil.

✓ *Diffusion de Mie:*

Se produit lorsque les longueurs d'onde du rayonnement solaire avoisinent les dimensions des particules. Ce type de diffusion est souvent produit par la poussière, le pollen, la fumée et l'eau. [30]

✓ *Diffusion non sélective:*

Se produit lorsque les longueurs d'onde du rayonnement sont inférieures aux dimensions des particules; ce qui fait que toutes les longueurs d'onde sont dispersées. Les gouttes d'eau de l'atmosphère dispersent le bleu, le vert et le rouge de façon presque égale, engendrant une lumière blanche. Ce qui explique la couleur des brouillards et des nuages.

b-Phénomène d'absorption:

L'ozone, dont la teneur est prépondérante vers l'altitude de 25km, absorbe les rayonnements ultraviolets qui sont néfastes à la santé des êtres vivants. La vapeur d'eau existante en grande proportion dans la troposphère absorbe les infra rouges. Le bioxyde de carbone est un gaz à effet de serre qui absorbe beaucoup de rayonnement dans la portion infrarouge thermique du spectre et emprisonne la chaleur dans l'atmosphère.

II-2-4-2- Interaction du rayonnement solaire avec la matière:

L'ensemble des capteurs solaires ne répond pas de la même façon quand ils sont exposés face au soleil. Les cellules photovoltaïques par exemple répondent au rayonnement global et dépendent beaucoup de la longueur d'onde. Elles sont particulièrement sensibles aux radiations solaires de longueur d'onde comprise entre (0.4 et 1 μ m) du spectre solaire; par contre les capteurs thermiques (séchoir, chauffe eau, etc.) sont plus sensibles aux rayonnements infra rouges, de plus, lorsque l'énergie solaire incidente (H_i) atteint le capteur, la surface peut absorber l'énergie (H_a), réfléchir (H_r) ou transmettre l'énergie incidente (H_t) de tel façon que : [30]

$$H_i = H_a + H_r + H_t \quad (\text{II-10})$$

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. On aurait alors, pour chaque longueur d'onde λ :

$$G_\lambda = G_{0\lambda} \times e^{-k_\lambda m} \quad (\text{II} - 11)$$

Avec :

k_λ coefficient d'atténuation

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

On définit la transmission monochromatique τ_λ par:

$$\tau_\lambda = G_\lambda / G_{0\lambda} = e^{-k_\lambda m} \quad (\text{II} - 12)$$

D'où l'absorption monochromatique sera :

$$\alpha_\lambda = 1 - \tau_\lambda \quad (\text{II} - 13)$$

Expérimentalement on mesure α_λ et on déduit k_λ : **[1]**

$$k_\lambda = (1/m) \cdot \text{Log} (1 - \alpha_\lambda) \quad (\text{II-14})$$

II-2-5- 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 et pour toutes les longueurs d'onde à cause de manque de données expérimentales on pose :

$$S_n = G_n^e \times e^{-k_0 m} \quad (\text{II-15})$$

Où : S_n : Puissance du rayonnement direct.

G_n^e : L'éclairement (en w/m^2) hors atmosphère. **[1]**

Avec : $k_0 = [9.4 + 0.9 \text{ m}]^{-1}$

II-2-6- Facteur de trouble total de LINKE :

Pour obtenir l'éclairement relatif à une atmosphère réelle, il est nécessaire de corriger la formule (II-15) en y introduisant un paramètre T nommé facteur de trouble total de Linke T. Ce facteur est le rapport entre l'extinction du rayonnement directe traversant une atmosphère de référence constituée uniquement d'air pur et sec sous la même incidence. On écrit:

$$S_n = G_n^e \times e^{-Tk_0m} \quad (\text{II-16})$$

G_n^e : rayonnement solaire hors atmosphère ; $G_n^e = 1367(1 + 0.033 \times \cos(\frac{360}{365} \times (n - 2)))$

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

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

h: hauteur du soleil ; $\sin h = \cos\phi \cos\delta \cos\omega + \sin\phi \sin\delta$

T: facteur de trouble total (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:

$$T = T^* + \Delta T \quad (\text{II-17})$$

Avec :

T^* facteur de trouble par ciel clair.

ΔT facteur de trouble additionnel du à la présence de nuages. [1]

II-2-6-1- Facteur de trouble par ciel clair :

Le facteur de trouble T^* par ciel clair est donnée par la relation suivante :

$$T^* = T_0 + T_1 + T_2 \quad (\text{II-18})$$

Où : z est l'altitude exprimée en km, T_0 correspond à l'absorption par vapeur d'eau :

$$T_0 = (2.4 - 0.9\sin\phi) + 0.1 (2 + \sin\phi).A_h - 0.2 z - (1.22 + 0.14A_h) (1 - \sin h) \quad (\text{II-19})$$

$$A_h = \sin\left(\frac{360}{365}(n - 121)\right)$$

T_1 correspond à la l'absorption par les gaz de l'atmosphère O_2 , CO_2 et O_3 et à la diffusion moléculaire de Rayleigh donnée par l'approche:

$$T_1 = (0.89)^z \quad (\text{II-20})$$

T₂ correspond à la diffusion (et à une légère absorption) par les aérosols rendant le bleu du ciel plus au moins blanchâtre, est donnée par : [1, 2, 14,32]

$$T_2 = (0.9 + 0.4 A_h) (0.63)^z \quad (\text{II-21})$$

II-2-6- 2- 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 (couverture nuageuse). Le trouble ΔT est lié à une grandeur nommée "fraction d'irradiation" notée S. 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^* , est donnée par la formule suivante : [1]

$$S = S_n / S_n^* \quad (\text{II-22})$$

$$\text{Avec : } S_n = g_n^e \times e^{-T k_0 m} \quad , \quad S_n^* = g_n^e \times e^{-T^* k_0 m}$$

Alors on obtient :

$$S = e^{k_0 m \Delta T} \quad (\text{II-23})$$

On trouve :

$$\Delta T = -\frac{1}{k_0 m} \log S \quad (\text{II-24})$$

II-3- Rayonnement solaire au niveau du sol :

Le spectre du rayonnement solaire à la surface de la Terre est constitué de différentes composantes (figure II-4). Le rayonnement direct est celui qui va directement du Soleil au plan, cette composante est nulle lorsque le soleil est caché par des nuages ou par un obstacle (bâtiment, masque lointain), le rayonnement diffus est celui qui parvient au plan incliné après avoir subi une ou plusieurs diffusions sur les constituants de l'atmosphère (molécules, aérosols, nuages) et le rayonnement réfléchi l'a été sur le sol avant d'arriver au plan, Cette composante est nulle sur un plan horizontal. [33]

La somme de trois composantes (ou deux si le plan est horizontal) est appelée le rayonnement global.

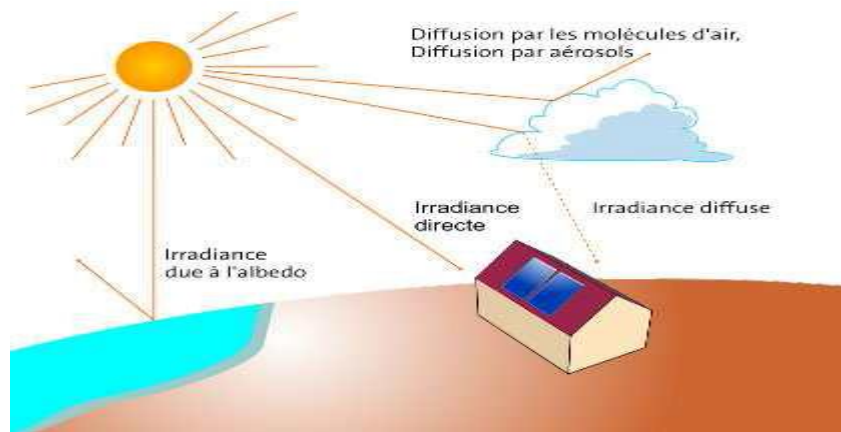


Figure (II-4) : Composantes du rayonnement solaire au niveau du sol [1]

II-3-1- Le gisement solaire en Algérie :

Le gisement solaire est un ensemble de données décrivant l'évolution du rayonnement solaire disponible au cours d'une période donnée. Il est utilisé pour simuler le fonctionnement d'un système énergétique solaire et faire un dimensionnement le plus exact possible compte tenu de la demande à satisfaire.

L'Algérie dispose d'un gisement solaire énorme à cause de sa situation géographique comme le montre la figure (II-5) :

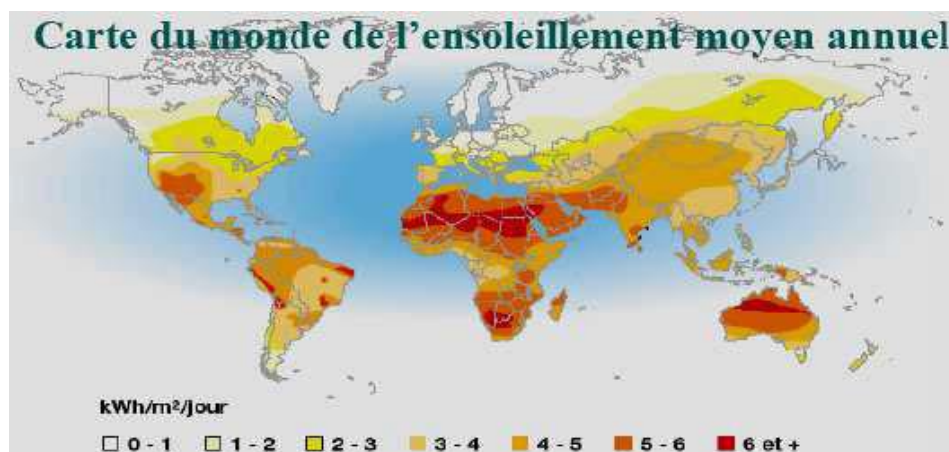


Figure (II-5) : Carte du monde de l'ensevelissement moyen annuel [17]

Suite à une évaluation par satellites, l'Agence Spatiale Allemande (ASA) a conclu, que l'Algérie représente le potentiel solaire le plus important de tout le bassin méditerranéen. La durée d'insolation dans le Sahara algérien est de l'ordre de 3500h/an est la plus importante au monde, elle est toujours supérieure à 8h/j et peut arriver jusqu'à 12h/j pendant l'été à l'exception de l'extrême sud où elle baisse jusqu'à 6h/j en période estivale.

La région d'Adrar est particulièrement ensoleillée et présente le plus grand potentiel de toute l'Algérie figure (II-6) : [5,12]

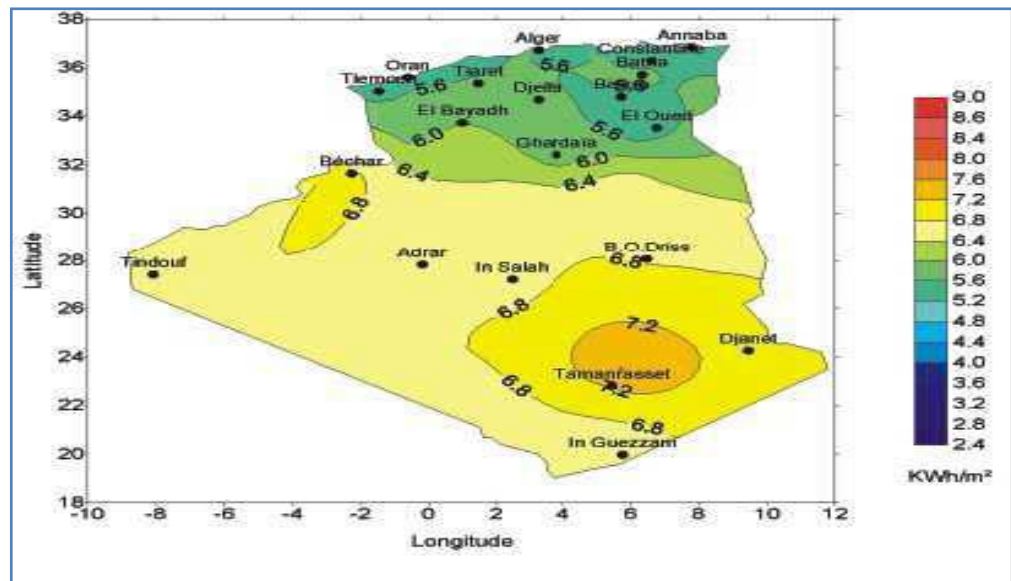


Figure (II-6) : Moyenne annuelle de l'irradiation solaire globale reçue sur un plan incliné à latitude du lieu [17]

- **Notation:**

L'irradiance solaire est la puissance du rayonnement solaire par unité de surface. Elle s'exprime en W/m^2 .

L'irradiation solaire est l'énergie du rayonnement solaire sur un intervalle de temps déterminé. Elle s'exprime en J/m^2 et en kWh/m^2 . Alors l'irradiation C'est l'intégrale de la puissance arrivant sur un plan caractérisé par son orientation et son inclinaison. [1]

II-3-2- Modèles de calcul du rayonnement solaire :

II-3-2-1- Modèle de Perrin de Brichambaut :

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.

a- Eclairage reçue sur un plan horizontal par ciel clair :

La connaissance de facteur de trouble de Link est nécessaire pour déterminer les éclairages par ciel claire. Eclairage solaire direct pour ciel clair obtenu sur un plan horizontal est donné par la formule suivante : [2, 5, 34]

$$S_h = G_n^e \sin h \exp\left(-\frac{T^*}{0.9 + \frac{9.4}{(0.89)^z} \sinh}\right) \quad (II - 25)$$

Eclairage solaire diffus sur un plan horizontal est donné par la formule suivante :

$$D_h = G_n^e \exp(-1 + 1.06 \log(\sin h) + a - \sqrt{a^2 + b^2}) \quad (II - 26)$$

Avec : $a=1.1$

$$b = \log(T^* - T_0) - 2.8 + 1.02(1 - \sin h)^2$$

Eclairage global est donné par la formule suivante :

$$G_h = S_h + D_h \quad (II - 27)$$

b- Eclairage solaire reçue sur un plan incliné par ciel clair:

L'irradiation directe est la projection de directe normale sur un plan incliné :

$$S_i = G_n^e \cos(i) \exp\left(-\frac{T^*}{0.9 + \frac{9.4}{(0.89)^z} \sinh}\right) \quad (II - 28)$$

L'irradiation diffusée sur un plan incliné est composé de trois parties :

-Diffus du ciel :

Il est composé de trois parties :

✓ Composante directe ou circumpolaire :

Elle provient du voisinage du soleil dans un cône de demie angle égal au sommet compris entre 3° et 15° on peut dire qu'elle provient exactement du soleil. [1,2]

$$d_d = G_n^e \exp(-2.48 + \sin h + a - \sqrt{a^2 + 4b^2}) \quad (II - 29)$$

Avec :

$$b = \log(T^* - T_0) - 2.8 - 0.5 \log(\sin h), \quad a = 3.1 - 0.4b$$

✓ **Composante isotrope :**

Elle correspond à un ciel de luminance uniforme. [1, 2,13]

$$d_i = D - d_a \sin h \quad (II - 30)$$

Avec :

$$D = G_n^e \exp(1.06 \log(\sin h) + a - \sqrt{a^2 + b^2})$$

$$b = \log(T^* - T_0) - 2.8 + 1.02(1 - \sin h)^2$$

$$a = 1.1$$

✓ **Composante du cercle de l'horizon :**

Elle est associée à une accumulation d'aérosols dans les basses couches atmosphériques. [1,2]

$$d_h = G_n^e \frac{-0.02}{a^2 + ab + 1.8} \exp(\sin h) \quad (II - 31)$$

Avec : $b = \exp(0.2 + 1.75 \log(\sin h))$, $a = \log(T^* - T_0) - 3.1 - \log(\sin h)$

Le rayonnement diffus incident en provenance du ciel d1 est donné par : [1, 2, 35]

$$d_1 = d_a \cos i + d_i \left(\frac{1 + \sin \gamma}{2} \right) + d_h \cos \gamma \quad (II - 32)$$

- **Le diffus du sol :**

L'albédo du sol ρ caractérise la réflexion de la lumière incidente, l'albédo d'une surface c'est le rapport de la puissance réémise à la puissance reçue du rayonnement solaire. Une surface blanche est caractérisée par un albédo voisin de 1 tandis qu'une surface noir son albédo est très faible et avoisine le zéro. L'albédo du sol intervient souvent; il varie avec sa nature, son couvert végétal et son état d'humidité. Pour un plan quelconque (α, γ) , [2, 30]

$$d_2 = \rho G_h \left(\frac{1 - \sin \gamma}{2} \right) \quad (II - 33)$$

Avec : $\rho = \frac{\text{rayonnement global réfléchi}}{\text{rayonnement global incident}}$

- **Diffusion rétrodiffusée :**

Le diffus du sol est rétrodiffusé 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 rétrodiffusion donnée par la formule : [2]

$$d_3 = 0.9(\rho - 0.2) G_h \exp\left(-\frac{4}{\sqrt{T^* - T_0}}\right) \quad (II - 34)$$

L'irradiation diffusée sur un plan incliné est donnée par la formule suivante : [1, 2, 35]

$$D_i = d_1 + d_2 + d_3 \frac{1 + \sin \gamma}{2} \quad (II - 35)$$

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

$$G_i = S_i + D_i \quad (II - 36)$$

II-3-2-1-1- Modèle de Perrin de Brichambaut simplifié pour la puissance du rayonnement solaire sur le plan horizontal par ciel clair :

Pour un ciel clair, les puissances du rayonnement direct S_h diffus d_h et global G_h sur un plan horizontal sont données par les relations suivantes : [1,5]

$$G_h = S_h + D_h \quad (II - 37)$$

$$S_h = A \times \sin(h) \times \exp\left(\frac{-1}{C \sin(h+2)}\right) \quad (II - 38)$$

$$D_h = B \times \sin(h)^{0.4} \quad (II - 39)$$

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

Tableau (II-1): valeurs des constantes A, B et C :

Etat de l'atmosphère	A	B	C
Ciel bleu foncé	1300	87	6
Ciel bleu clair	1230	125	4
Ciel bleu laiteux	1200	187	2.5

II-3-2-1-2- Modèle de Perrin de Brichambaut simplifié pour la puissance du rayonnement solaire sur un plan incliné par ciel clair :

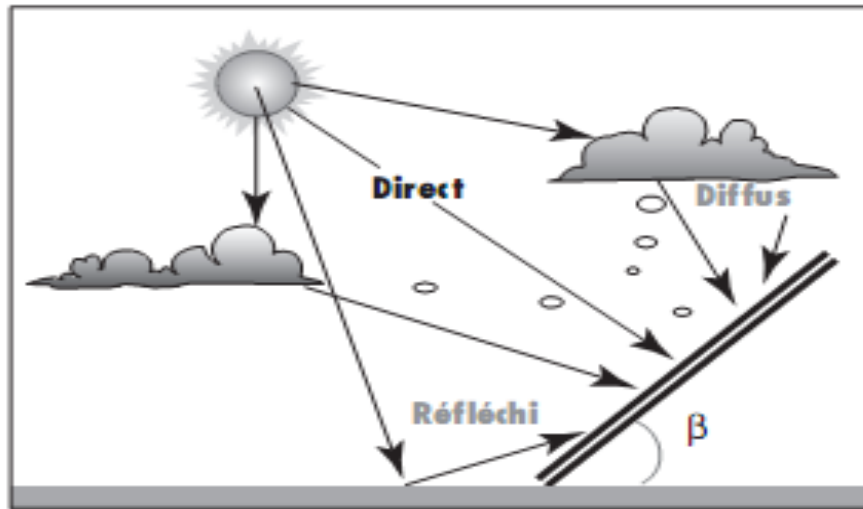


Figure (II-7): Les composantes du rayonnement solaire reçues par un plan incliné. [33]

Pour un ciel clair, les puissances du rayonnement direct S_i diffus d_i et global G_i reçue par un capteur (α, γ) incliné de β par rapport au plan horizontal sont données par les relations suivantes : [2]

$$S_i = A \cos(i) \times \exp\left(\frac{-1}{C \sin(h+2)}\right) \tag{II - 40}$$

$$D_i = \left(\frac{1 + \cos(\beta)}{2}\right) \times D_h + \left(\frac{1 - \cos(\beta)}{2}\right) \times \sigma \times G_h \tag{II - 41}$$

$$G_i = S_i + D_i \tag{II - 42}$$

$$\begin{cases} D_h = B(\sin(h))^{0.4} \\ G_h = A''(\sin(h))^{B''} \end{cases} \tag{II - 43}$$

D_h : éclairement diffus reçus par une surface horizontale.

G_h : éclairement global reçus par une surface horizontale.

σ : l'albédo du sol (coefficient de réflexion du sol).

$$\sigma = \begin{cases} 0.9 \text{ à } 0.8 & \text{neige} \\ 0.8 \text{ à } 0.4 & \text{sol clair} \\ 0.4 \text{ à } 0.2 & \text{verdures} \end{cases}$$

A, B, C, A'' et B'' : sont des constantes qui dépendent de l'état de l'atmosphère. [2]

Tableau (II-2) : valeurs des coefficients A, B, C, A'' et B''

Etat de l'atmosphère	A	B	C	A''	B''
Ciel bleu foncé	1300	87	6	1150	1.15
Ciel bleu clair	1230	125	4	1080	1.22
Ciel bleu laiteux	1200	187	2.5	990	1.25

II-3-2-1-3- Estimation de l'énergie instantanée (ciel couvert) :

Le ciel couvert est un ciel gris totalement remplis de couches nuageuses continues, plus ou moins denses optiquement, et au travers desquelles il n'est pas possible de distinguer le disque solaire. Dans ces conditions, le rayonnement direct est inexistant et le rayonnement global ne se compose que de rayonnement diffus.

Si la couverture nuageuse est homogène, on peut considérer que le rayonnement diffus de ciel est isotrope de même que le rayonnement diffus du sol.

Le rayonnement global par un ciel couvert est donné par la relation suivante :

$$G_i' = D_i' = K_t \times G_i (1 + 0.3 \sin^2(\theta)) \quad (\text{II-44})$$

K_t : Coefficient dépend de l'état du ciel avant d'être recouvert par les nuages.

$K_t = 0.6$ pour un ciel bleu foncé, $K_t = 0.3$ pour un ciel bleu claire, $K_t = 0.6$ pour un ciel bleu laiteux. [2]

II-3-2-2- Modèle de HOTTEL et LIU JORDAN :

Le modèle le plus ancien et le plus simple à utiliser pour la modélisation de la radiation solaire sur plan incliné étant le modèle de Liu et Jordan (1963).

Le rayonnement solaire global incident sur un plan incliné d'un angle β par rapport à l'horizontal représente G_i la somme de trois composantes directe S_i , diffuse D_i et réfléchiée par le sol D_{ri} : [42]

$$G_i = S_i + D_i + D_{ri} \quad (\text{II} - 45)$$

- Composante directe :

L'éclairement solaire direct incident sur plan incliné, est calculé à partir de l'éclairement solaire direct normal en utilisant l'angle d'incidence solaire i .

$$S_i = S_n \cos i \quad (II - 46)$$

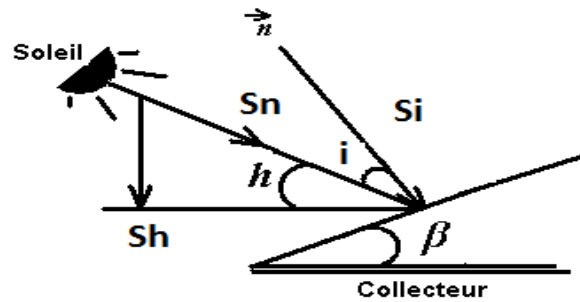


Figure (II-8): Eclairement solaire direct sur plans horizontal et incliné. [42]

L'éclairement solaire direct normal S_n est lié à l'éclairement direct horizontal S_h à travers la hauteur du soleil h par l'expression :

$$S_h = S_n \sin h \quad (II - 47)$$

L'éclairement direct sur plan incliné en fonction du R_b facteur de modification géométrique du rayonnement direct. [32, 35, 36]

$$S_i = S_h \times \frac{\cos i}{\sin h} = S_h \times R_b \quad (II - 48)$$

Avec :

$$R_b = \frac{\cos(\varphi - \beta) \times \cos \delta \times \cos \omega_s + \sin(\varphi - \beta) \times \sin \delta \times \omega_s}{\cos \varphi \times \cos \delta \times \cos \omega_c + \sin \varphi \times \sin \delta \times \omega_c} \quad (II - 49)$$

Avec : β angle d'inclinaison, ρ : albédo du sol,

ω_c : Angle horaire du coucher du soleil sur le plan horizontal.

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

ω_s : Angle horaire du coucher du soleil sur un plan incliné

$$\omega_s = \text{Min} [\omega_c, \arccos (-\text{tg} (\varphi - \beta) \text{tg} (\delta))] \quad [1]$$

Pour un ciel clair en présence de l'atmosphère, l'estimation de S_h à partir de la corrélation de Hottel est donnée en fonction de la variation de la distance terre-soleil C_{t-s} et la transmittance de l'atmosphère au rayonnement direct τ_b :

$$S_h = G_n^e \sin h \tau_b \quad (II - 50)$$

$$\text{Où: } G_n^e = 1367(1 + 0.034 \times \cos^2(\frac{360}{365}(n - 2))) = 1367 \times C_{t-s}$$

La transmittance de l'atmosphère est exprimée en fonction de l'altitude z , la trajectoire optique $(\sin h)^{-1}$ et le facteur d'extinction k par l'expression : [42]

$$\tau_b = a_0 + a_1 \exp\left(\frac{-r_k k}{\sin h}\right) \quad (II - 51)$$

Avec : $a_0 = a_0^* r_0$, $a_1 = a_1^* r_1$, $k = k^* r_k$

$$a_0^* = 0.4237 - 0.00820 (6 - z)^2, \quad a_1^* = 0.5055 + 0.00595(6.5 - z)^2$$

$$k^* = 0.2711 + 0.00858(2.5 - z)^2, \quad z = 0.264 \text{ Km}, \quad r_0 = 1.03, r_1 = 1.01, r_k = 1.$$

- Composante diffuse :

L'éclairement solaire diffus incliné est proportionnel à l'éclairement D_h . Le facteur de proportionnalité étant le facteur de forme entre la voûte céleste et le plan incliné $\left(\frac{1+\cos\beta}{2}\right)$:

$$D_i = D_h \times \left(\frac{1 + \cos\beta}{2}\right) \quad (II - 52)$$

Avec :

$$D_h = G_n^e \sin h \tau_d \quad (II - 53)$$

La transmittance du rayonnement solaire diffus τ_d est donnée en par l'approximation linéaire en fonction de la transmittance du rayonnement solaire direct sous la forme:[42]

$$\tau_d = 0.271 - 0.294 \tau_b \quad (II - 54)$$

- **Composante réfléchi :**

L'éclairement réfléchi par le sol D_{ri} est proportionnel à l'éclairement global horizontal

$$G_h = S_h + D_h.$$

$$D_{ri} = (S_h + D_h) \times \left(\frac{1 - \cos\beta}{2} \right) \times \rho \quad (II - 55)$$

Avec : ρ l'albédo du sol et $\left(\frac{1 - \cos\beta}{2} \right)$ le facteur de forme entre le sol et le plan incliné. [42]

II-3-2-2-1- Modèle de Liu Jordan simplifié pour la puissance du rayonnement solaire sur un plan incliné par ciel clair :

L'éclairement direct sur plan incliné en fonction du R_b facteur de modification géométrique du rayonnement direct.

$$S_i = S_h \times \frac{\cos\theta_z}{\sin\theta_z} = S_h \times R_b \quad (II - 56)$$

L'éclairement solaire diffus incliné est proportionnel à l'éclairement D_h :

$$D_i = D_h \times \left(\frac{1 + \cos\beta}{2} \right) \quad (II - 57)$$

L'éclairement réfléchi par le sol D_{ri} est proportionnel à l'éclairement global horizontal

$$D_{ri} = (S_h + D_h) \times \left(\frac{1 - \cos\beta}{2} \right) \times \rho \quad (II - 58)$$

Les deux composantes du rayonnement solaire global sur un plan horizontal, sont estimées comme suit:

Rayonnement direct:

$$S_h = A \times \sinh \times \exp\left(\frac{-1}{C \times \sin(h + 2)}\right) \quad (II - 59)$$

Rayonnement diffus :

$$D_h = B \times (\sinh)^{0.4} \quad (II - 60)$$

Où A, B et C sont données d'après le tableau suivant : [32, 35, 36]

Tableau (II-3) : valeurs des coefficients A, B et C

Nature du ciel	A	B	C
Ciel très clair	1300	87	6
Ciel moyen	1230	125	4
Ciel pollué	1200	187	5

II-3-3- La fraction d'insolation :

C'est une grandeur mesurable dès qu'on connaît les durées d'insolation enregistrées par l'héliographe et qui s'en déduit par le rapport : **[15]**

$$\sigma = \frac{D}{D_0} \quad (II - 61)$$

Avec :

σ : Fraction d'insolation quotidienne.

D : Durée d'insolation mesurée ou le temps durant lequel le soleil a brillé.

D_0 : Durée maximale d'insolation ou durée astronomique du jour ; c'est l'intervalle entre le lever et le coucher du soleil.

La fraction d'insolation mensuelle notée $\bar{\sigma}$ est la moyenne des fractions d'insolation quotidienne pour un mois donné. **[1]**

$$\bar{\sigma} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sigma_i \quad (II - 62)$$

Avec:

σ_i : pour un jour donné

n : nombre de jours du mois

On appelle "jour clair" un jour pour le quel $\sigma = 1$.

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

II-3-4- 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. **[1]**

a- Formule de Black

Dans cette formule c'est le global hors atmosphère horizontal H_h^e qui est pris en référence il est relié au global sur une surface horizontale pour un jour quelconque par une fonction linéaire en fonction de la fraction d'insolation. La formule est la suivante :

$$\frac{H_h}{H_0} = a_0 \sigma + b_0 \quad (\text{II} - 63)$$

Les coefficients a_0 et b_0 ne sont pas constants, ils varient avec la date et le lieu sont déterminés pour chaque lieu. [1]

- Indice de clarté :

Liu et Jordan, caractérisent l'état du ciel par un rapport qui représente les irradiances globales en présence de l'atmosphère au les irradiances extraterrestres globales; sur une surface horizontale, ce rapport est appelé indice de clarté.

L'indice de clarté journalière K_t , est le rapport des irradiances journalières sur une surface horizontale au les irradiances journalières extraterrestres pour le même jour est exprimé par : [9, 19, 38]

$$K_t = \frac{H_h}{H_0} \quad (\text{II} - 64)$$

Avec :

H_h : Irradiances journalières sur une surface horizontale.

H_h^e : Irradiances journalières extraterrestres horizontale.

Nous avons défini trois intervalles :

Intervalle 1 : $K_t \leq 0.35$ L'irradiation solaire directe est pratiquement nulle. Par conséquent, la valeur de l'irradiation solaire diffuse tend vers celle du global et l'état du ciel est défini comme totalement couvert.

Intervalle 2 : $0.35 \leq K_t \leq 0.65$ Dans cet intervalle coexiste les rayonnements direct et diffus, dans ce cas, l'état du ciel est défini comme partiellement nuageux.

Intervalle 3: $K_t \geq 0.65$ dans cet intervalle, le rayonnement solaire global est composé essentiellement du direct. Dans ce cas la nébulosité est minimale et l'état du ciel est clair. [39]

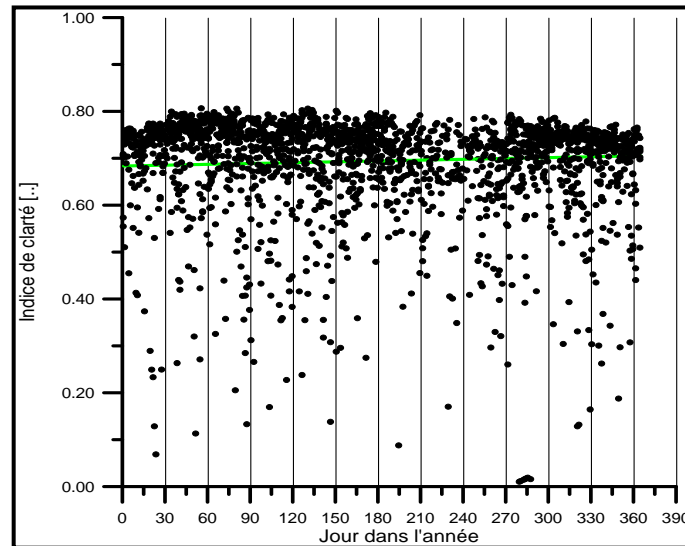


Figure (II-9): Indice de clarté du site d'Adrar [42]

b- 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 : [1]

$$\frac{H_h}{H_0} = a \sigma + b \quad (II - 65)$$

Avec :

H_h : l'énergie globale sur un plan horizontal pour un jour clair.

$$a \approx 1 - b$$

Selon Michel Capderou les coefficients a et b peuvent être constants pour tous les lieux. Ils prennent comme valeurs: [1]

$$a = 0.58, b = 0.41.$$

c- Relation entre le diffus H_d et σ :

L'expérience montre que le diffus peut se relier à la fraction d'insolation moyenne pour $\sigma > 0.2$ par la relation suivante : [1]

$$\frac{H_d}{H_h} = a_1 \sigma + b_1 \quad (II - 66)$$

Avec: $a_1 = -0.35, b_1 = 0.53$

La fraction diffuse du rayonnement solaire global $\frac{H_d}{H_h}$ peut s'établir dans trois (03) régions ou intervalles de K_t :

Pour de très faibles valeurs de K_t la valeur de $\frac{H_d}{H_h}$ se rapproche de l'unité, cette région de K_t est à ciel complètement couvert. Au-delà de cette région, le rapport décroît significativement jusqu'à atteindre son minimum (cette région étant considérée partiellement couverte) et se stabilise relativement pour des valeurs de K_t proches de 1 (région à ciel clair). Les intervalles limites de K_t pour ces valeurs diffèrent d'un auteur à un autre. Les limites utilisées de K_t sont :

$$0 \leq K_t \leq 0.175, \quad 0.175 \leq K_t \leq 0.87, \quad 0.87 \leq K_t. \quad [40]$$

II-3-5- Appareils de mesure :

II-3-5-1-L'héliographe:

L'héliographe c'est un appareil simple mesure la durée d'insolation (les périodes de la journée pendant lesquelles l'intensité du rayonnement direct est supérieur à 120 W/m²).

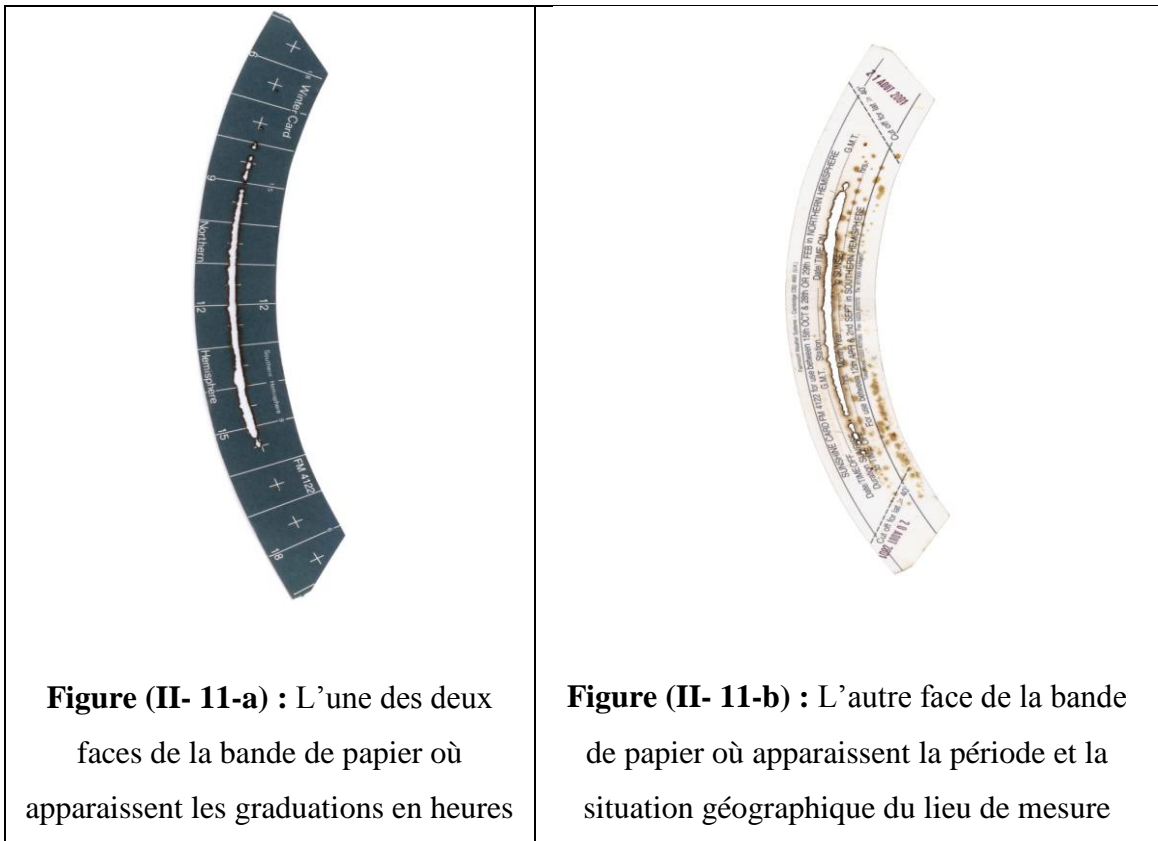
Il y a actuellement plusieurs types d'héliographes dont :

- **L'héliographe Campbell-Stokes : [15]**

C'est le premier héliographe qui fut inventé par J.F Campbell en 1853 et amélioré par G.G. Stokes en 1879. Il est constitué d'une boule de cristal de dix centimètres de diamètre, exposée au soleil, faisant effet de lentille concentrant le rayonnement infrarouge du soleil, tout en l'atténuant plus qu'une loupe, de manière à brûler une bande de papier rigide spécial placée à une distance judicieuse sous la boule sur un support incurvé. Le support de papier permet de déplacer ce dernier en fonction de la saison, c'est-à-dire de la hauteur maximale du soleil au dessus de l'horizon. La lumière brûle le papier au fur et à mesure du déplacement du point focal, tant que le soleil brille. La bande de papier est graduée en heures, ou plus finement. Le papier ne brûle pas tant que la limite d'insolation n'a pas été atteinte, c'est la raison pour laquelle la mesure en hiver est imprécise et lorsque le soleil est filtré par des nuages qui bloquent rayons infrarouge. Le système ne fonctionne pas, également, à l'aube et au couchant où l'infrarouge est filtré par l'atmosphère. D'autre part, une graduation des molettes permette de régler l'inclinaison du support en fonction de la latitude du point où est installé l'héliographe. La bande est aussi valable pour des périodes différentes de l'année et en fonction de l'hémisphère où est installé l'héliographe.



Figure (II-10) : Héliographe de Campbell-Stokes [1]



II-3-5-2- Le pyranomètre :

Le pyranomètre mesure le rayonnement Global (direct et diffus) de tout l'hémisphère céleste dans la bande de longueur d'onde 0.3 à 3 μm .

Un pyranomètre comprend deux anneaux concentriques en argent, une thermopile et un système d'enregistrement de la force électromotrice. Quand l'instrument est exposé à la radiation solaire, une différence de température mesurée entre les anneaux noirs et les anneaux blancs. Cette différence de température est détectée par la thermopile qui convertie l'énergie thermique en énergie électrique. Ce courant est de l'ordre du mv, il est converti par un facteur de calibrage en un flux en W/m^2 . Pour mesurer uniquement le rayonnement diffus c'est-à-dire éliminer le rayonnement direct, on ajoute un cache (bande métallique circulaire) orienté suivant la saison pour suivre la déclinaison et cacher le disque solaire.



Figure (II- 12-a) : Un pyranomètre pour la mesure du rayonnement solaire global



Figure (II-12 -b) : Un pyranomètre bande pare-soleil pour la mesure du rayonnement solaire diffus, où l'ombre de la bande apparaît sur la demi-sphère de l'instrument [1]

II-3-5-3- Le pyréliomètre :

Le pyréliomètre mesure le rayonnement direct, il comporte un disque noir placé à la base d'un tube dont l'axe est aligné avec la direction des rayons solaires. Le rayonnement direct est nul lorsque le soleil est occulté par les nuages.

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



Figure (II-13) : Un pyréliomètre pour la mesure du rayonnement solaire direct [7]

II-3-5-4- L'albédomètre :

L'albédomètre est formé de deux pyranomètres identiques opposées : un dirigé vers le haut (ciel) l'autre vers le bas (terre), le premier qui est dirigé vers le haut mesure le rayonnement global (direct+diffus) incident sur le sol et le deuxième qui est dirigé vers le bas mesure le rayonnement global réfléchi par le sol.

L'albédo présente la fraction du rayonnement global réfléchi par le sol par rapport au rayonnement global incident. Il est possible d'obtenir le rayonnement net en calculant la différence entre le rayonnement global incident et le rayonnement global réfléchi.



Figure (II-14) : L'albédometre pour la mesure de l'albèdo du sol [7, 41]

II-3-5-5- Chaîne de mesure :

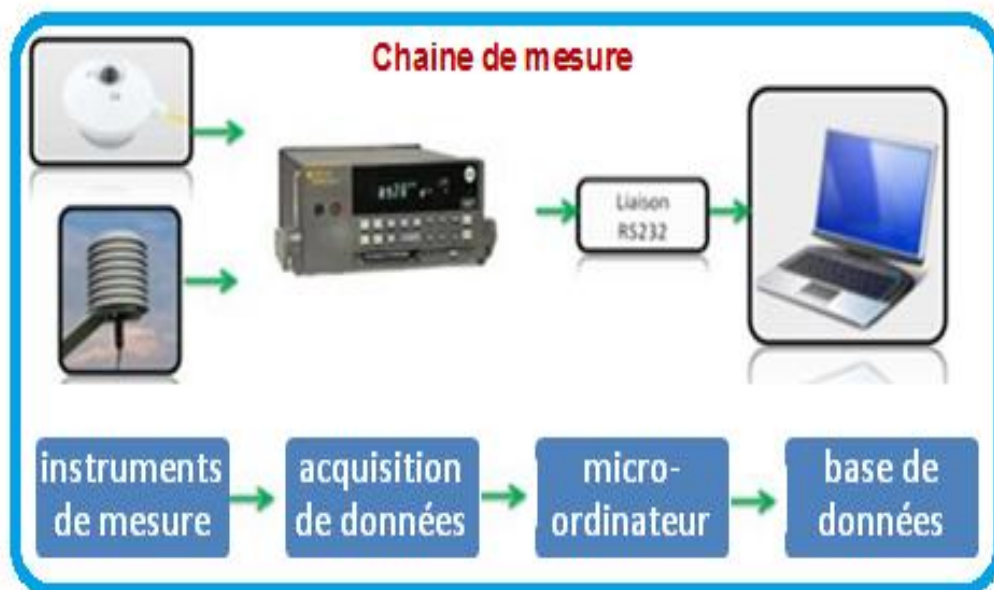


Figure (II-15) : Chaîne de mesure

La chaîne de mesure utilisée au niveau de l'Unité de Recherche en Energies Renouvelables URER en Milieu Saharien (URER.MS).

II-4- 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 fonction exponentielle décroissante de la masse atmosphérique. Cette loi est valable pour une atmosphère de référence, et pour passer de ce dernier 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.

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

Chapitre III

Modélisation de l'irradiation Solaire à ciel clair

III- Application et vérification des modèles du rayonnement solaire :**III-1- Introduction :**

Ce chapitre reprend l'essentiel des travaux de modélisation et de validation de l'irradiation solaire incidente sur plans horizontal, incliné plein sud à la latitude du lieu d'Adrar et selon un calage optimal. Les composantes du rayonnement solaire annuel sur site d'Adrar sont d'une part analysées à partir de la base de données et de l'autre part sont prédites par le modèle de Berichambaut est validées par voie expérimentale. Il y a lieu de signaler que la base de données est fournie par l'Unité de Recherche en Energie Renouvelable en Milieu Saharien d'Adrar (URERMS), rattachée au Centre de Développement des Energies Renouvelables (CDER) de Bouzareah.

III-2- Situation radiométrique et météorologique du site d'Adrar

Le site expérimental est une (URERMS), rattachée au (CDER), situé au Sud Ouest d'Algérie à 27.88° de latitude Nord, 0.18° de longitude Ouest, à 264 mètre d'altitude. Il est caractérisé par un terrain sableux d'albédo 0.35 et un ciel clair marqué par un indice de clarté supérieur à 0.65. L'insolation récoltée dépasse les $6\text{kW}/\text{m}^2/\text{jour}$ sur une durée moyenne qui dépasse les 9 h/jour.

III-3- Application des modèles radiométriques et météorologiques:

Les principes physiques et géométriques généraux relatives aux fractions solaires incidentes et les modes de captation des irradiances solaires sont repris en détail et appliqués au site d'Adrar pour caractériser la radiation solaire incidente.

III-3-1-Durée du jour :

L'équation (I-15), donne la durée astronomique du jour du site d'Adrar en fonction du numéro de jour de l'année figure (III-1).

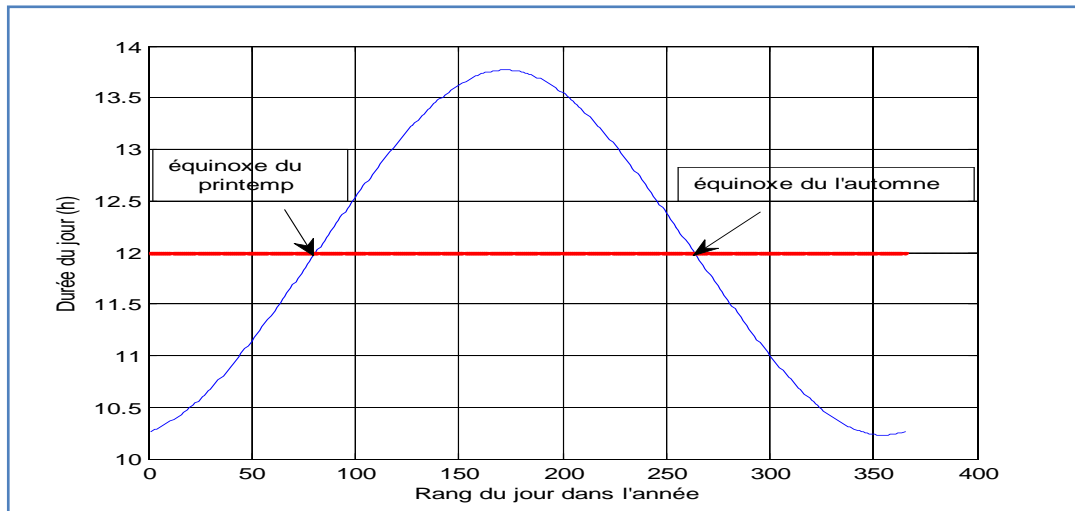


Figure (III-1) : Variation de la durée du jour en fonction du rang du jour dans l'année

La durée du jour au solstice d'été est 13.77 heures. La durée du jour au solstice d'hiver est 10.23 heures. Aux équinoxes du printemps et de l'automne la durée du jour est égale à celle de la nuit c'est 12 heures.

III-3-2- Influence de la latitude sur la durée du jour :

On a tracé la variation de la durée du jour au cours de l'année pour différentes latitudes, on trouve 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.

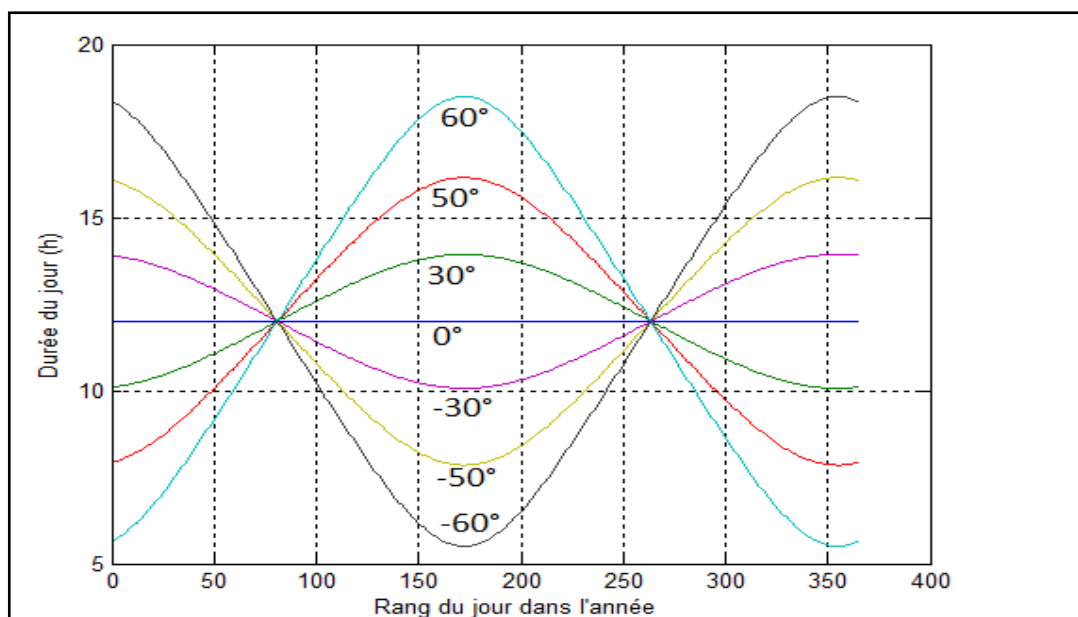


Figure (III-2) : Variation de la durée du jour durant l'année pour différentes latitudes

III-4- Evaluation du rayonnement solaire global extraterrestre :

L'irradiation globale extraterrestre est évaluée au niveau de la haute atmosphère. Le flux solaire sur un plan normal hors atmosphère représente la constante solaire égale à 1367 W/m^2 . Dans cette partie on va évaluer ce type de rayonnement pour le site d'Adrar, sur une surface horizontale et sur une surface orienté plein sud et incliné à la latitude du lieu :

III-4-1- Irradiation solaire sur plan horizontal :

Les irradiances extraterrestres journalières $H_0 [\text{kWh/m}^2]$ reçue sur une surface horizontale sont données par la formule suivante. [11,42]

$$H_0 = 1.367 \times \frac{24}{\pi} \left(\frac{\pi}{180} \omega_L \sin \varphi \sin \delta + \sin \omega_L \cos \varphi \cos \delta \right) \quad (\text{III-1})$$

III-4-2- Irradiation solaire sur plan incliné :

La radiation solaire sur un plan orienté plein sud et incliné selon la latitude du site d'Adrar, est donnée par la formule suivante : [11,42]

$$H_0 = 1.367 \times \frac{24}{\pi} (\cos \delta \sin \omega) \quad (\text{III-2})$$

Les résultats de calcul du rayonnement extraterrestre sur un plan horizontal et sur un plan incliné à la latitude du lieu d'Adrar et orienté plein sud sont donnés par les **Figure (III-3)** et **Figure (III-4)** ci-dessous :

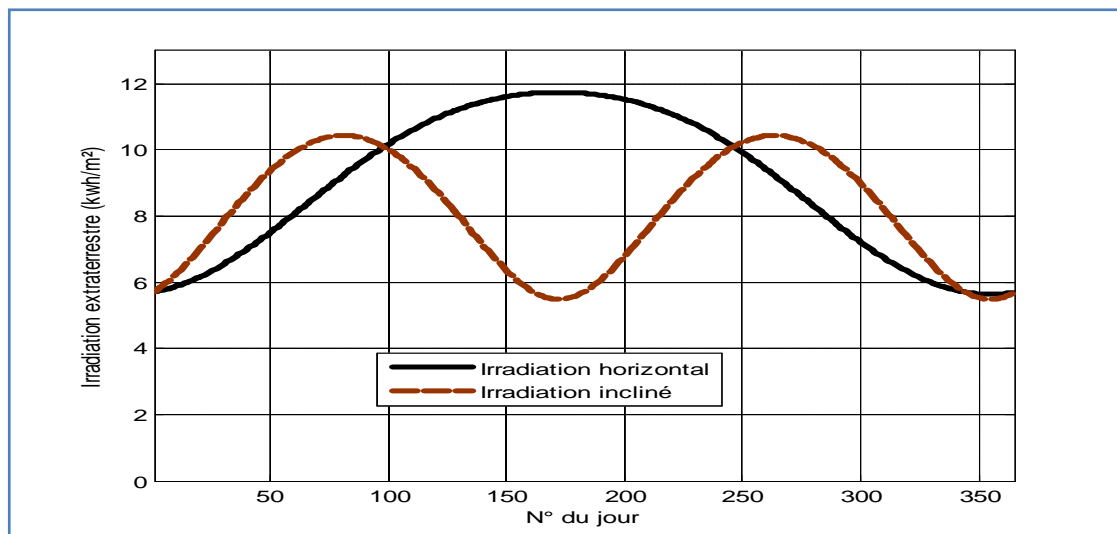


Figure (III-3) : Comparaison du rayonnement extraterrestre sur un plan horizontal et sur un plan incliné à latitude du site d'Adrar

La **figure (III-3)** illustre les caractéristiques du rayonnement solaire horizontal et incliné extraterrestre du site d'Adrar montre que :

- La radiation solaire extraterrestre sur un plan horizontal varie dans de grandes limites au cours de l'année 5,64 kWh/m²/j et 11,75 kWh/m²/j. Le maximum est obtenu en solstice d'été le (21 juin) qui est égale à 11,75 kWh/m²/j et le minimum est obtenu en solstice d'hiver le (21 décembre) 5,64 kWh/m²/j.
- La radiation solaire extraterrestre sur plan incliné varie dans de grandes limites 5,5 kWh/m²/j et 10,5 kWh/m²/j. Elle présente deux maximums aux équinoxes, l'un en (21 mars) et l'autre en (21 septembre) ainsi que deux minimums aux solstices l'une le 21 décembre, et l'autre le 21 juin.
- La somme annuelle des irradiations extraterrestres sur un plan horizontale est de **3270** kWh/m². Elle est plus grande que celle sur un plan incliné **2965** kWh/m². Le modèle ne reflète pas la réalité, car dans la réalité c'est le contraire qui est vrai.
- Pour récolter le maximum d'énergie au cours de l'année comme montre la **figure (III-4)**, il faut opter par exemple pour deux orientations selon les saisons en deux grandes périodes: On admet une orientation sur un plan horizontal entre avril et septembre. Et une orientation inclinée à la latitude du lieu le reste de l'année (octobre-mars).
- Le maximum d'énergie solaire qui peut être récolté au cours de l'année **figure (III-4)**, en utilisant les deux orientations est environ **3500** kWh/m² qui représente une augmentation de **7.03%** par rapport à l'horizontal et **18.04%** par rapport à l'incliné.

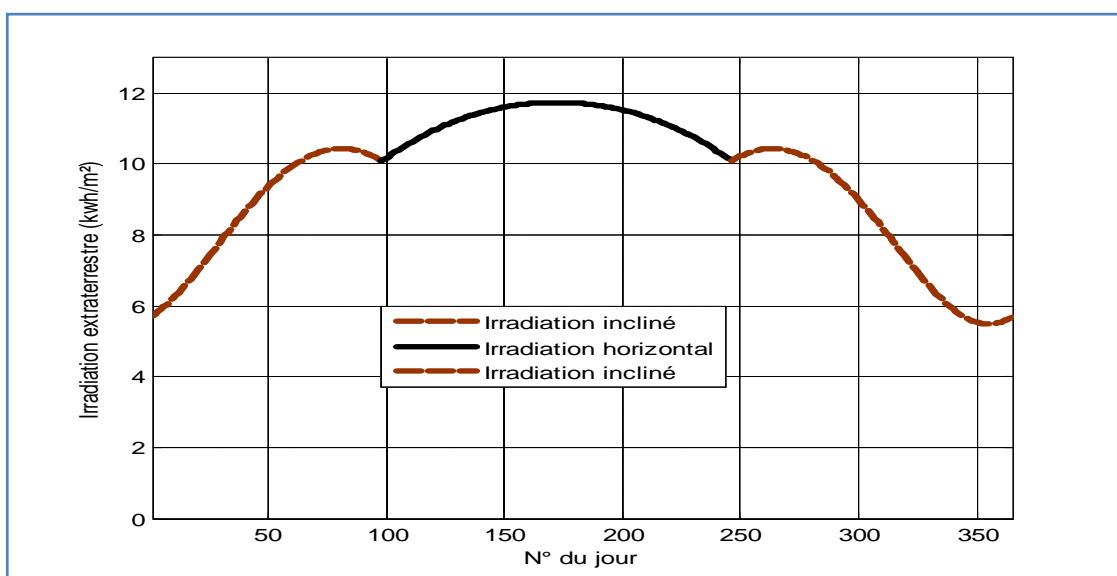
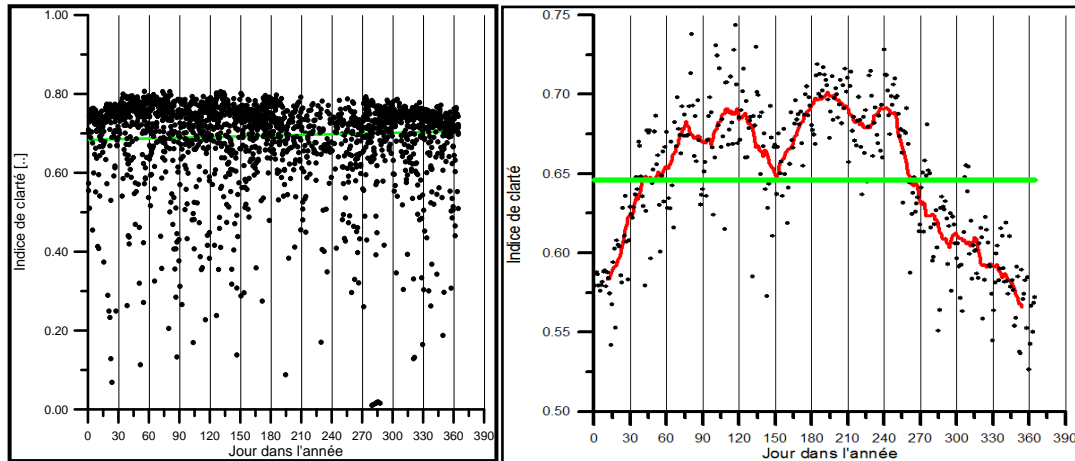


Figure (III-4) : Maximisation du rayonnement extraterrestre par deux orientations annuelles

III-5- Estimation du rayonnement solaire par ciel clair :

Pour la caractérisation radiométrique à ciel clair on a choisi le modèle de **Ch. Perrin de Brichambaut**, pour modéliser l'irradiation solaire horizontale et inclinée à la latitude du lieu plein sud sur site marqué par un indice de clarté supérieur à 65%.



(a) D'après site d'expérimental (URER)

(b) D'après la NASA

Figure (III-5) : Indice de clarté du site d'Adrar. [42]

III-5-1-Estimation de l'irradiation horizontale par ciel clair:

Le rayonnement solaire global H , direct H_s et diffus H_d est donné en fonction du facteur de trouble atmosphérique T_L , le rayonnement extraterrestre H_0 , la latitude du lieu d'Adrar (φ) et la déclinaison solaire δ pour le site d'Adrar :

$$H_s = H_0 \exp \left[\frac{-T_L}{7.5} \cos(\varphi - \delta)^{-0.75} \right] \quad (III - 3)$$

$$H_d = H_0 \left[\frac{T_L}{31.6} \cos(\varphi - \delta)^{-0.5} \right] \quad (III - 4)$$

$$H = H_s + H_d \quad (III - 5)$$

La **figure (III-6)** représente les résultats de calcul des différentes composantes du rayonnement solaire au cours de l'année pour le site d'Adrar sur une surface horizontale:

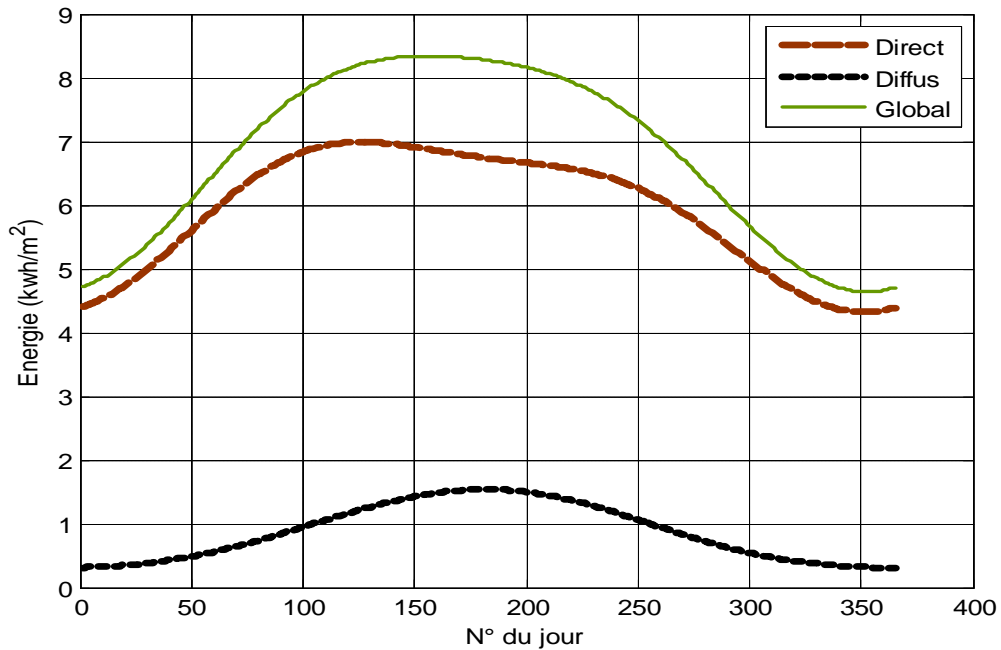


Figure (III-6) : Composantes des irradiations solaires horizontales par ciel clair site d'Adrar, (H global, H_s direct et H_d diffus)

III-5-2-Estimation de l'irradiation inclinée par ciel clair:

Les irradiations solaires globales H_i , direct H_{si} et diffus H_{di} sur plan inclinés à la latitude du site d'Adrar sont estimées en fonction des composantes horizontales:

$$H_{si} = H_s \frac{\cos \delta}{\cos(\varphi - \delta)} \left[1 - 0.8 \tan \frac{\varphi}{2} (1 + \sin \delta - \cos \delta) \right] \quad (III - 6)$$

$$H_{di} = H_d \cos\left(\frac{\varphi}{2}\right)^2 + \bar{\rho} H \sin\left(\frac{\varphi}{2}\right)^2 \quad (III - 7)$$

$$H_i = H_{si} + H_{di} \quad (III - 8)$$

Avec $\bar{\rho}$ l'albédo moyen du sol qui est égal à 35%.

La **figure (III-7)** représente les résultats de calcul des différentes composantes du rayonnement solaire au cours de l'année pour le site d'Adrar sur une surface inclinée:

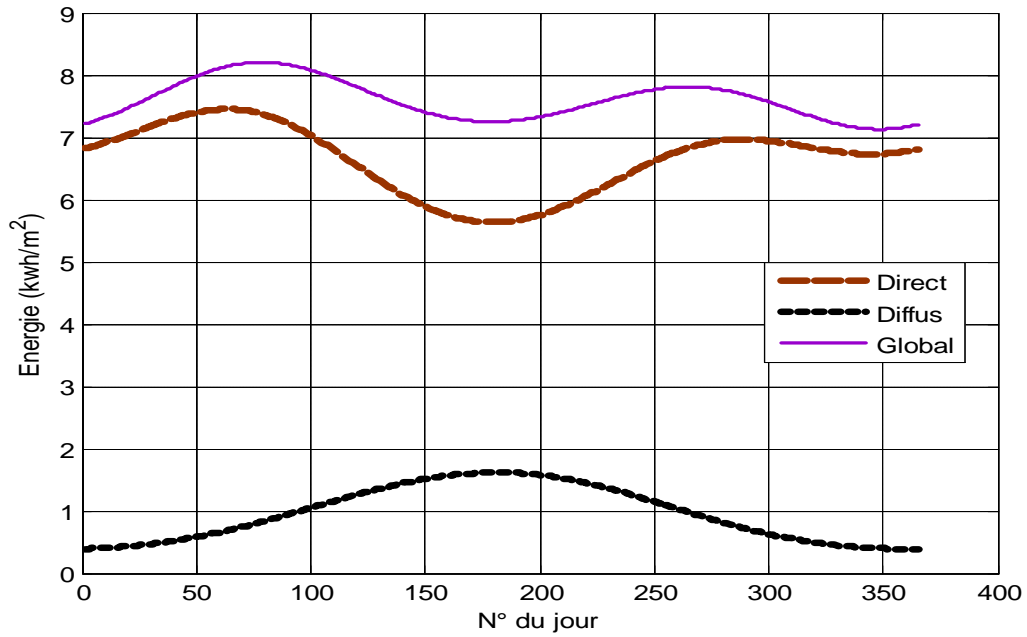
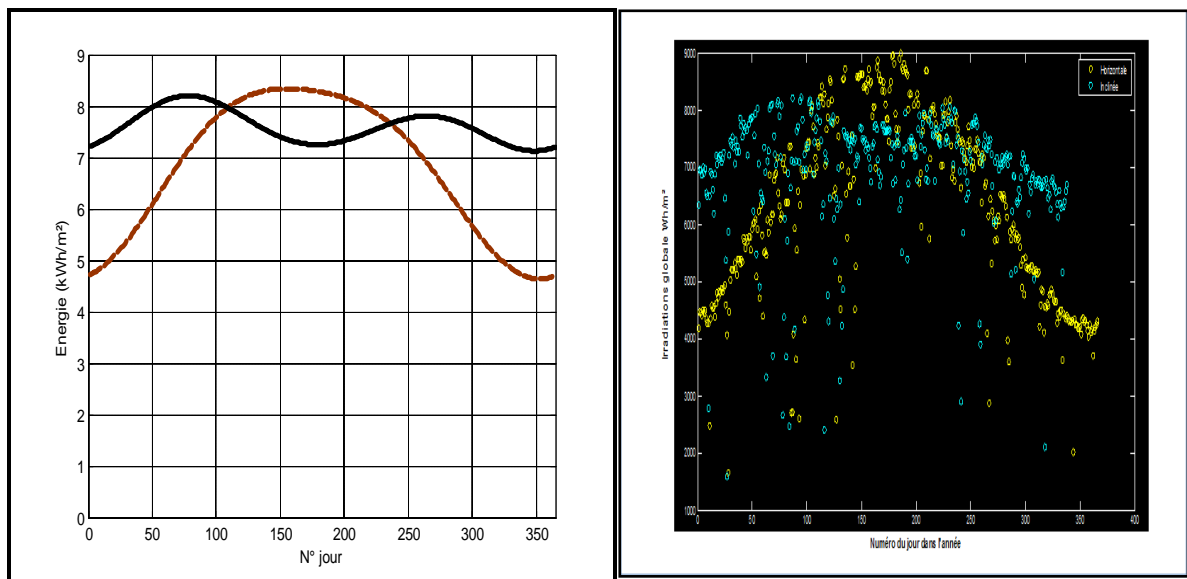


Figure (III-7): Irradiations inclinée à la latitude du lieu plein sud par ciel clair site d’Adrar, (H_i global, H_{Si} direct et H_{di} diffus)

La **figure (III-8)**, montre les différentes composantes de la radiation solaire incidente sur plan incliné plein sud sur site d'Adrar estimés par le modèle à ciel clair.



(a) D’après site d’expérimental

(b) D’après la NASA

Figure (III-8) : Comparaison des irradiations solaires par ciel clair horizontale et inclinée à plein sud à la latitude du site d’Adrar (H global horizontale, H_i globale inclinée)

Les **figures (III-7) et figure (III-8)** retracent les caractéristiques de l'irradiation globale reçue par ciel clair sur plans horizontal et incliné dans le site d'Adrar, montre que :

- La radiation solaire globale sur un plan horizontal varie dans de grandes limites au cours de l'année (4.64 à 8,9) kWh/m²/j. Le maximum est atteint le (10 juin) avec 8,34 kWh/m²/j, et le minimum le (18 décembre) avec 4.64 kWh/m²/j.
- La radiation solaire globale sur un plan incliné selon la latitude d'Adrar (27,88°) varie dans de grandes limites (7.13 et 8.20) kWh/m²/j. Elle présente deux maximums l'un en 8 avril avec 8.20 kWh/m² et l'autre en 20 aout avec 7,20 kWh/m²(en 27 sept avec 7.80 kWh/m²), et un minimum le 4 septembre avec 7.13kWh/m².
- Pour le site d'Adrar, La somme annuelle des irradiations globales sur un plan horizontale atteindre (2470.1 kWh/m²). Elle est plus faible que celle sur un plan incliné qui atteindre (2766.6 kWh/m²) **figure (III-7)**. On note une différence de 8.9%.
- Pour récolter le maximum d'énergie au cours de l'année **figure (III-9)**, il est possible d'opter pour deux orientations au cours de l'année: une orientation sur un plan horizontal entre le 18 avril et le 25 aout et une orientation inclinée à la latitude du lieu le reste de l'année. Le maximum d'énergie qui peut être récolté au cours de l'année **figure (III-9)**, en utilisant les deux orientations est environ 2600 kWh/m² représentant une augmentation de 4% par rapport à l'orientation inclinée et 13.25% par rapport à l'orientation horizontale.

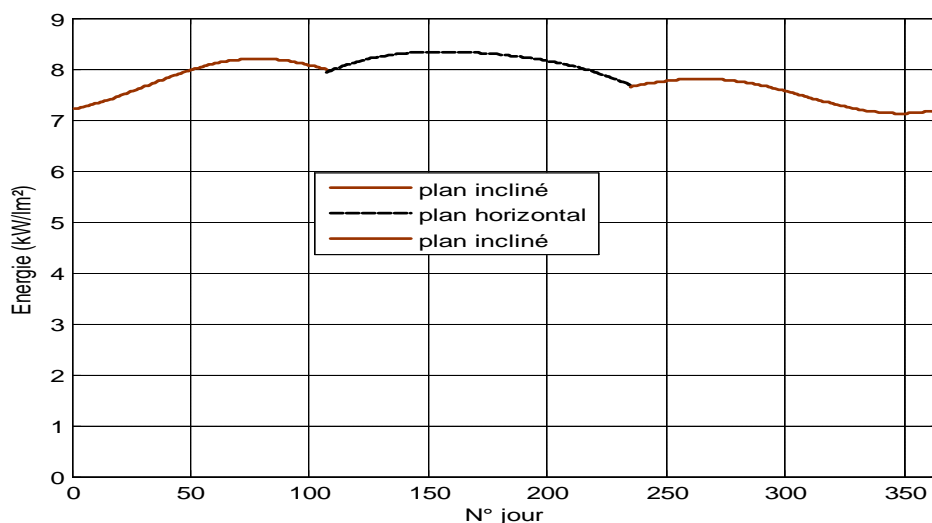


Figure (III-9) : Maximisation du rayonnement global avec l'utilisation des deux orientations.

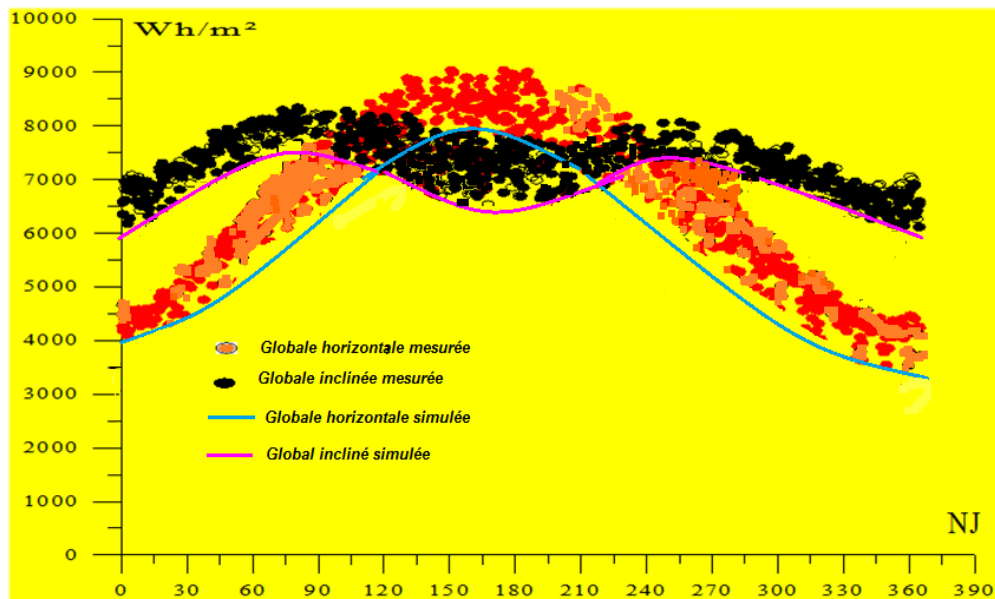


Figure (III-10): Comparaison des irradiations globales horizontales à ciel clair sur site d'Adrar mesurées et estimées

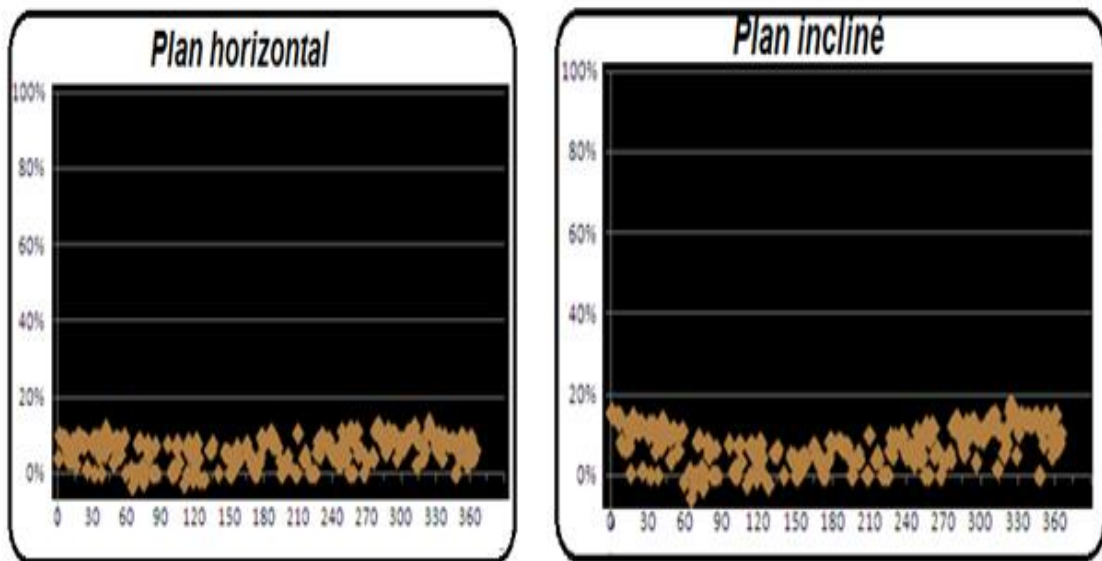


Figure (III-11): Précision du modèle de prédiction de l'irradiation à ciel clair

Les irradiations globales horizontales et inclinées plein sud à la latitude du lieu d'Adrar aux équinoxes et aux solstices sont données dans les Tableaux et les graphes d'après la base de données :

Tableau III-1: Irradiations globales par tranches horaires

Horizontales				Inclinées à la latitude plein sud			
21 Mars	21 Juin	21 Sep.	21 Déc.	21 Mars	21 Juin	21 Sep.	21 Déc.
0	34.4	0	0	0	28.3333	0	0
101.389	204.2	65.9128	1.6042	117.4	59.896	69.7472	5.8160
384.34	417.3	213.876	126.142	444.2	48.194	229.002	266.601
817.951	636.1	378.714	325.306	921.2	63.438	408.565	552.917
936.111	820.9	501.11	499.646	1049.3	49.444	516.157	767.826
978.75	951.1	729.249	625.51	1099.4	82.326	786.079	909.361
941.806	1017.2	429.339	685.997	1066.2	43.576	414.150	979.927
842.083	1015.8	414.363	675.712	949.7	36.076	406.336	974.674
677.917	918.3	245.857	586.424	759.9	33.681	232.058	875.229
452.222	719.5	347.55	428	503.5	641.493	355.738	676.976
204.271	571.1	482.982	245.274	220.7	485.625	521.009	434.132
42.0833	356.2	234.943	44.316	45.6	282.222	250.874	119.587
0	162.4	45.1548	0	0	120.382	46.4849	0
0	19.7	0	0	0	16.0069	0	0
Irradiations Moyennes Wh/m ²							
455.6374	560.3061	292.0750	303.1379	512.6462	499.3352	302.5857	468.789
Irradiations globales Wh/m ²							
6.3789	7.8443	4.0891	4.2439	7177	6990.7	4236.2	6563

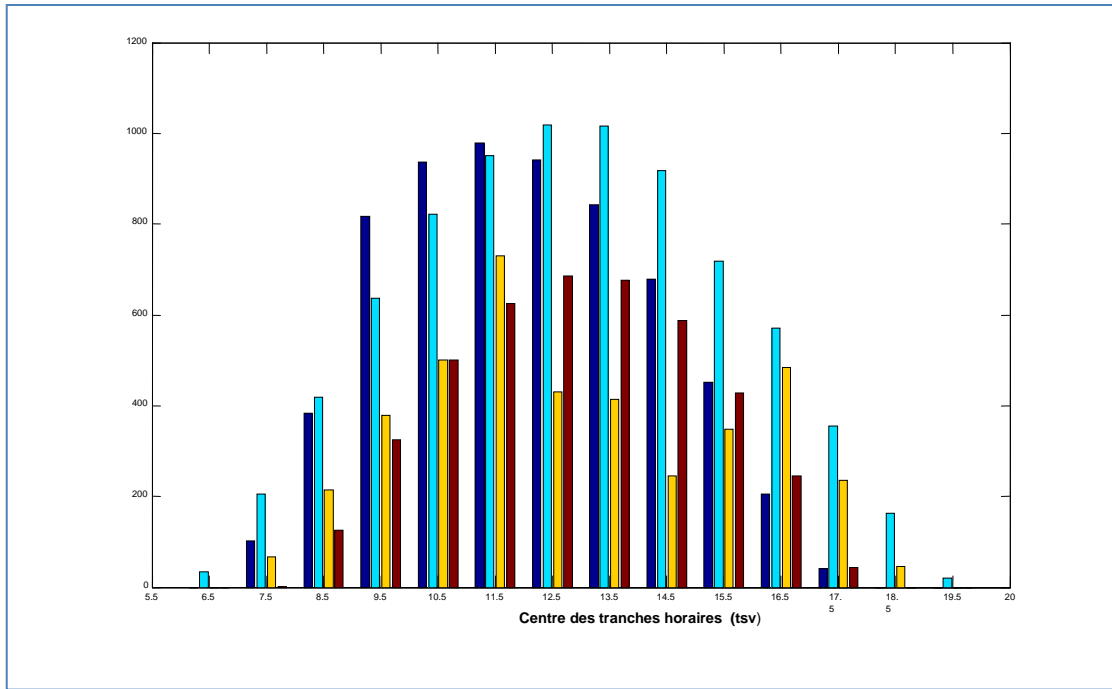


Figure (III-12) : Irradiations globales horizontales par tranche horaire à la latitude du lieu d'Adrar aux équinoxes et aux solstices

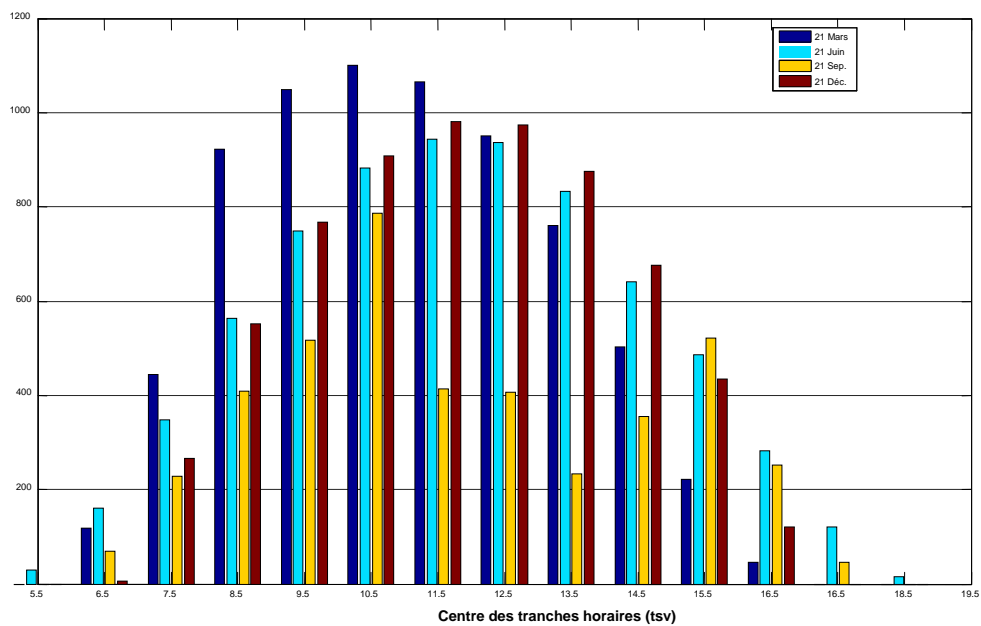


Tableau (III-13) : Irradiations globales inclinée à la latitude du lieu plein sud d'Adrar par tranche horaire (tsv) aux équinoxes et aux solstices

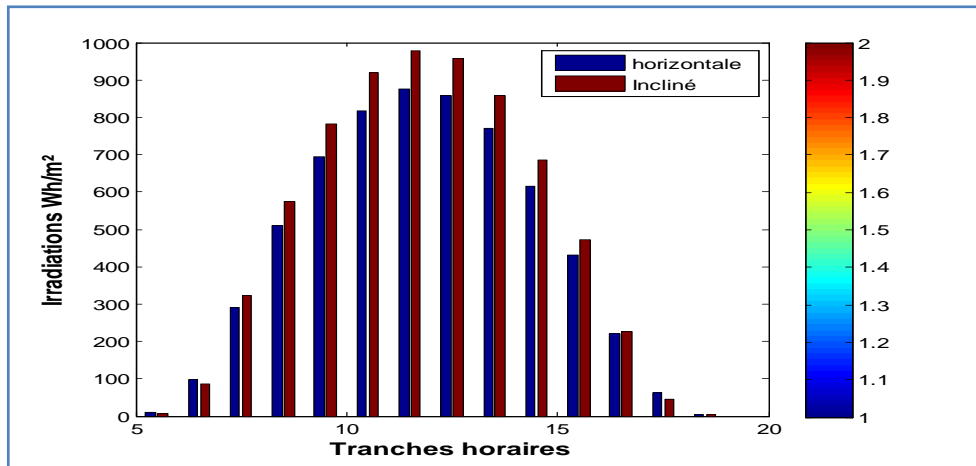


Tableau (III-14) : Irradiations globales moyennes annuelles par tranches horaires

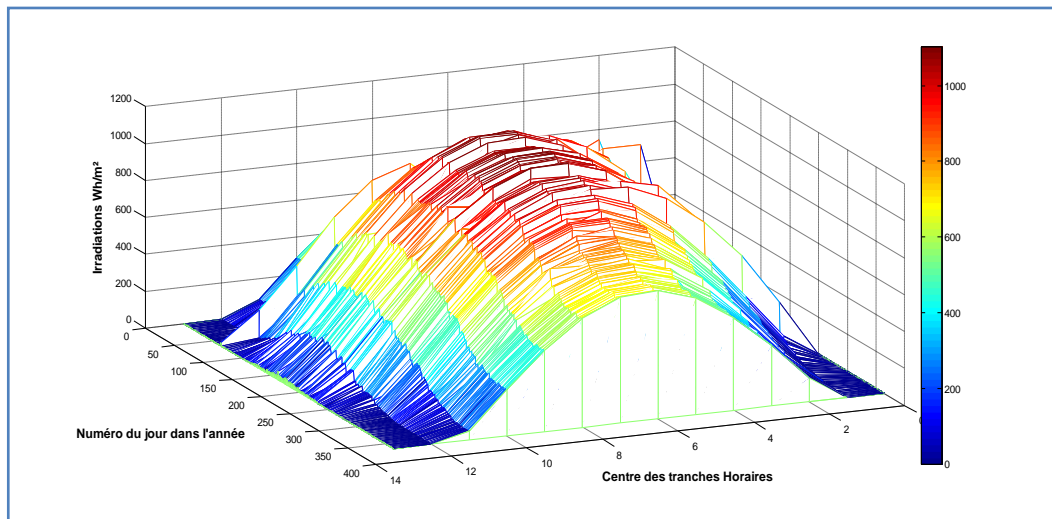


Figure (III-15) : Irradiations horaires par tranche horaire annuelle sur plan horizontal

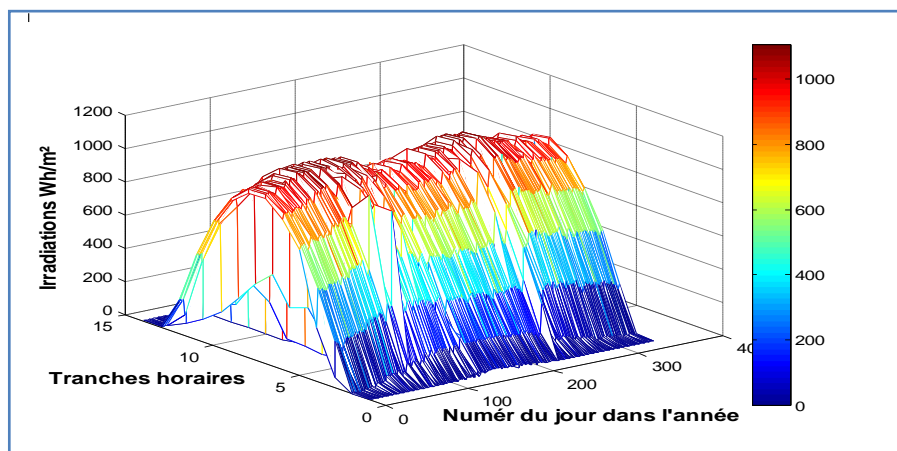


Figure (III-16) : Irradiations horaires par tranche horaire annuelle inclinées à la latitude du lieu plein sud sur site d'Adrar

L'irradiation moyenne horizontale et inclinée par tranche horaire que se soit aux équinoxes, aux solstices ou à n'importe quel jour de l'année (**figure III.12**) au (**figure III.16**) et (**Tableau III.1**) présente une allure similaire à l'irradiation globale sur les mêmes plans. Elle augmente et diminue de la même manière. L'irradiation globale horizontale moyenne journalière est égale à 6263 Wh/m^2 et celle inclinée moyenne journalière à la latitude du lieu est égale à 6922.5 . 10.53% de différence.

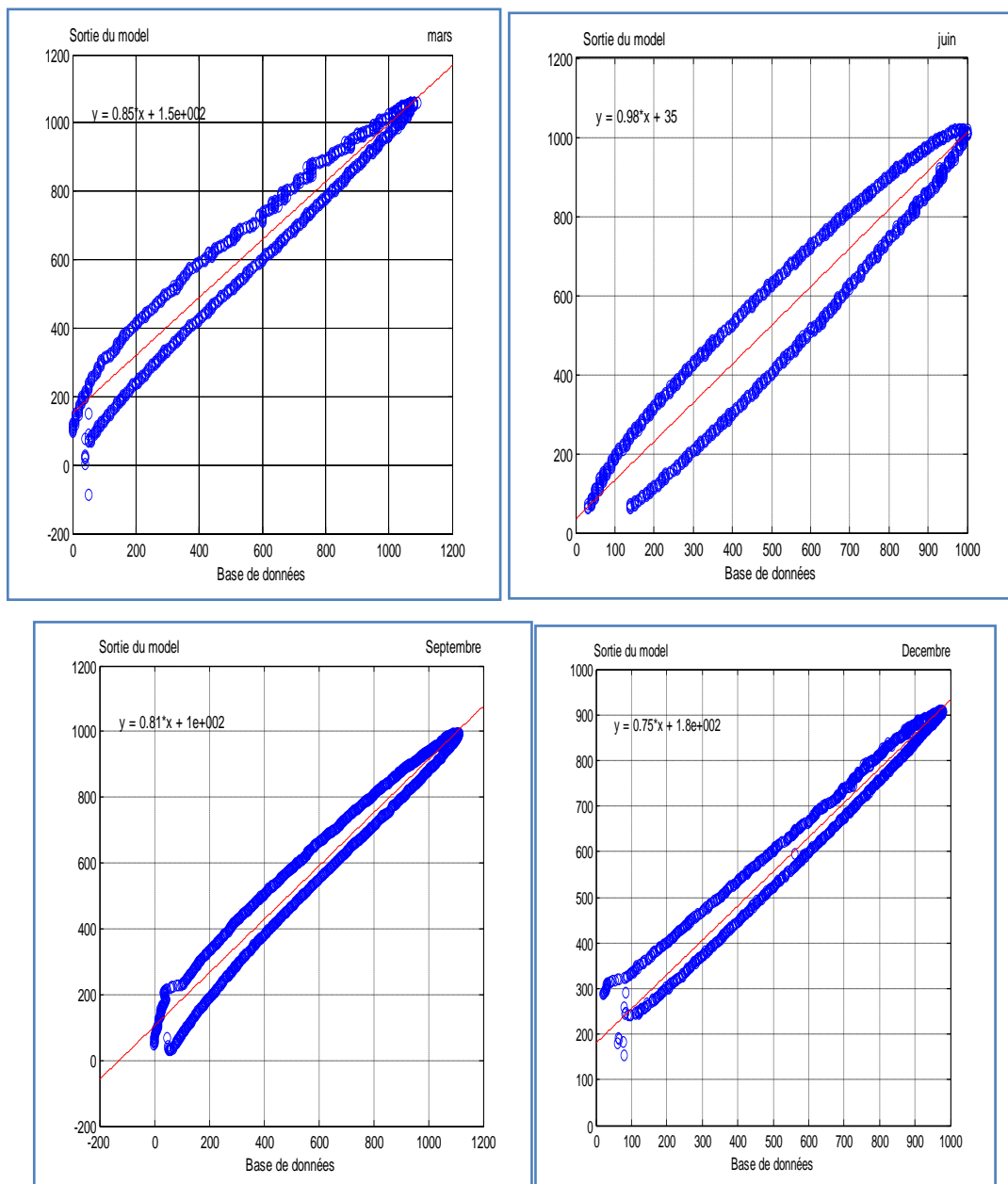


Figure (III-17): Corrélation des irradiances journalières par tranches horaires sur plan incliné à la latitude du site d'Adrar

À l'échelle journalière, la **Figure (III-17)**, montre qu'il y'a une bonne corrélation entre la base de données et la sortie du modèle à ciel clair aux équinoxes et aux solstices. L'erreur varie dans de grandes limites. Elle atteint les 25% durant la période hivernale et moins de 2.7% durant la période estivale.

III-6- Conclusion :

L'approche de caractérisation radiométrique solaire du site d'Adrar basée sur une base de données d'une année et en utilisant un modèle à ciel clair sur des plans de collecte horizontal et incliné à la latitude du lieu a permis de mieux décrire, comprendre et optimiser le mode de captation de l'irradiation en illustrant l'intérêt de l'orientation du plan de captation sur l'énergie récoltée. Le modèle de Brichambaut utilisé dans ce travail sous estime l'irradiation solaire incidente prédite par ciel clair sur plan incliné à la latitude d'Adrar au cours de l'année et l'erreur commise est moins de 20%. Toutefois, en tenant compte de la taille de la base de données traité, des erreurs systématiques et accidentelles, les résultats de simulation obtenus sont relativement acceptables. L'utilisation de deux orientations au cours de l'année, l'une estivale d'Avril à Septembre sur plan horizontal et l'autre hivernale le reste de l'année sur plan incliné, permet d'augmenter l'énergie récoltée de 4% par rapport à l'orientation inclinée et de 13.25% par rapport à l'orientation horizontale.

III-7- Perspectives

- Optimisation de la collecte énergétique solaire selon un calage optimal journalier.
- Modélisation fine de la composante diffuse du rayonnement solaire qui représente la plus importante source d'erreurs.

Conclusion générale

Conclusion Générale

L'optimisation du design et de fonctionnement des systèmes solaires, photothermiques ou photovoltaïques dépend fortement de l'énergie solaire incidente captée. L'approche de caractérisation radiométrique solaire du site d'Adrar basée sur des données annuelles et un modèle mathématique à ciel clair pour modéliser et analyser l'irradiation sur plans horizontal et incliné à la latitude du lieu effectuée dans ce mémoire a permis de mieux décrire, comprendre, analyser le mode de captation et illustrer aussi l'intérêt de l'orientation du plan de collecte sur l'énergie horaire, journalière ou annuelle récoltée. Ainsi, le modèle de Brichambaut à ciel clair appliqué dans ce travail sous estime l'irradiation solaire incidente prédite sur plan horizontal et incliné plein sud à la latitude du lieu d'Adrar au cours de l'année de 20%. Toutefois, en tenant compte de la taille de la base de données utilisée, des erreurs systématiques et accidentelles des mesures, les résultats de simulation obtenus sont relativement acceptables. L'utilisation de deux orientations au cours de l'année, l'une estivale d'Avril à Septembre sur plan horizontal et l'autre hivernale le reste de l'année sur plan incliné permet d'augmenter l'énergie récoltée de 4% par rapport à l'orientation inclinée et de 13.25% par rapport à l'orientation horizontale.

L'expérimentation, le traitement et la modélisation de la radiation solaire incidente est une tâche très difficile à maîtriser en raison des limitations techniques et théoriques dues au trouble atmosphérique et aux erreurs des mesures expérimentales inévitables telles que : l'effet cosinus du à l'angle d'incidence, l'erreur induite de la bande pare-soleil du diffusomètre en particulier avec la classe des instruments de mesure classiques basés sur les capteurs à base de thermopiles, l'effet de la convection naturelle dans les coupelles des pyranomètres, le vétusté des instruments de mesure et d'enregistrement, les hypothèses de travail sur les modèles de simulation (composante diffuse)...etc. Cependant, toute approche de modélisation représente un apport précieux pour le gisement solaire. Toutefois, l'énergie solaire inclinée sur site d'Adrar dépasse les 7 kWh/m²/jour, la durée d'insolation dépasse les 10 heures par jour, l'indice de clarté local dépasse les 65%, tous ces atouts encouragent fortement l'exploitation du rayonnement solaire pour le développement des applications à grande échelle sur site d'Adrar pour les divers usages.

Bibliographie

Bibliographie

- [1] : Benbouza Naima « Etude du rayonnement solaire dans la région de Batna », 2008.
- [2] : Mr Bekkouche Sidi Mohammed El Amine « Modélisation du comportement thermique de quelques dispositifs solaires », 2008-2009.
- [3] : Tarhi Fatiha « prédiction de l'irradiation solaire globale pour la région de Tizi-Ouzou par les réseaux de neurones artificiels. Application pour le dimensionnement d'une installation photovoltaïque pour l'alimentation du laboratoire de recherche » 2011.
- [4] : V. Bourdin « énergie solaire thermique » 2013.
- [5] : Hadj Belkacemi Mohammed « Modélisation et Etude Expérimentation d'un Capteur Solaire non Vitré et Perforé », le 06 juillet 2011.
- [6] : Merdaoui Ziad « caractérisation radiométriques des sites de Bouzaréah et de Ghardaia » Octobre 2007.
- [7] : Helali Kamelia « Modélisation d'une cellule photovoltaïque étude comparative » 25/06/2012.
- [8] : Yves Jannot « thermique solaire », Mars 2011.
- [9] : Zéghib Ilhem « Etude et réalisation d'un concentrateur solaire parabolique » 2005.
- [10] : Thomas Letg et Xarrer Cholui « intégrer le soleil thermique dans le bâtiment » INES Education
- [11] : Ch. Perrin de Brichambaut, Rayonnement solaire et échanges radiatifs naturels, pp31-46 © édition Gauthier Villars 1963.
- [12] : Benkhelifa Abdelaziz « Modélisation et expérimentation d'un capteur solaire plan à eau Influence de l'intensité de l'éclairement solaire et de l'inclinaison du capteur solaire sur le rendement du capteur » 2012.
- [13] : F. Yetton et al « Etude comparative de deux modèles de calcul du rayonnement solaire par ciel clair en Algérie » 21 juin 2009.
- [14] : F. Yetton et al « Etude et conception d'un logiciel de calcul de l'éclairement solaire en Algérie destiné aux systèmes à concentration solaire. » 27 mars 2011.
- [15] : Alain Ricaud « Gisement solaire et transferts Énergétiques » Jan 2011.
- [16] : M^{elle}. Meziani Fariza « Détermination du gisement solaire par traitement d'images MSG ».
- [17] : Saadi Souad « Effet des paramètres opérationnels sur les performances d'un capteur solaire plan. » 2010.
- [18] : Sotghi Oualid « Etude des caractéristiques de fonctionnement et de la performance d'un distillateur solaire. » 2009.

Bibliographie

- [19]: Abdelkarim Bouras«Etude et conception d'un convertisseur solaire pour la production d'eau chaude sanitaire »2007.
- [20] :A5flux solaire
- [21]: Dominique pajari«Thermographie principes et mesure».
- [22]:Patrick Depecker et Gristian Inard«lois fondamentales en génie climatique».
- [23]:www.led-fr.net/corps-noir.htm.
- [26]: www.futura_science.com/fr/
- [27]:www.newport.com/store/gencontent.aspx?id=381843&lang...
- [28]: <http://www.syscope.net/energie/>
- [29] :planet-terre.ens-lyon.fr/article/bilan-radiatif-terre1.xml
- [30]:Slimane Boughali«Etude et optimisation du sechage solaire des produits agro-alimentaire dans les zones arides et desertiques» 13/07/2010.
- [31]: M^{elle} Meziani Fariza « Détermination des gisements solaire par traitement d'image MSG ».
- [32]:M.R.Yaiche et S.M.A Bewrouche«Estimation du rayonnement solaire global en Algérie pour diférents type du ciel ».
- [33] : «La Météorologie - n° 50 - août 2005. ».
- [34]: Rachid Chemri «Etude technico-Economique d'un système de pompage photovoltaïque dans un village solaire. »24 février 2007.
- [35]: Najoua Zarai et all«Outil de planification de la production thermique des capteurs solaire»2010.
- [36] : K.Gairaa et S.Benkaciali«Modalisation numériques des irradiations globales et diffuse au site de Ghardaia»2008.
- [37]:Ahmed Djafour «Etude d'un système de production d'hydrogène solaire». 14/03/2013
- [38]: Amina Ben hammou « optimisation d'un nouveau système de séchage modulaire pour plantes aromatiques et médecin» 2010.

Bibliographie

[39]: M.Hamatti et All «Evaluation des composantes spectrales du rayonnement solaire à Rabat (Maroc) »2012.

[40]:M.Chikh et All «correlation de la fraction diffuse de l'irradiation solaire en algérie »1999

[41]: CH. PERRIN DE BRICHAMBAUT, CH. VAUGE ; le gisement solaire (évolution de ressource énergétique), Paris, 1982.

[42]: KHELIFI CHERIF(1) & H. HALOUI(2) «Vérification du modèle isotropique de Liu et Jordan pour l'irradiation solaire horaire par ciel clair sur plan incliné à la latitude du lieu d'Adrar.

Glossaire

Glossaire

Albédo

Coefficient de réflexion du sol.

AM (Air Mass)

Valeur décrivant le type de spectre solaire utilisé pour une mesure.

AM exprime la quantité d'atmosphère que traversent les rayons du soleil.

$AM = 1/\sin$ (hauteur du soleil au niveau de la mer). La valeur minimale d'AM est 1 lorsque le soleil est à la verticale (atmosphère minimale).

AM 0 = extraterrestre, AM 1.5 correspond à une hauteur de soleil de 42° .

Angle d'incidence

Angle entre les rayons du soleil et la normale au plan de capteurs.

Angle horaire

Angle, projeté sur le plan de l'équateur, entre le soleil et le midi vrai. Il varie de 15° par heure.

Azimut

Orientation par rapport au sud, compté négativement vers l'est (sens anti trigonométrique dans l'hémisphère nord, trigonométrique Dans l'hémisphère sud).

Constante solaire

Densité moyenne d'énergie reçue par la terre (1367 W/m^2).

Déclinaison

Angle entre l'axe terre-soleil et le plan de l'équateur à un moment donné de l'année.

Equation du temps

Variations de la référence de temps au cours de l'année, dues à l'ellipticité de l'orbite terrestre et l'obliquité de son axe de rotation (± 15 minutes environ).

Hauteur du soleil

Angle entre la direction du soleil et le plan horizontal.

Inclinaison

Angle entre un plan de capteurs et l'horizontale.

Irradiance

Densité de flux de rayonnement (puissance), exprimé en W/m^2 .

Irradiation

Energie de rayonnement pour une durée déterminée, exprimée en kWh/m^2 ou MJ/m^2 .

Pyranomètre

Instrument de mesure d'irradiance, utilisant l'effet de serre, ayant une large acceptation spectrale et angulaire (mesure du rayonnement global).

Rayonnement direct

Rayonnement venant directement du soleil, sans diffusion sur l'atmosphère. Ses rayons sont parallèles : il peut former des ombres et être concentré par des miroirs.

Rayonnement diffus

Rayonnement diffusé par l'atmosphère (air, nébulosité). On le décompose parfois en composantes isotrope, circumsolaire et bande horizon.

Rayonnement extraterrestre

Rayonnement à l'extérieur de l'atmosphère; il varie de $\pm 3.3\%$ au cours de l'année autour de sa moyenne de 1367 W/m^2 .

Spectre du rayonnement

Distribution en longueurs d'onde.

Temps solaire (TSV)

Référence de temps ou le «midi vrai» correspond au passage du soleil à la verticale du méridien du lieu.