



Département de Génie Mécanique

MEMOIRE DE FIN D'ETUDE

En vue de l'obtention du diplôme de :

MASTER

En Génie Mécanique

Option : Energétique

Thème :

Détermination de l'angle optimal d'inclinaison de capteur solaire à M'Sila

Proposé et dirigé par :

M^{elle}. Ihddadene Nabila

Présenté :

Charik abdeldjebar

N° d'ordre : GM/...../2016

Année Universitaire : 2015 / 2016

Remerciements

*Toutes mes infinies gratitudees à mon promoteur, Dr
N. Ihddadene,*

*Je remercie aussi les membres de jury qui m'ont fait l'honneur
d'accepter le jugement de mon travail*

*Notre sincère reconnaissance à nos enseignants du département :
Génie Mécanique.*

*Enfin je remercie tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à
l'élaboration de ce modeste travail.*

Charik



Sommaire

Introduction générale

Chapitre : convertisseurs et gisement solaire

I.1 Introduction	1
I.2 Soleil	1
I.3 Conversion d'énergie solaire.....	2
I.3.1 Solaire à concentration thermodynamique	2
I.3.2 Solaire thermique	2
I.3.3 Solaire photovoltaïque.....	4
I.3.3.1 Cellules photovoltaïques ou photopiles.....	4
I.3.3.2 Différents types des cellules solaires	5
I.3.3.3 Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque.....	6
I.4 Avantages et les inconvénients de l'énergie solaire	6
I.5 Energie solaire récupérable.....	7
I.5.1 Orientation et inclinaison des capteurs solaires.....	7
I.5.2 Pourquoi orienter un panneau solaire ?	7
I.5.3 Comment orienter et incliner les capteurs solaires ?	8
I.6 La terre.....	9
I.7 Mouvement de la terre autour du soleil.....	9
I.8 Trajectoire apparente du soleil	10
I.9 Composition de l'atmosphère.....	11
I.10 Coordonnées géographiques	12
I.10.1 Longitude (L).....	12
I.10.2 Latitude ($\emptyset$)	12
I.10.3 L'altitude (Z).....	12
I.11 Coordonnées locales (horizontales)	13
I.11.1 Hauteur angulaire h.....	13
I.11.2 Azimut.....	13
I.12. Coordonnées horaires.....	14

I.12.1 Angle horaire	14
I.12.2 Déclinaison.....	14
I.13. Paramètres de temps	15
I.13.1 Temps solaire vrai	15
I.13.2 Temps solaire moyen	15
I.13.3 Temps solaire universel (TU).....	16
I.14 Conclusion.....	16

Chapitre II : Irradiation solaire

II.1. Introduction.....	17
II.2. Rayonnement solaire.....	17
II.2.1. Rayonnement solaire hors atmosphère.....	17
II.2.2. Constante solaire.....	18
II.2.3. Masse d'air.....	19
II.2.4. Durée d'insolation.....	20
II.2.5. Eclairement solaire.....	21
II.3 Rayonnement solaire au sol.....	21
II.3.1 Estimation du rayonnement solaire.....	22
II.3.1.1 Rayonnement direct.....	22
II.3.1.2 Rayonnement diffus.....	23
II.3.1.2.1.Modèles d'estimation du rayonnement diffus ciel.....	24
II.3.1.3 Rayonnement réfléchi.....	29
II.3.1.3.1 Albédo.....	29
II.3.1.4 Rayonnement global.....	30
II.4.1 Calcul de l'irradiation globale hors atmosphère journalière reçue sur un plan horizontale.....	30
II.5 Inclinaison optimale.....	31
II.5.1 Inclinaison optimale annuelle.....	31
II.5.1.1 Modèle de Gladius.....	31
II.5.2 Inclinaison optimale saisonnière.....	32
II.5.2.1 Modèle d'El kassaby.....	32
II.5.3 Inclinaison optimale mensuelle.....	33

II.6 Appareils de mesures.....	33
II.7 conclusion.....	35

Chapitre III : Dispositif expérimental

III.1.Introduction.....	36
III.2.Description du capteur photovoltaïque.....	36
III.3 Principe de fonctionnement.....	38
III.4 Description de la procédure expérimentale.....	39
III.5 Comment travailler sur le panneau.....	39

Chapitre IV : Résultats et discussion

IV. 1. Introduction.....	40
IV.2 Situation géographique de la région de M'sila.....	40
IV.3 Déclinaison du soleil.....	40
IV.4 Estimation de l'irradiation globale journalière hors atmosphère reçue sur un plan horizontal (relatif à la région de M'Sila).....	41
IV.5 Estimation de l'irradiation moyenne reçue sur un plan horizontal à M'Sila.....	43
IV.5.1 Estimation de l'indice de clarté KT.....	45
IV.5.2 Estimation des composantes du rayonnement global reçu sur une surface horizontale à M'Sila.....	47
IV.6 Estimation de l'irradiation moyenne globale reçue sur un plan incliné à M'Sila.....	48
IV.7 Optimisation de l'angle d'inclinaison pour la collecte d'énergie solaire maximale à M'sila.....	58
IV.7.1 Inclinaison optimale mensuel.....	58
IV.7.2 Inclinaison optimale saisonnière.....	62
IV.7.3 Inclinaison optimale annuelle.....	64
IV.8 conclusion.....	65
Conclusion générale.....	66

Liste de tableau

Tab II.1: Valeurs énergétiques des photons issues du spectre solaire.....	18
Tab II.2 : coefficients F_{ij} de Perez.....	28
Tab II.3 : Valeurs typiques de l'albédo selon la nature du sol.....	29
Tab.III.1 : Caractéristiques des modules solaires.....	37
Tab IV.1 : Caractéristiques géographiques de la Wilaya de M'sila.....	40
Tab IV-2 : Pourcentage d'atténuation du rayonnement solaire arrivant au sol de M'Sila par rapport à celui reçu hors atmosphère.....	45
Tab IV-3 : Valeurs moyennes mensuelles de l'indice de clarté.....	47
Tab IV-4 : Angle d'inclinaison optimal pour le rayonnement direct incident.....	49
Tab IV-5 : Angle d'inclinaison optimal pour le rayonnement diffus (Modèle circumsolaire).....	52
Tab IV-6 : Angle d'inclinaison optimal pour le rayonnement diffus (Modèle de Hay).....	53
Tab IV-7 : Angle d'inclinaison optimal pour le rayonnement diffus (Modèle de réndl).....	54
Tab IV-8 : Angle d'inclinaison optimal mensuel et radiations globales correspondantes selon les modèles de : Liu & Jordan, Circumsolaire, Hay, et Reindl.....	58
Tab IV-9 : Angle d'inclinaison optimal mensuel et radiations globales correspondantes selon les modèles de : Liu & Jordan, Circumsolaire, Hay, et Reindl (Calcul obtenu pour T_K).....	59
Tab IV-10 : Angle d'inclinaison optimal mensuel selon les modèles de EL Kassaby et Reindl.....	61
Tab IV-11 : Angle d'inclinaison optimal saisonnier et radiations globales correspondantes selon les modèles de : Liu & Jordan, Circumsolaire, Hay, et Reindl.....	62
Tab IV-12 : Angle d'inclinaison optimal saisonnière selon les modèles d'EL Kassaby et d'autres.....	63
Tab IV-13 : Angle d'inclinaison optimal annuel et radiations globales correspondantes selon les modèles de : Liu & Jordan, Circumsolaire, Hay, et Reindl.....	64

Liste de figure

Fig. I.1 : Etoile du soleil.....	1
Fig. I.2 : Deux exemples de concentration thermodynamique	2
Fig. I.3: Différent types de capteurs plans	3
Fig. I.4 : Principe de fonctionnement des capteurs thermiques (énergie solaire thermique)...	4
Fig. I.5: Description d'une photopile ou cellule photovoltaïque.	5
Fig. I.6: Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque.....	6
Fig. I.7 : Différents modes d'exploitation de l'énergie solaire	7
Fig. I.8 : Rayonnements solaires sur un panneau horizontal et un panneau incliné	8
Fig. I.9 : Définition de l'orientation et de l'inclinaison d'un panneau.....	9
Fig. I.10 : Mouvement de la terre autour du Soleil	10
Fig. I.11 : Trajectoire du soleil pour chaque mois	11
Fig. I.12 : Structure de l'atmosphère	12
Fig. I.13: Coordonnées géographiques d'un lieu	13
Fig. I.14: Coordonnées horizontales du soleil.[10].....	14
Fig. I.15: Coordonnées horaires.....	15
Fig. I.16: Déclinaison solaire.....	16
Fig. II.1 Spectre solaire AM0et AM1 et celui émis par un corps noir à 5760 K.....	17
Fig. II.2: La constante solaire.....	18
Fig. II.3 : Rayonnement solaire et le nombre d'air masse.....	19
Fig. II.4 : Spectre solaire en fonction de différentes valeurs, de la masse d'air.....	20
Fig. II.5: Les trois composantes du rayonnement incident sur un capteur incliné.....	22
Fig. II.6. Le rayonnement direct sur une surface inclinée	23
Fig. II.7 : Rayonnement diffus	23
Fig. II.8: Héliographe Campbell-Stokes.....	34
Fig. II.9: Héliographe à fibres optique	35
Fig. III.1 : Vue d'ensemble du capteur photovoltaïque.....	36
Fig. III.2 : Module solaire photovoltaïque.....	37
Fig. III.3 : Détecteur de température (a) et détecteur de luminosité (b).....	37
Fig. III.4 : Appareil de mesure combiné.....	38
Fig. III.5 : Résistance à curseur(Rhéostat).....	38
Fig. III.6 : Le panneau solaire s'incliner selon différents angles.....	39
Fig. IV.1 : Localisation de la Wilaya de M'sila.....	40

Fig.IV.2 : Evolution de la déclinaison solaire $\square$ au cours de l'année.....	41
Fig.IV.3: Evolution de l'énergie journalière hors atmosphère reçue sur un plan horizontale relative à la région de M'sila au cours de l'année.....	42
Fig.IV.4: Evolution de l'irradiation moyenne journalière de 2 ans, 5 ans, 10 ans, 15 ans et 21 ans reçue sur un plan horizontale à M'sila au cours de l'année.....	43
Fig.IV.5: Comparaison entre l'irradiation solaire moyenne mensuelle hors atmosphère (H0) et celle réellement reçue sur une surface horizontal à M'Sila (Hg).....	44
Fig.IV.6: Indice de clarté kt pour la région M'Sila.....	46
Fig.IV.7: Composantes du rayonnement global mensuel reçu sur une surface horizontale à M'Sila.....	47
Fig.IV.8: Evolution du rayonnement moyen mensuel direct incident sur des surfaces unités de différentes inclinaisons à M'Sila.....	49
Fig.IV.9: Evolution du rayonnement moyen mensuel réfléchi reçu sur des surfaces unités de différentes inclinaisons à M'Sila.....	50
Fig.IV.10: Evolution moyenne mensuelle du rayonnement diffus reçu sur des surfaces unités de différentes inclinaisons à M'Sila, selon le modèle de Liu & Jordan.....	51
Fig.IV.11: Evolution moyenne mensuelle du rayonnement diffus reçu sur des surfaces unités de différentes inclinaisons à M'Sila, selon le modèle circumsolaire.....	52
Fig.IV.12: Evolution moyenne mensuelle du rayonnement diffus reçu sur des surfaces unités de différentes inclinaisons à M'Sila, selon le modèle de Hay.....	53
Fig.IV.13: Evolution moyenne mensuelle du rayonnement diffus reçu sur des surfaces unités de différentes inclinaisons à M'Sila, selon le modèle de Reindl.....	54
Fig.IV.14: Comparaison du rayonnement moyen mensuel reçu sur des surfaces unités de différentes inclinaisons à M'Sila, obtenu selon les modèles de : Liu & Jordan, Circumsolaire, Hay, et Reindl.....	56
Fig.IV.15: Evolution moyenne annuelle du rayonnement solaire incident sur un plan de 1 m ² de surface, orienté vers le sud, à différents angles d'inclinaison, selon les modèles de : Liu & Jordan, Circumsolaire, Hay, et Reindl.....	57
Fig.IV.16: Comparaison entre les résultats expérimentaux et ceux des modèles de : Liu & Jordan, Circumsolaire, Hay, et Reindl (Mois de mars, avril et mai).....	61

NOMENCLATURE

NOMENCLATURE

β :	Inclinaison de la surface réceptrice (deg)
θ_i :	Angle d'incidence (deg)
γ :	Orientation de capteur solaire (deg)
λ :	longueur d'onde
δ :	Déclinaison (deg)
θ_z :	Angle azimute (deg)
	Global
ε :	Indice de clarté
Δ :	La luminosité
ρ :	Valeur albédo du sol pour le rayonnement réfléchi
ω :	Angle Horaire (deg)
ω_s :	Angle horaire de coucher
$\emptyset$:	Latitude
a :	Azimut du soleil (deg)
f :	Racine carrée du rapport du rayonnement direct à celui du rayonnement
h :	Hauteur du soleil (deg)
m :	Masse d'air optique
n :	Nombre de jour
C :	Correction de distance
F', F :	Fonctions de modulation
G_{on} :	Puissance du rayonnement globale hors atmosphère à incidence normaleA
G_{sc} :	Constante solaire
G_o :	Puissance du rayonnement globale hors atmosphère,
H_g :	Irradiation globale sur plan horizontal (MJ/m ²)
H_b :	Irradiation direct sur plan horizontal (MJ/m ²)
H_B :	Irradiation direct sur plan incliné (MJ/m ²)
H_0 :	Irradiation direct normal hors atmosphère (MJ/m ²)
H_T :	Rayonnement Global sur plan incliné (MJ/m ²)
H_R :	Rayonnement réfléchi sur plan incliné (MJ/m ²)
H_D :	Irradiation diffusé sur plan incliné (MJ/m ²)

NOMENCLATURE

H_d :	Irradiation diffuse sur plan horizontale (MJ/m^2)
K_T :	Indice de clarté
L :	Longitude
R_b :	Rapport entre le rayonnement direct journalier sur un plan incliné à celui du plan horizontal
R_d :	Rapport entre le rayonnement diffus sur un plan incliné à celui du plan horizontal
Z :	Altitude
TSV :	Temps solaire vrai (heures)
TSM :	Temps solaire Moyenne
ET :	Equation du temps
TU :	Temps universel (heures)
TL :	Temps légal

Introduction générale

L'énergie solaire occupe une place très importante parmi les différentes sources d'énergies renouvelables. Un effort accru existe depuis ces dernières décennies pour développer l'utilisation directe de cette forme d'énergie afin de la transformer en chaleur, en électricité ou en une forme d'énergie chimique plus facilement stockable. Le soleil décharge continuellement une énorme quantité d'énergie radiante dans l'espace. Une moyenne de 1367 Watts atteint chaque mètre carré du bord externe de l'atmosphère terrestre. La part d'énergie reçue sur la surface de la terre dépend de l'épaisseur de l'atmosphère à traverser.

Une connaissance précise de la distribution de l'irradiation solaire sur un site géographique particulier est d'une grande importance pour le développement des systèmes photo thermiques ou photovoltaïques, Le manque de moyens de mesure et le non disponibilité de stations météorologiques à grande échelle, représentent des difficultés qui ont permis aux chercheurs d'établir des méthodes d'estimation du rayonnement solaire en se basant sur les données météorologiques.[1]

Afin produire un niveau élevé de l'énergie un module photovoltaïque ou un capteur solaire thermique doit être incliné de façon perpendiculaire aux rayons du soleil. Ceci est très généralement impossible et cela est du changer de position du soleil au long de la journée en termes d'heures de lumière du jour et aussi la position change en fonction des saisons de L'orientation optimale de l'angle d'inclinaison des modules photovoltaïques, s'avère la méthode idéale pour optimiser la production du générateur photovoltaïque.

La présence de plans inclinés dans toute conception technique est indispensable. Dans cette optique les modèles choisis pour cette étude sont ceux qui traitent la composante diffuse sur plan incliné et leurs contributions dans l'estimation du rayonnement global.

Le plan de ce mémoire est le suivant :

- Le premier chapitre est un rappel conversion de l'énergie solaire..
- Dans deuxième chapitre est consacré à l'estimation du rayonnement solaire après sa traversée de l'atmosphère. Le rayonnement global sur un plan incliné est la somme du rayonnement direct et rayonnement diffus du ciel calculé par les différents modèles statistiques, et rayonnement réfléchi calcule avec une valeur albédo et trouver l'inclinaison optimale qui nous donne un meilleur niveau d'énergie
- Dans troisième chapitre expliquer le cote pratique que nous avons fait sur la présence au laboratoire de génie mécanique à l'université de M'sila.

Introduction générale

- Quatrième chapitre et le dernier est consacré à la présentation de résultats et discussion. Le chapitre quater ce l'objectif de détermine la meilleur inclinaison des capteurs solaire au niveau de région de M'sila.

Après le résultat de quatrième chapitre, nous finissons notre étude par une conclusion générale explicite de mémoire.

.

CHAPITRE I

CONVERTISSEURS

ET GISEMENT

SOLAIRE

I.1 Introduction

Si l'énergie est le moteur de l'humanité, l'énergie solaire en est le centre vital. Sans soleil, aucune vie n'est possible sur Terre. Elle est utilisée également en la transformant en énergie chimique par la photosynthèse. Grâce aux diverses exécutions, elle peut être transformée en une autre forme d'énergie utile pour l'activité humaine, notamment en chaleur, en électricité ou en biomasse. L'exploitation directe de l'énergie solaire au moyen de capteurs relève de deux technologies bien distinctes : l'une produit des calories, c'est l'énergie solaire thermique, et l'autre produit de l'électricité, et c'est cette dernière, qui s'appelle énergie solaire photovoltaïque.

I.2 Soleil

Le soleil (figure I.1) est l'étoile la plus proche, elle apparaît sous la forme d'une sphère gazeuse de 696 000 km de rayon, soit 109 fois celui de la terre, dont on évalue la masse à 10^{30} kg. Sa période de rotation moyenne s'étale sur vingt-cinq jours. La source d'énergie provient d'une réaction nucléaire transformant l'hydrogène en hélium, prenant naissance au centre du soleil.



Fig. I.1 : Etoile du soleil

Le Soleil est actuellement constitué de 75% d'hydrogène et de 25% d'hélium en masse, de 92,1% d'hydrogène et de 7,8% d'hélium en nombre d'atomes. Tous les autres éléments ne représentent pas plus de 0,1%. Ces chiffres varient lentement au fur et à mesure que le Soleil convertit l'hydrogène en hélium par réaction de fusion nucléaire.

Le processus dominant commence par la fusion de deux protons puis se poursuit par l'apport d'un troisième proton :



Le Soleil se trouve en pleine phase de combustion de l'hydrogène. On a calculé qu'il pouvait encore rayonner pendant cinq milliards d'années.

Les astrophysiciens identifient des couches à sa périphérie, l'intérieur n'est pas accessible à l'analyse, les couches extérieures masquent les phénomènes mis en jeu. [2]

I.3 Conversion d'énergie solaire: les différentes technologies solaires

Il existe principalement trois façons d'utilisation de l'énergie solaire, à savoir : l'utilisation thermodynamique, thermique, et photovoltaïque.

I.3.1 Solaire à concentration thermodynamique

Le Solaire à concentration thermodynamique est une technologie qui utilise des miroirs qui concentrent l'énergie solaire vers un tube contenant un fluide caloporteur qui s'échauffe jusqu'à une température pouvant atteindre 500°C. La chaleur obtenue est transférée à un circuit d'eau, la vapeur alors produite actionne une turbine couplée à un alternateur qui produit de l'électricité. L'un des grands avantages de cette technologie provient du fait que la chaleur peut être stockée, permettant ainsi aux centrales solaires de produire de l'électricité pendant la nuit. La centrale ANDASOL 1, à Grenade, a ainsi une autonomie de 7 heures, mais des projets en cours ont comme objectif une autonomie de 20 heures [3,4].

Les miroirs qui collectent l'énergie solaire (placés à 3 ou 4 mètres du sol) froment une zone d'ombre sur le sol, cependant il arrive suffisamment de lumière pour cultiver des fruits ou des légumes. Une partie de l'eau douce formée sur place par condensation en sortie de turbine, peut être utilisée pour l'arrosage [3,5,4].



Capteur thermodynamique cylindro-parabolique



capteur thermodynamique parabolique

Fig. I.2 : Deux exemples de concentration thermodynamique. [4]

I.3.2 Solaire thermique

Le principe de l'énergie thermique consiste à transformer le rayonnement solaire en énergie thermique grâce à un fluide qui circule dans des panneaux exposés au soleil, (figure I.3). Cette forme de conversion d'énergie peut être directe si on veut uniquement chauffer de l'eau sanitaire.

Par contre, si on veut générer de l'électricité, il faudra utiliser des générateurs qui convertissent l'énergie thermique générée en électricité (par exemple, moteurs à air chaud).

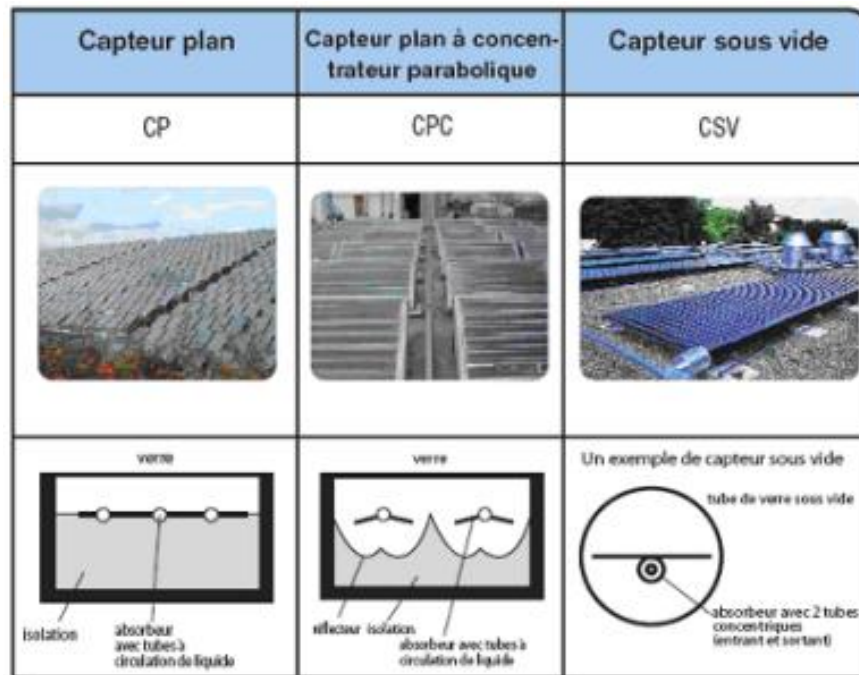


Fig.1.3: Différent types de capteurs plans. [6]

Le principe de fonctionnement des capteurs thermiques est décrit comme suit : pour commencer, le rayon solaire traverse une plaque de verre transparente ; le rayon lumineux sera alors absorbé après avoir passé la plaque de verre, par une plaque de métal noir qui absorbera environ 80 à 90% des rayons solaires. Puis, la chaleur ainsi générée est transmise à un circuit d'eau qui alimente un circuit secondaire qui, à son tour, alimente une habitation en eau sanitaire ou en chauffage.

Les constituants d'un panneau solaire thermique sont montrés sur la figure (I.4). Il est composé d'un corps qui absorbe le rayonnement solaire en s'échauffant ; d'un système de refroidissement par le fluide caloporteur (transportant l'énergie) ; d'un isolant thermique situé sur les faces non exposées au rayonnement et d'une couverture transparente sur la face exposée, destinée à assurer l'effet de serre à l'intérieur du capteur.

L'énergie thermique utilise la chaleur du rayonnement solaire pour le chauffage de bâtiments ou la production d'eau chaude sanitaire. Pour cette dernière il est intéressant de savoir que dans certains pays le chauffage d'eau sanitaire représente environ 20% des dépenses énergétique d'un foyer et que l'énergie solaire thermique peut subvenir à environ 80% de cette dépense énergétique [7].

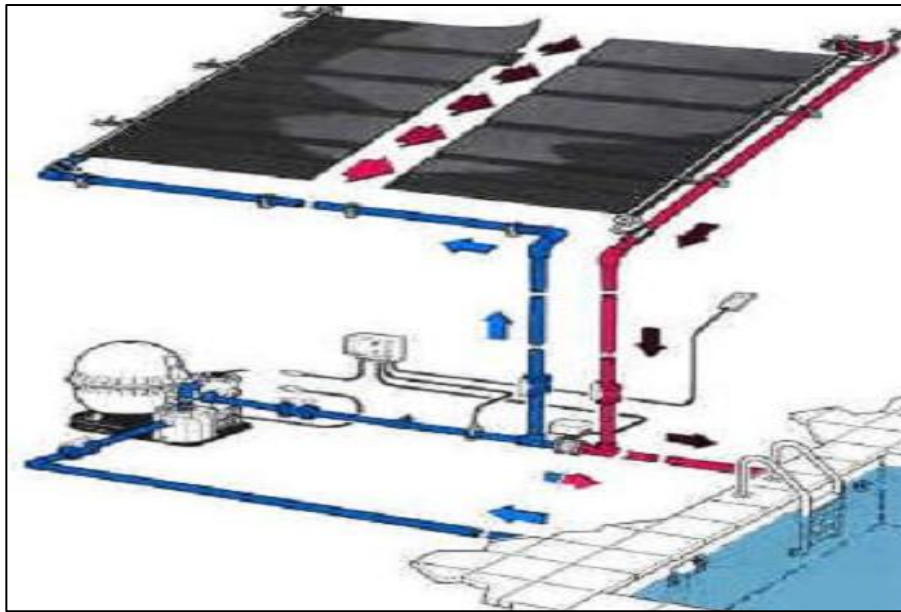


Fig. I.4 : Principe de fonctionnement des capteurs thermiques (énergie solaire thermique).

I.3.3 Solaire photovoltaïque

Contrairement à l'énergie solaire thermique qui utilise le soleil comme source de chaleur. Le solaire photovoltaïque est la transformation directe de la lumière en électricité. À l'encontre de l'énergie solaire passive, qui utilise les éléments structuraux d'un bâtiment pour mieux le chauffer (ou le refroidir), et de l'énergie solaire active, qui utilise un caloporteur (liquide ou gazeux) pour transporter et stocker la chaleur du Soleil (on pense au chauffe-eau), l'énergie photovoltaïque n'est pas une forme d'énergie thermique. Elle utilise une photopile pour transformer directement l'énergie solaire en électricité.

I.3.3.1 Cellules photovoltaïques ou photopiles

La photopile, qu'on appelle aussi cellule solaire ou photovoltaïque, est fabriquée à l'aide de matériaux semi-conducteurs comme les transistors ou les puces d'un ordinateur. On peut la représenter comme une diode plate qui est sensible à la lumière (figure I.5). Quand un photon de lumière, d'énergie suffisante, heurte un atome sur la partie négative de la diode, il excite un électron et l'arrache de sa structure moléculaire, créant ainsi un électron libre sur cette partie. Une photopile est fabriquée de manière à ce que cet électron libre ne puisse se recombiner facilement avec un atome à charge positive, avant qu'il n'ait accompli un travail utile en passant dans un circuit extérieur.

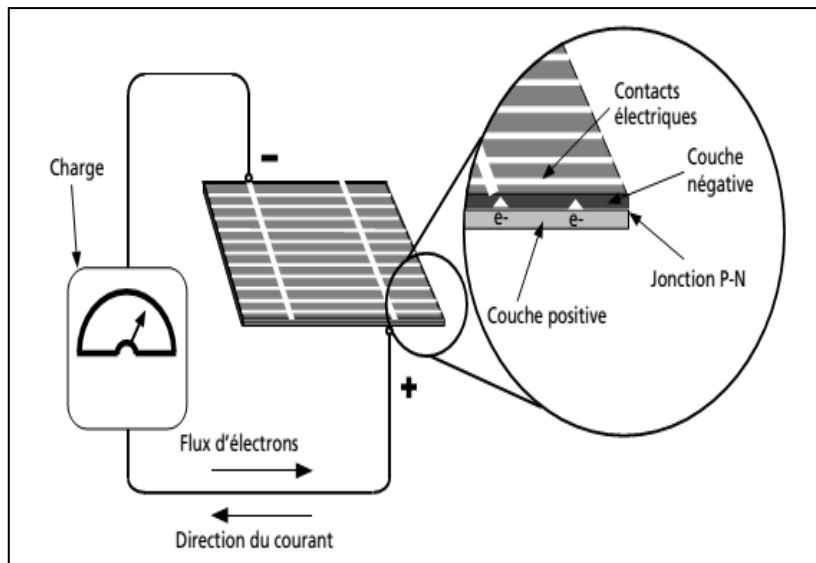


Fig. I.5:Description d'une photopile ou cellule photovoltaïque. [8]

Comme une pile chimique (c'est-à-dire une batterie), la cellule photovoltaïque produira de l'électricité à courant continu (cc), mais son énergie produite sera fonction principalement de la lumière reçue par la photopile.[8]

I.3.3.2 Différents types des cellules solaires

Il existe trois types principaux de cellules [9]:

a) Cellules mono- cristallines

Silicium monocristallin : c'est celui qui se rapproche le plus du modèle théorique. Son rendement est de l'ordre de 15%. Mais il est aussi le plus difficile à obtenir. Après réduction de l'oxyde au four électrique, on obtient du silicium pur à 98% ce qui n'est pas suffisant pour réaliser des cellules photovoltaïques. Une seconde opération de purification est nécessaire d'où son prix élevé.

b) Cellules poly-cristallines

Silicium polycristallin : il est obtenu par coulage de cristaux de silicium ce qui rend sa structure hétérogène. Son rendement est plus faible que celui du silicium monocristallin : il est de l'ordre de 10%.

c) Cellules amorphes

Silicium amorphe ou en couche mince : les cristaux de silicium sont déposés en mince couche sur un substrat le plus souvent du verre ou un matériau synthétique. Il est en général utilisé pour des appareils de faibles puissances (montre, calculatrice ...). Le rendement de ces dernières se situe aux alentours de 7% et diminue avec le temps.

I.3.3.3 Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

Les cellules photovoltaïques sont fabriquées à partir d'une jonction pn au silicium (diode). Pour obtenir du silicium dopé n, on ajoute du phosphore. Ce type de dopage permet au matériau de libérer facilement des électrons (charge -).

Pour obtenir du silicium dopé p, on ajoute du bore. Dans ce cas, le matériau crée facilement des lacunes électroniques appelées trous (charge +).

La jonction pn est obtenue en dopant les deux faces d'une tranche de silicium. Sous l'action d'un rayonnement solaire, les atomes de la jonction libèrent des charges électriques de signes opposés qui s'accumulent de part et d'autre de la jonction pour former un générateur électrique.[9]

La figure I.6 montre le principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque.

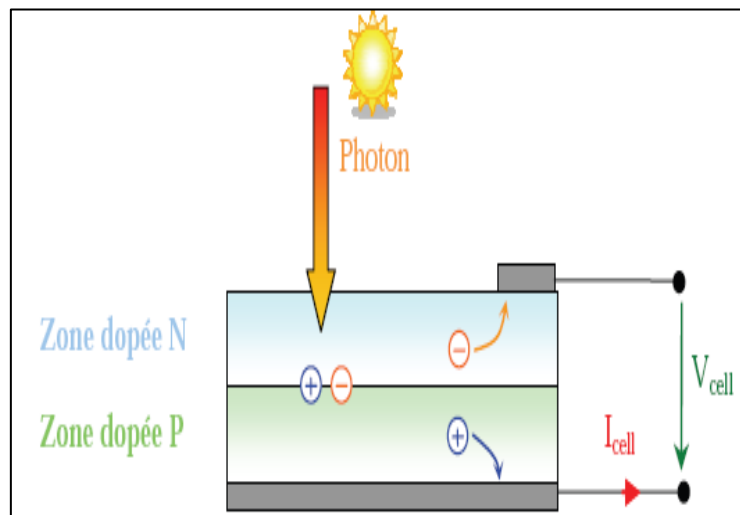


Fig.I.6: Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque.[10]

I.4 Avantages et les inconvénients de l'énergie solaire[10]

L'énergie solaire présente les avantages suivants :

- La source d'énergie solaire (soleil) est une source naturelle,
- Le système d'exploitation de l'énergie solaire est silencieux et sans danger pour les humains,
- Des formes d'aides gouvernementales peuvent aider à financer l'installation des panneaux.

L'énergie solaire présente les inconvénients suivants

- Les prix de fabrication et d'installation des panneaux sont assez élevés,
- Il est impossible d'obtenir une autonomie énergétique complète par le biais de panneaux solaires seulement,

- Le rendement énergétique est plutôt faible (300 W maximum pour un panneau solaire domestique) [9]

Les différents usages de l'énergie solaire, sont donnés sur la figure I.7.

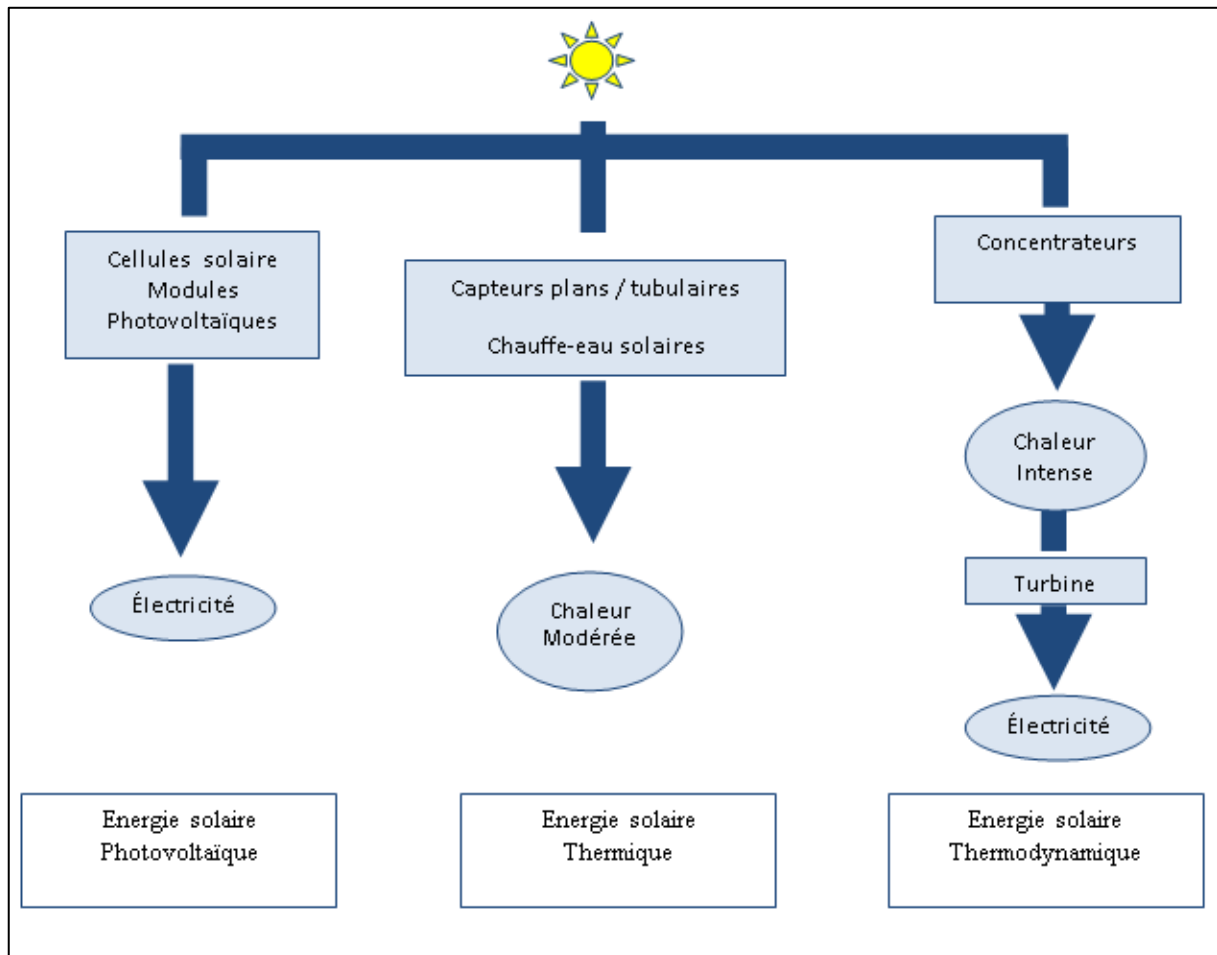


Fig. I.7 : Différents modes d'exploitation de l'énergie solaire.

I.5 Energie solaire récupérable

I.5.1 Orientation et inclinaison des capteurs solaires

La position des modules photovoltaïques (ou capteurs thermiques) par rapport au soleil influe directement sur leur production énergétique. Il est très important de bien les placer pour les utiliser au maximum de leurs possibilités. On appelle orientation le point cardinal vers lequel est tournée la face active du panneau (sud, nord, sud-ouest...) quant à l'inclinaison, elle indique l'angle que fait le panneau avec le plan horizontal, elle se compte donc en degrés (figure I.8).

I.5.2 Pourquoi orienter un panneau solaire ?

Un panneau solaire transforme l'énergie du soleil en énergie électrique : Le panneau est constitué de couches de silicium chargées positivement et négativement. Quand les rayons du

soleil entre en contact avec le panneau, il fournit de l'énergie qui permet de réaliser une réaction entre les couches : Cela crée une différence de potentiel électrique et donc crée un courant électrique qui peut charger des batteries. De plus, plus le panneau reçoit d'énergie solaire, plus il produit d'électricité.

Cela a amené les chercheurs à réfléchir comment optimiser la réception d'énergie. Après quelques recherches, ils ont découvert que le panneau reçoit mieux les rayons du soleil si ceux-ci arrivent perpendiculairement au plan formé par le panneau (comme sur l'image de à gauche de la figure I.9). Il y a plusieurs raisons à cette position [11] :

- La réflexion est quasi nulle quand le panneau est de face,
- Comme nous montre la figure à gauche, la surface sur laquelle les rayons tapent est réduite quand le panneau n'est pas perpendiculaire aux rayons.

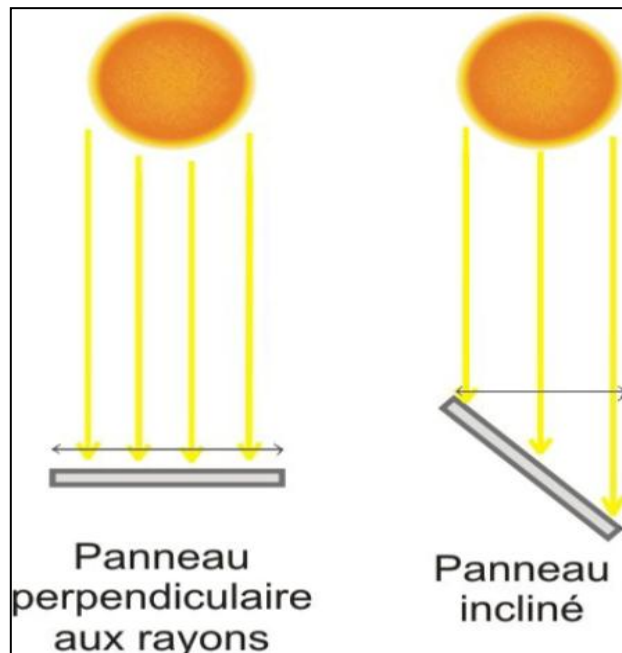


Fig. I.8 : Rayonnements solaires sur un panneau horizontal et un panneau incliné.[11]

I.5.3 Comment orienter et incliner les capteurs solaires ?

Quand on a le choix, l'orientation idéale d'un capteur solaire obéit à une règle très simple à retenir : vers l'Equateur, ce qui donne :

- Orientation vers le Sud dans l'hémisphère nord,
- Orientation vers le Nord dans l'hémisphère sud.

En ce qui concerne l'inclinaison, c'est un peu plus compliqué. Prenons d'abord le cas d'une application autonome qui consomme une énergie quasi constante tout au long l'année. L'hiver étant la période la moins ensoleillée, c'est à cette période qu'il faut optimiser la production.

Les capteurs doivent donc pouvoir récupérer l'énergie d'un soleil dont la hauteur est faible. Il en résulte qu'en Europe, pour une utilisation annuelle, l'inclinaison idéale est environ égale à la latitude du lieu + 10° (pour une orientation sud).

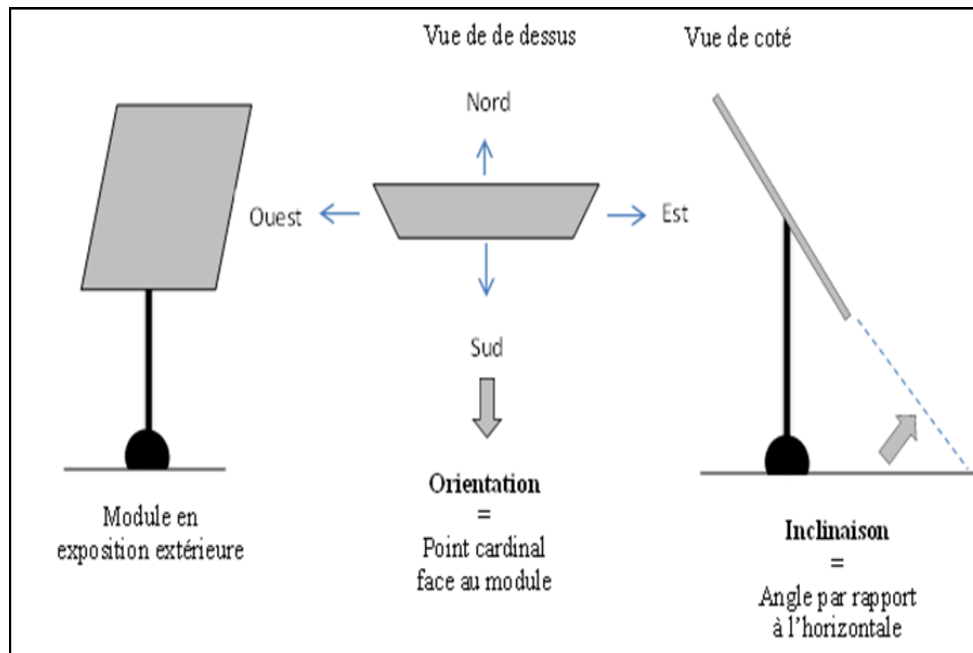


Fig. I.9 : Définition de l'orientation et de l'inclinaison d'un panneau.

Cette orientation Sud n'est pas toujours possible sur une habitation à cause de son implantation par rapport aux points cardinaux. Si on exclut généralement les orientations Nord, Nord-Est et Nord-Ouest qui sont vraiment trop défavorables il est par contre envisageable de placer des capteurs vers l'Est et l'Ouest. En effet, par rapport à un emplacement idéal à 30° Sud, on ne perdra pas plus de 15% en production annuelle, pour les orientations Est, Ouest, Sud-Ouest et Sud-Est si l'inclinaison ne dépasse pas 30° par rapport à l'horizontale [12].

Il est nécessaire de connaître les coordonnées du soleil par rapport à l'endroit où on va placer les capteurs pour mieux les orienter vers lui et maximiser ainsi l'énergie interceptée par ces derniers. Dans ce qui suit on va présenter des notions concernant le mouvement et de la terre et du soleil.

I.6 La terre

La terre a la forme d'un ellipsoïde de révolution aplati. Sa superficie est de $510\,101.10^3 \text{ km}^2$, son volume est égale à $1\,083\,320.106 \text{ km}^3$, sa masse est 6.10^{21} tonnes et sa densité moyenne est de 5.52.

I.7 Mouvement de la terre autour du soleil

La terre décrit du autour du soleil une orbite elliptique quasi-circulaire avec une période de 365.25 jours (figure I.10). Le plan de cette orbite est appelé plan de l'écliptique. C'est au solstice d'hiver (21 décembre) que la terre est la plus près du soleil : 147 millions de km et au solstice d'été qu'elle en est la plus éloignée : 152 millions de km, la distance moyenne étant de 149.5 million de km. La terre coupe le petit axe de son orbite aux équinoxes de printemps (21 mars) et d'automne (21 septembre). Elle tourne sur elle-même avec une période de 24 heures. Son axe de rotation (l'axe des pôles) a une orientation fixe dans l'espace, il fait un angle δ avec la normale du plan de l'écliptique. [13]

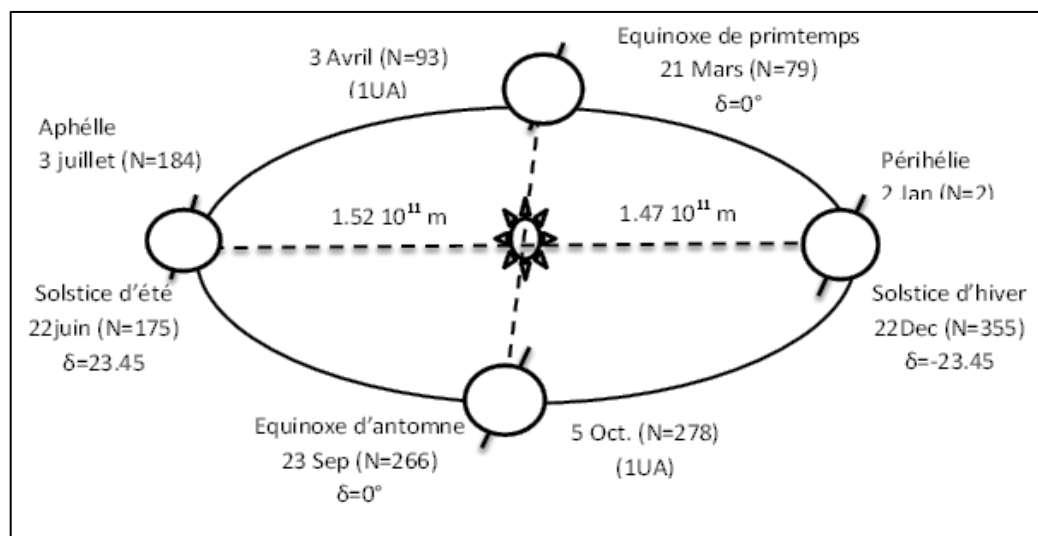


Fig. I.10 : Mouvement de la terre autour du Soleil.

I.8 Trajectoire apparente du soleil

Pour un observateur situé sur la surface de la terre, le soleil décrit une trajectoire apparente qui dépend de la latitude et la longitude du lieu où il se trouve. Rappelons que la latitude est la distance angulaire d'un point quelconque du globe par rapport à l'équateur (de 0 à 90° dans l'hémisphère nord). Quant à la longitude, c'est également un angle, donné par rapport au méridien de Greenwich (arc de cercle passant par les deux pôles et la ville de Greenwich en Angleterre) en se déplaçant vers l'Est.

La figure (I.11) retrace les trajectoires décrites par le soleil pour un lieu donné. On peut y lire la hauteur et l'azimut du soleil pour un instant quelconque de l'année.[12]

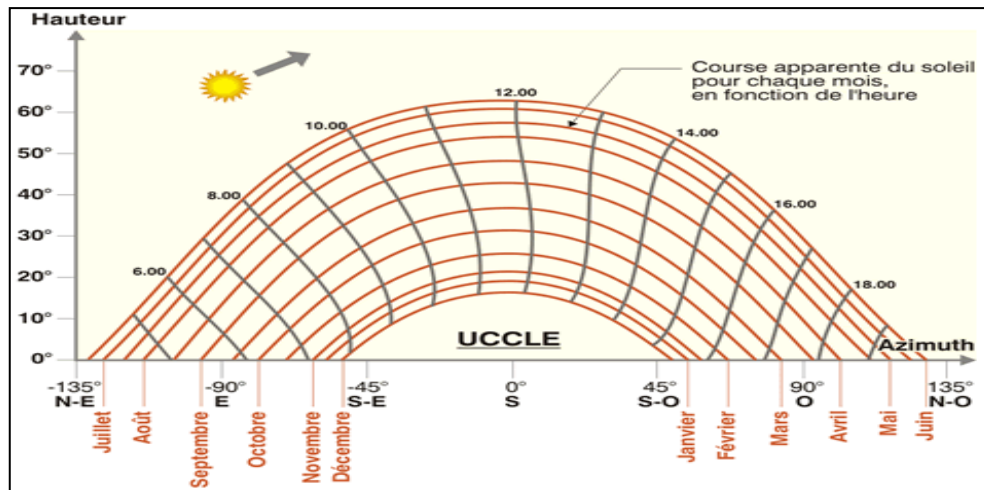


Fig. I.11 : Trajectoire du soleil pour chaque mois

I.9 Composition de l'atmosphère

L'atmosphère, comme tous les corps, subit l'effet de la pesanteur. Sa densité est maximale à la surface du globe. La masse totale de l'atmosphère se répartit à 90 % entre 0 et 16 km. Les rayons X, en atteignant l'enveloppe gazeuse qui entoure la Terre, l'ionisent. Ainsi s'explique la formation de l'ionosphère, à une altitude de la Terre comprise entre 50 et 1000 km environ.

La stratosphère s'étend en moyenne entre 11 et 50 km. En général, la température y croît avec l'altitude mais non uniformément, lentement jusqu'à 20 km, puis de 1 à 2.5 °C par kilomètre au-delà de cette altitude. Ce réchauffement provient de l'ozone qui absorbe, dans le proche ultraviolet, les rayonnements dangereux pour la vie sur Terre.

Enfin, entre 11 km et le sol se situe la troposphère, siège de phénomènes météorologiques. La température y décroît en moyenne de 7 °C par kilomètre à partir du sol comme la représente la (figure I.12). La vapeur d'eau reste confinée essentiellement dans cette zone.

L'atmosphère se compose principalement d'azote (78 %), d'oxygène (21 %) et d'argon (0.93 %). On identifie aussi de l'hydrogène (0.01 %) et du gaz carbonique (0.03 %). Deux autres constituants pourtant en très faible quantité, la vapeur d'eau et l'ozone, sont à l'origine des bandes d'absorption.

La vapeur d'eau, confinée presque en totalité dans la troposphère, provient de la surface terrestre et y retourne sous la forme de précipitations. Son opacité aux radiations infrarouges entraîne des modifications importantes dans la répartition spectrale du rayonnement solaire incident.

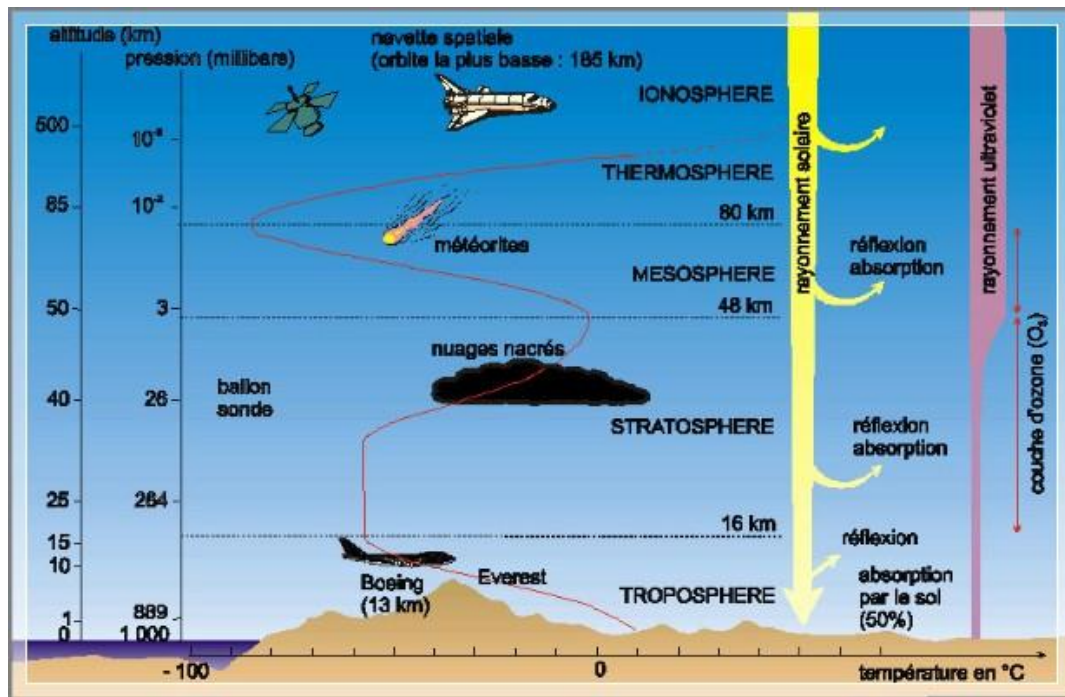


Fig.I.12 : Structure de l'atmosphère.[23]

L'ozone, en quantité infinitésimale au sol, atteint une densité maximale dans la stratosphère.

Des particules, poussières, microgouttelettes interceptent les radiations incidentes, les absorbent et les réfléchissent. Cet affaiblissement, ou encore cette extinction du rayonnement solaire direct, dépend évidemment du nombre et de la dimension des particules atmosphériques rencontrées par les radiations du spectre solaire.[2]

I.10 Coordonnées géographiques

Ce sont les coordonnées angulaires qui permettent le repérage d'un point sur la terre (figure I.13). [14]

I.10.1 Longitude (L)

C'est l'éloignement par rapport au méridien de Greenwich, mesuré en degré. Elle est comptée positivement vers l'est et négativement vers l'ouest, à partir du méridien Greenwich.

I.10.2 Latitude (ϕ)

C'est l'éloignement d'un point sur la surface de la terre par rapport à l'équateur, mesuré en degré (mesurée à partir du centre de la terre), permettent de repérer la distance angulaire d'un point quelconque à l'équateur. Elle varie de 0° à 90° dans l'hémisphère nord et de -90° à 0° dans l'hémisphère sud.

I.10.3 L'altitude (Z)

C'est l'altitude d'un point correspondant à la distance verticale entre ce point et une surface de référence théorique (le niveau de la mer = 0), elle est exprimée en mètre.

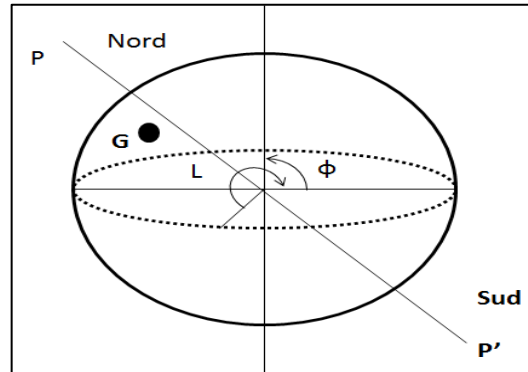


Fig. I.13: Coordonnées géographiques d'un lieu.

I.11 Coordonnées locales (horizontales)

I.11.1 Hauteur angulaire h

La hauteur du soleil est l'angle que fait la direction du soleil avec le plan horizontal (c'est-à-dire tangent au sol) (figure I.14), elle est donnée par la relation suivante :

$$\sin h = \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos \omega \quad (\text{I. 2})$$

Où,

δ est la déclinaison, ω est l'angle horaire.

I.11.2 Azimut

L'azimut correspondant à l'angle que fait le plan du méridien local avec le plan vertical passant par le soleil (figure I.14). L'azimut est compté négativement vers l'est et positivement vers l'ouest.

$$\sin a = \frac{\cos \delta \sin h}{\cos h} \quad (\text{I. 3})$$

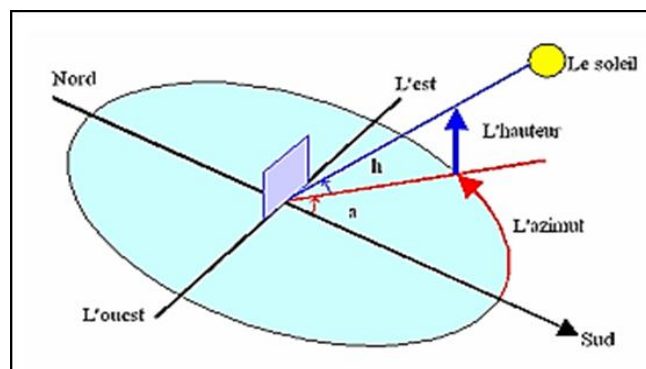


Fig. I.14: Coordonnées horizontales du soleil.[10]

Remarquons que ces coordonnées dépendent du lieu d'observation et que pour cela elles sont appelées aussi coordonnées locales. Des calculs solaires effectués en un lieu donné avec ces coordonnées ne pourront donc pas être transposable directement en un autre lieu.[6]

I.12. Coordonnées horaires

Le déplacement des astres du fait du mouvement diurne rend intéressant l'utilisation des coordonnées horaires, qui est un système de coordonnées locales "mixtes", dans lequel les plans de référence sont l'équateur céleste et le plan méridien du lieu de l'observation. La position d'un objet sur la voûte céleste est définie par l'angle horaire et la déclinaison.

Notons que 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. [14]

I.12.1 Angle horaire

L'angle horaire ω est l'angle que fait le plan contenant le cercle horaire de l'astre (soleil) avec le plan contenant le méridien céleste. Il est compté sur l'équateur, positivement à l'ouest, négativement à l'est (voir la figure I.15).

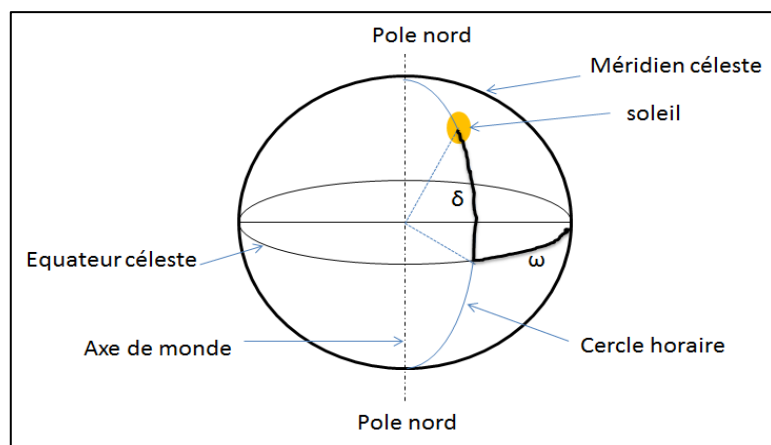


Fig.I.15: Coordonnées horaires.

I.12.2 Déclinaison

L'angle que fait le plan de l'équateur terrestre avec la direction Terre-soleil est appelé la déclinaison. Cet angle varie tout au long de l'année de façon symétrique de $-23^{\circ}26'$ à $+23^{\circ}26'$ (figure 1.16)[6].

La valeur de la déclinaison peut être obtenue avec une bonne précision par la formule suivante :

$$\delta = 23.45^{\circ} \cdot \sin 360 \cdot \frac{(284 + n)}{365} \quad (\text{I. 4})$$

Avec, n : numéro du jour.

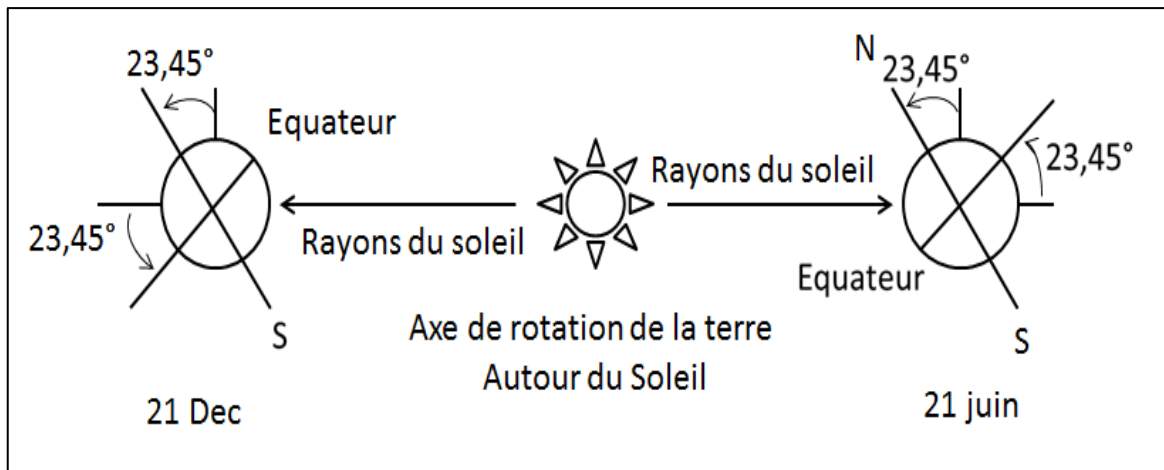


Fig.I.16: Déclinaison solaire.

Remarque :

Les deux coordonnées (ω et δ) sont aussi appelées coordonnées semi locales puisque l'angle horaire ω dépend du lieu d'observation, contrairement à la déclinaison δ . [6]

I.13. Paramètres de temps

I.13.1 Temps solaire vrai

La position du soleil dans le ciel nous renseigne sur le temps solaire vrai (TSV ou solar Time – ST-en anglais). C'est le temps donné par les cadrans solaire.

Il existe une relation simple entre l'heure solaire TSV et l'angle horaire ω :

$$\omega = (\text{TSV} - 12) * 15 \quad (\text{I.5})$$

Avec TSV en heures et ω en degrés. Cette formule provient du fait que le soleil semble tourner dans le plan de l'équateur de 360° en 24 heures soit 15° par heure. De plus, le choix arbitraire de prendre l'angle horaire nul quand le soleil est dans le plan du méridien local (il est alors midi solaire).

Comme on l'a déjà vu, la trajectoire de la Terre autour du soleil est elliptique (première loi de Kepler). Durant ce mouvement, le rayon vecteur soleil-Terre balaie des aires égales dans des temps égaux (deuxième loi de Kepler). Tout ceci, ajouté au fait que l'axe de rotation de la Terre est incliné par rapport au plan de l'écliptique, fait que la durée du jour solaire vrai varie selon les époques de l'année. On introduit alors la notion de temps solaire moyen (TSM). [9]

I.13.2 Temps solaire moyen

Le temps solaire moyen (TSM) varie de ± 16 mn par rapport au TSV.

On a :

$$\text{TSM} = \text{TSV} - \text{ET} \quad (\text{I.6})$$

Où le terme correctif ET est appelé équation du temps. Cette quantité peut être calculée par la formule suivante :

$$\begin{aligned} ET(mn) = & -0.002 + 0.4197 \cos(\gamma) - 7.3509 \sin(\gamma) - 3.2265 \cos(2\gamma) \\ & -9.3912 \sin(2\gamma) - 0.0903 \cos(3\gamma) - 0.3361 \sin(3\gamma) \end{aligned} \quad (I.7)$$

Dans laquelle γ (en degrés) vaut : $\gamma = 360^n/366$

I.13.3 Temps solaire universel (TU)

Le temps universel TU est égal au temps solaire moyen du méridien origine (méridien de Greenwich). On a donc :

$$TU = TSM + \frac{L}{15} \quad (I.8)$$

Avec L la longitude, exprimée en degrés et les temps en heures. L'heure que nous lisons aux horloges publique est le temps légal (T.L). Il est égal au temps universel affecté des corrections de fuseau C_1 (> 0 à l'est de Greenwich, < 0 à l'ouest) ainsi que d'une correction de saison C_2 s'il y a lieu.[8]

$$TL = TU + C_1 + C_2 \quad (I.9)$$

Conclusion

L'énergie solaire est l'une des ressources renouvelables les plus abondantes sur terre, le flux d'énergie solaire reçu annuellement sur la surface de la terre représente environ 15000 fois la consommation d'énergie.

Dans ce chapitre nous avons décrit en générale les différents moyens d'interception de l'énergie solaire. En effet, l'énergie solaire est actuellement exploitée selon deux techniques :

La conversion du rayonnement solaire en chaleur par des capteurs thermiques c'est le solaire thermique.

La conversion directe du rayonnement lumineux en électricité par des capteurs (Cellule photovoltaïque) c'est le solaire photovoltaïque.

La production d'énergie à partir du soleil est liée à son intensité, à la durée d'ensoleillement et à l'orientation du capteur par rapport au soleil.

CHAPITRE II

IRRADIATION

SOLAIRE

II.1. Introduction

Dans ce chapitre on va présenter des notions sur le rayonnement solaire. Le rayonnement solaire après sa traversée de l'atmosphère est considéré comme la somme de deux composantes Directe et Diffuse. On va présenter aussi quelques modèles simplifiés pour l'évaluation de l'énergie solaire reçu sur un plan horizontal et incliné. Ces modèles vont servir à la détermination de l'angle optimal d'inclinaison des capteurs solaires afin de recevoir le maximum de rayonnement et par conséquent d'énergie solaire.

II.2. Rayonnement solaire

II.2.1. Rayonnement solaire hors atmosphère

L'essentiel du rayonnement solaire hors atmosphère se trouve dans l'intervalle spectral [0.25 , 4] μm . La figure (2.1) représente la répartition spectrale du rayonnement solaire hors atmosphère, elle est assez proche de la répartition spectrale de l'émission d'un corps noir qui se trouve à la température $T=5760\text{ K}$. [16]

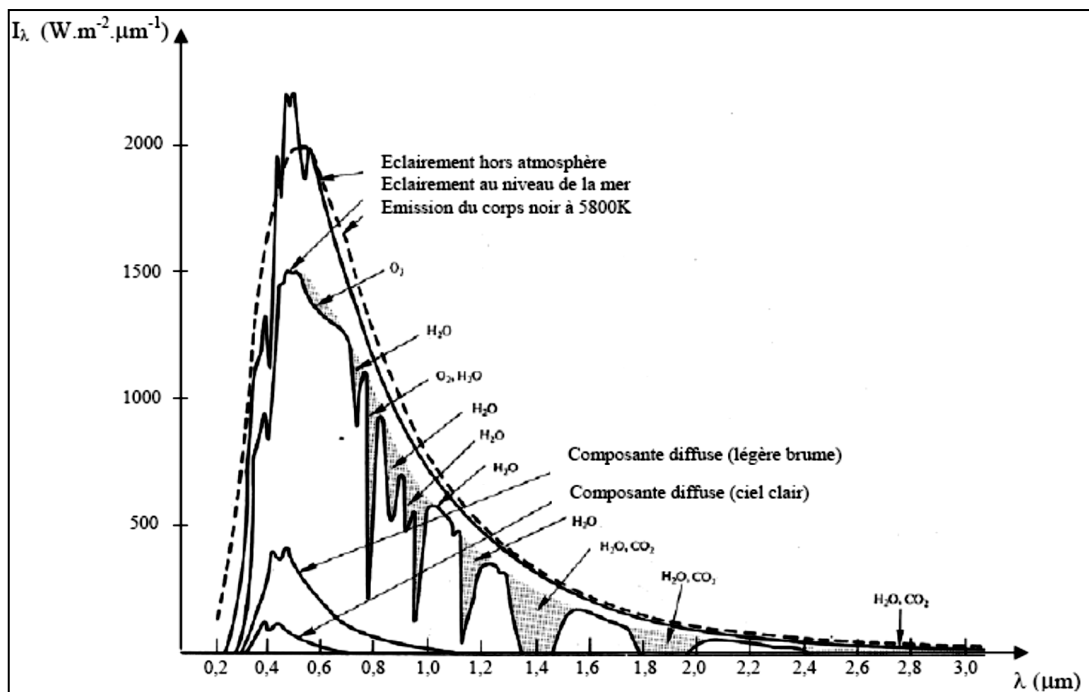


Fig. II.1 Spectre solaire AM0 et AM1 et celui émis par un corps noir à 5760 K. [16]

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

- Le domaine de l'ultra-violet ($0.29 < \lambda < 0.4$) μm , représente environ (9%) de l'énergie totale émise par le soleil,
- Le domaine du visible ($0.4 < \lambda < 3.5$) μm , représente (40 %) de l'énergie totale,
- Le domaine de l'infrarouge ($0.8 < \lambda < 3.5$) μm , représente (51%) de l'énergie totale.

L'éclairement énergétique d'une surface placée perpendiculairement à l'axe soleil-terre est en moyenne de 1367 W/m^2 , cette grandeur est appelée constante solaire, elle varie avec la distance terre-soleil de plus ou moins (3.5 %) au cours de l'année. [16][17]

Le tableau 2.1 donne les valeurs énergétiques caractéristiques des diverses longueurs d'ondes, ainsi que les zones correspondantes au spectre lumineux du rayonnement solaire.

Tableau II.1: Valeurs énergétiques des photons issues du spectre solaire.[18]

$\lambda(\mu\text{m})$	$E_{\text{ph}}(\text{eV})$	Zone
0.2	6.2	Ultra-violet
0.4	3.1	Visible bleu
0.5	2.48	Visible jaune-vert
0.78	1.59	Visible rouge
1	1.24	Infrarouge
2	0.62	Infrarouge
4	0.31	Infrarouge

Les capteurs d'énergie solaire doivent donc être compatibles avec ces longueurs d'ondes pour pouvoir piéger les photons et les restituer sous forme de chaleur ou d'électrons. Pour que le rayonnement solaire produise un courant électrique dans un matériau donné, faisant alors office de capteur, il faut que les photons soient tout d'abord absorbés par un ou plusieurs matériaux sensibles à la longueur d'onde des photons, qui sont ensuite collectés afin de constituer un courant électrique global.

II.2.2. Constante solaire

Une surface plane d'un mètre carré perpendiculaire au rayonnement solaire et située à la limite de l'atmosphère terrestre reçoit une puissance rayonnée fonction de la distance soleil-terre (voir la figure 2.2). Cette distance variant quelque peu au cours de l'année, compte tenu de la légère excentricité de l'orbite terrestre, il en est de même pour la puissance reçue par la surface en question. Néanmoins le flux solaire varie peu au cours du temps. Aussi appelle-t-on constante solaire, notée C^* , la valeur moyenne du flux solaire reçu à la limite de l'atmosphère terrestre.

La communauté internationale a choisi en l'an 2013 la valeur : $C_s^* = 1367 \text{ W/m}^2$ pour la constante solaire.[9]

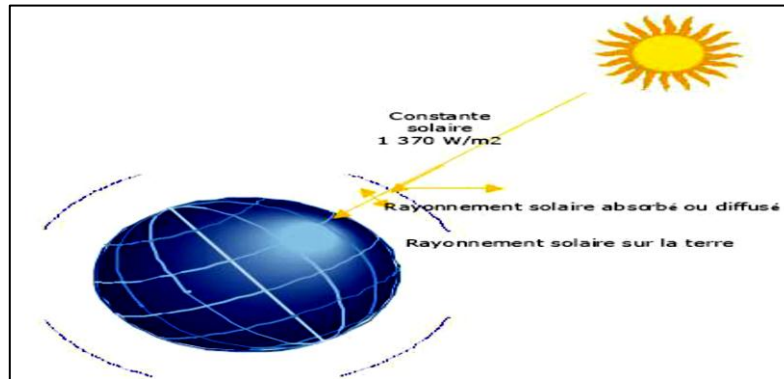


Fig.II.2: La constante solaire.

II.2.3. Masse d'air

On appelle masse d'air ou Air Mass, le rapport entre l'épaisseur atmosphérique traversée par le rayonnement direct pour atteindre le sol et l'épaisseur traversée à la verticale du lieu.

A l'aide des points O, A et M et l'angle h , la longueur du trajet du soleil à travers l'atmosphère (voir la figure 2.3)

$$OM = \frac{OA}{\sin h} \quad (\text{II.1})$$

Donc, la masse d'air

$$\frac{OM}{OA} = \frac{1}{\sin h} \quad (\text{II.2})$$

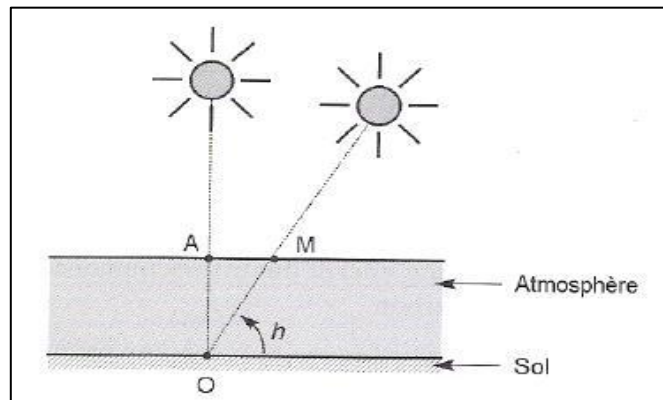


Fig.II.3 : Rayonnement solaire et le nombre d'air masse.[18]

pour un site quelconque :

$$AMX = \frac{1}{\sin(h)} \times \frac{P}{1013} \quad (\text{II.3})$$

p : pression atmosphérique du site considéré (mb),

h : la hauteur du soleil en degrés.

Et on dit qu'on a les conditions AM1 lorsque le soleil est au zénith, AM2 lorsqu'on a une inclinaison de 30° . Hors atmosphère à haute altitude, on est dans les conditions AM0.

Les courbes ci-dessous (figure 2.4) représentent le spectre solaire pour différentes valeurs de la masse d'air, notée AM. L'indice après AM représente le nombre d'atmosphère traversé, AM0 donc est le spectre solaire hors atmosphère, AM2 est le spectre solaire ayant traversé 2 épaisseurs d'atmosphère (hauteur de 30° du soleil au-dessus de l'horizon).

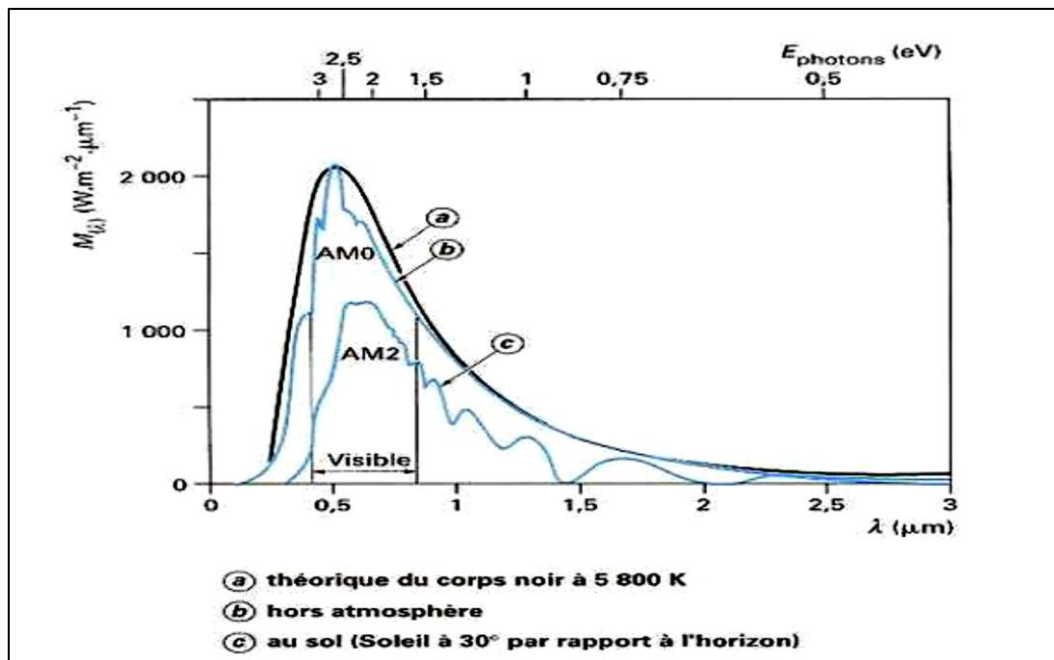


Fig.II.4 : Spectre solaire en fonction de différentes valeurs, de la masse d'air.[18]

Il est important de comprendre les deux aspects recouverts par le concept de nombre d'air masse. D'une part, il caractérise la puissance transportée par le rayonnement solaire (1367 W/m^2 pour AM0, 833 W/m^2 pour AM1,5) et d'autre part, il sert à définir un spectre de référence pour calibrer les cellules étalons destinées à qualifier les performances des dispositifs photovoltaïques. Ainsi les conditions standards de qualifications des cellules sont : un spectre AM1,5, une puissance incidente 1000 W/m^2 et une température de 25°C . Sauf indication contraire, c'est pour de telles conditions que doivent être fournies les performances et spécifications d'un dispositif photovoltaïque donné.[18]

II.2.4. Durée d'insolation

La durée d'insolation correspond au nombre d'heures dans la journée, entre le lever et le coucher du soleil, où celui-ci est bien visible. Le relevé est fait au moyen de l'héliographe de

Campbell-Stokes dans lequel une sphère de cristal concentre les rayons du soleil sur un papier qu'il brûle en se déplaçant. Ainsi, seuls les moments où le soleil est bien visible sont enregistrés ; on parle alors de durée d'insolation réelle ou effective et dépend du fait que le soleil levé soit visible du point d'observation ou caché par les nuages.

Au défaut de l'héliographe, il est possible à partir du calcul du mouvement astronomique relatif du soleil et de la terre d'évaluer la durée théorique du jour ; c'est-à-dire, celle qu'il y aurait si les nuages ne cachaient pas le soleil. Cette durée est calculée en fonction de la latitude du site et de la déclinaison apparente qu'elle-même dépend de la période de l'année considérée. [18]

II.2.5. Eclairement solaire

On introduit la notion de l'éclairement comme étant la densité de puissance reçue par une surface soumise à un lumineux dans les conditions atmosphériques, cette densité de puissance atteint 1kW/m^2 pour un endroit situé au niveau de la mer. Il est important de préciser qu'en raison de la nature des nuages, de leur distribution dans le ciel, le capteur ne reçoit pas la même quantité d'éclairement de chaque direction, c'est pour cela qu'on parle d'une distribution anisotrope. En de rares cas (ciel complètement nuageux, la distribution est dite isotrope). La quantification de l'albédo est fortement dépendante de la nature du sol, ainsi un sol recouvert de neige présentera une valeur élevée de l'albédo qu'un sol rocailleux.

Notons le fait que l'ensemble des capteurs solaires ne répondent pas de la même façon quand ils sont exposés face au soleil.

La cellule (PV) répond au rayonnement global et dépend beaucoup de longueur d'onde. Elle est particulièrement sensible aux radiations solaires de longueur d'onde comprise entre $(0.4 \text{ et } 1)\mu\text{m}$ du spectre solaire.

Les capteurs thermiques (chauffe-eau, etc.) sont plus sensibles au rayonnement infrarouge.[19]

II.3 Rayonnement solaire au sol

En traversant l'atmosphère, une partie du rayonnement solaire incident parvient directement au sol, l'autre partie, qui a été diffusée, provient du reste de la voûte céleste hors du disque solaire.

Un capteur incliné reçoit une fraction du rayonnement solaire renvoyée vers l'atmosphère après réflexion diffuse par sol (voir figure 2.6). La fraction de ce rayonnement non absorbée par le sol s'appelle l'albédo. Celui-ci varie en fonction du sol et de son état de surface. Par exemple,

pour une couche de neige fraîche on prend en moyenne 0.85, pour une prairie : l'albédo varie entre 0.12 et 0.25, pour la mer : il se situe entre 0.2 et 0.05 selon la nature des vagues et la hauteur de soleil. Dans le cas d'un corps noir parfait il est nul.[2]

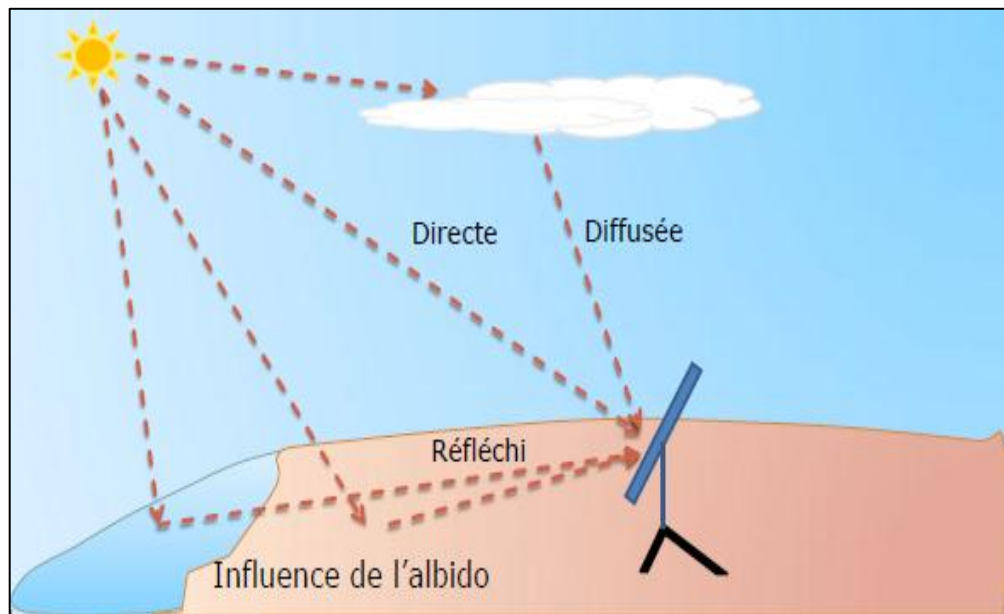


Fig.II.5: Les trois composantes du rayonnement incident sur un capteur incliné.

II.3.1 Estimation du rayonnement solaire

Suite à l'atténuation du rayonnement solaire par les différents phénomènes atmosphériques, le rayonnement solaire sur une surface au sol est composé comme suit:

II.3.1.1 Rayonnement direct

Le rayonnement direct est le rayonnement reçu directement du soleil (voir la figure II.6). Il peut être mesuré par un pyréliomètre.

Un plan incliné est caractérisé par son inclinaison β (par rapport à l'horizontale), et de son orientation ou azimut α par rapport au sud (négatif vers l'est, sens anti trigonométrique).

Le rayonnement direct reçu dans le plan du capteur est exprimé comme suit:

$$H_B = H_b \cdot \cos(\theta_i) \quad (\text{II-4})$$

Avec :

H_b est le rayonnement direct sur un plan horizontal,

θ_i Angle d'incidence : c'est l'angle entre la direction du soleil et la normale au plan, On parle souvent d'incidence normale lorsque $\theta_i = 0$.

L'angle d'incidence s'écrit, en fonction de la position du soleil [la hauteur (h) et l'azimut (α)], l'inclinaison (β) du plan récepteur et de son azimut (γ), par la relation suivante:[19][21][23]

$$\cos(\theta_i) = \cos(90 - h) \cos(\beta) + \sin(\beta) \sin(90 - h) \cos(a - \gamma) \quad (\text{II-5})$$

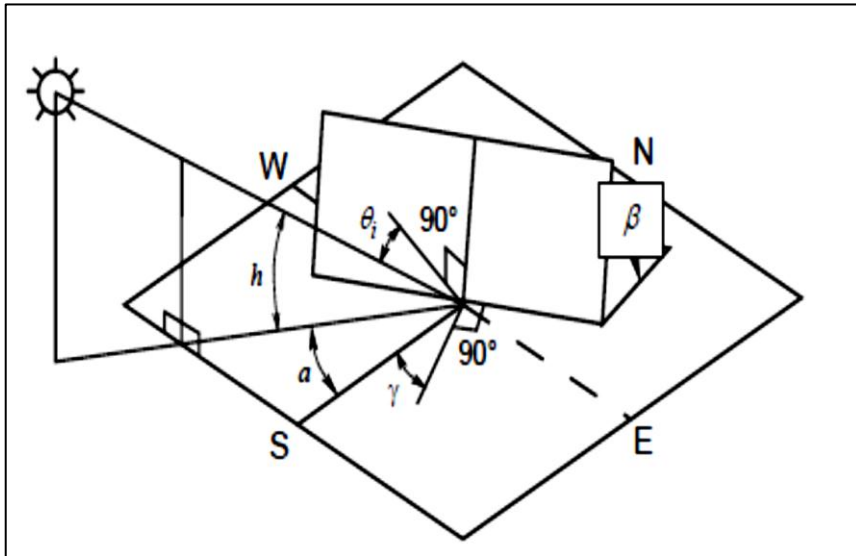


Fig.II.6. Le rayonnement direct sur une surface inclinée. [23]

II.3.1.2 Rayonnement diffus

C'est le rayonnement qui arrive au niveau au sol après avoir subi des collisions avec les constituants atmosphériques (figure II.7)[23].

On en distingue :

- Le rayonnement diffus isotropique provenant de toute la voûte céleste,
- Le rayonnement diffus circonférence provenant de la couronne solaire,
- Le rayonnement diffus provenant d'une mince bande d'horizon due à une accumulation d'aérosols dans les basses altitudes.

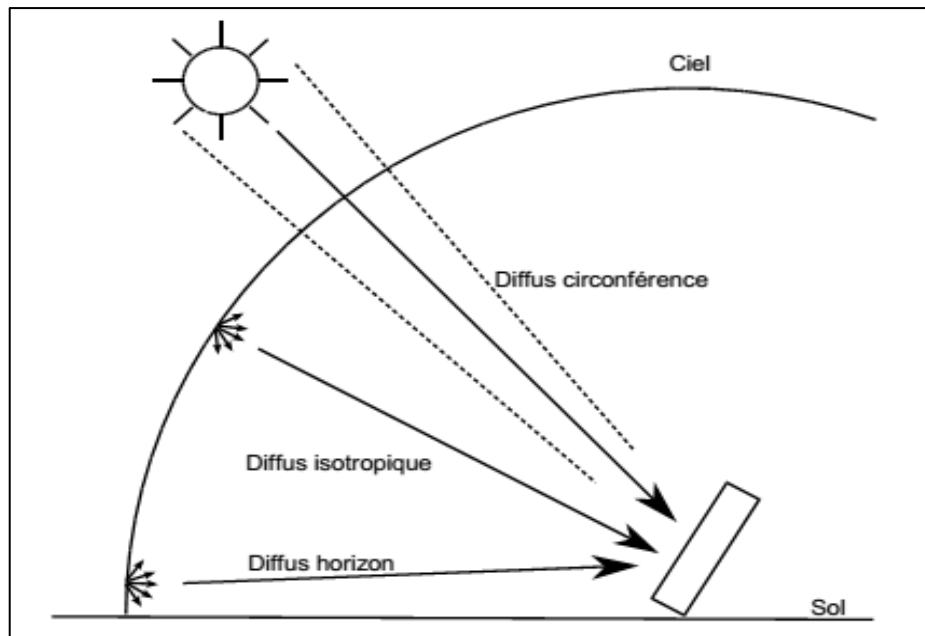


Fig.II.7 : Rayonnement diffus[23]

II.3.1.2.1. Modèles d'estimation du rayonnement diffus ciel**a. Modèle de première génération****a.1. Modèle isotrope**

Le modèle isotrope de Liu Jordan (1962) est le plus simple de tous les modèles, c'est un modèle qui suppose que le ciel est isotrope. Dans ce modèle, l'intensité du rayonnement diffus du ciel H_D est supposée être uniforme sur toute la voûte céleste. Le rayonnement diffus du ciel sur un plan incliné avec une inclinaison (β) peut être estimé par l'expression suivante : [23]

$$H_D = \frac{1}{2} H_d (1 + \cos\beta) \quad (II-6)$$

Où ;

H_d est le rayonnement diffus sur un plan horizontal.

β angle d'inclinaison du plan récepteur.

a.2. Modèle circumsolaire[]

Le modèle circumsolaire (1983) suppose que tout le rayonnement provient du disque solaire. C'est un modèle qui suppose que le ciel est sans nuages il a été démontré que : [23]

$$H_D = H_d R_b \quad (II.7)$$

Avec,

$$R_b = \frac{\cos(\varphi - \beta) \cos\delta \sin\omega'_s + \left(\frac{\pi}{180}\right) \omega'_s \sin(\varphi - \beta) \sin\delta}{\cos\varphi \cos\delta \sin\omega_s + \left(\frac{\pi}{180}\right) \omega_s \sin\varphi \sin\delta} \quad (II.8)$$

Ou

$$R_b = \frac{\sin\delta \cdot \sin(\varphi - \beta) + \cos\delta \cdot \cos(\varphi - \beta) \cdot \cos\omega}{\sin\delta \cdot \sin\varphi + \cos\delta \cdot \cos\varphi \cdot \cos\omega} \quad (II.9)$$

Et

$$\omega'_s = \min \left[\omega_s = \cos^{-1}(-\tan\varphi \cdot \tan\delta) \right. \\ \left. \cos^{-1}(-\tan(\varphi - \beta) \cdot \tan\delta) \right] \quad (II.10)$$

Où ;

R_b est le rapport entre le rayonnement journalier direct moyen du mois sur un plan incliné et le rayonnement journalier direct moyen du même mois sur un plan horizontal,

φ latitude du lieu considéré (en degrés),

β pente de la surface inclinée par rapport à l'horizontale (en degrés),

δ déclinaison de la journée (en degrés),

ω' angle horaire de lever du soleil sur un plan incliné pour le jour moyen du mois (en degrés).

b Modèles de seconde génération

Ce sont des modèles anisotropes ; ces modèles différentient entre rayonnement ciel clair et ciel couvert et offrent une certaine amélioration aux modèles de première génération.

b1. Modèle Temps-Coulson

Le modèle de Temps-Coulson (1977) pour un ciel clair prend en considération la correction due au rayonnement diffus horizon et diffus circonférence ; il peut être estimé comme suit :[23]

$$H_D = H_d \cos^2 \left(\frac{\beta}{2} \right) \cdot \left(1 + \sin^3 \left(\frac{\beta}{2} \right) \right) \cdot (1 + \cos^2 \theta_i) \sin^3 \theta_z \quad (\text{II.11})$$

Où ;

θ_i : Angle d'incidence,

θ_z : Angle zénithal du soleil,

Le terme $\left(1 + \sin^3 \left(\frac{\beta}{2} \right) \right)$ rend compte de l'effet horizon.

Le terme $(1 + \cos^2 \theta_i) \sin^3 \theta_z$ pour l'effet circumsolaire.

b2. Modèle de Klucher

Le modèle de Klucher (1979) est une généralisation du modèle Temps-Coulson pour tout type de ciel. [23]

$$H_D = \frac{1}{2} H_d (1 + \cos \beta) \cdot (1 + F \sin^3 \beta) \cdot (1 + F \cos^2 \theta_i \sin^3 \theta_z) \quad (\text{II.12})$$

Avec,

F : est une fonction de modulation telle que :

$$F = 1 - \left(\frac{H_d}{H_g} \right)^2 \quad (\text{II.13})$$

H_g est le rayonnement global reçu sur une surface horizontal.

La valeur de F est nulle lorsque le ciel est couvert et l'équation devient celle de l'isotrope. Quand F tend vers un, l'équation décrit les conditions d'un ciel clair (équation donnée par temps et Coulson).

b3. Modèle de Hay

Dans modèle de Hay (1979) est un modèle de rayonnement diffus du ciel, il est composé de la composante isotrope et de la composante circumsolaire. Il est donné par la relation suivante :[23][24]

$$H_D = H_d \left[\left(\frac{H_b}{H_0} \right) R_b + \frac{1}{2} (1 + \cos \beta) \left(1 - \frac{H_b}{H_0} \right) \right] \quad (\text{II.14})$$

Avec,

$$H_b = H_g - H_d \quad (\text{II-15})$$

b3. Modèle de Reindl

En additionnant le rayonnement diffus isotropique, et la radiation du circumsolaire et celle de l'horizon, Reindl et al (1990) ont développé un modèle pour le rayonnement global diffus d'anisotropie sur une surface inclinée, qui est donné par l'expression suivante:

[23][24]

$$H_D = H_d \left\{ (1 - F') \cos^2 \frac{\beta}{2} \left[1 + f \sin^3 \left(\frac{\beta}{2} \right) \right] + F' R_b \right\} \quad (\text{II-16})$$

$$\text{Avec : } F' = \frac{H_b}{H_0} \quad ; \quad f = \sqrt{\frac{H_b}{H_g}}$$

C. Modèles de troisième génération

Les modèles de la troisième génération traitent la composante diffuse anisotrope. Le rayonnement est décomposé dans le cas d'un ciel non couvert en deux composantes, exception pour le modèle Perez et al (1990) qui le décompose en trois composantes.

c.1 Modèle de Gueymard

Gueymard admet dans son modèle de (1987) que le rayonnement diffus est fonction de la distribution du rayonnement. Pour une surface inclinée on peut écrire : ,[23],.

$$H_D = H_d R_d \quad (\text{II-17})$$

L'hypothèse principale est que le rayonnement en ciel nuageux peut être considéré comme la somme de deux rayonnements l'un à ciel clair et l'autre à ciel couvert. Gueymard a introduit un facteur qui correspond à tout type de ciel où les indices 0 et 1 correspondent à l'état du ciel (0: ciel clair ; 1 ciel couvert).

$$R_d = (1 - N_{pt}) R_{d0} + N_{pt} R_{d1} \quad (\text{II-18})$$

$$N_{pt} = \max\{\min(Y, 1), 0\} \quad (\text{II-19})$$

$$Y = 6.6667 \left(\frac{H_d}{H_g} \right) - 1.416 \quad (\text{II-20})$$

$$\text{avec } \left(\frac{H_d}{H_g} \right) \leq 0.227$$

$$\text{Autrement } Y = 1.2121 \left(\frac{H_d}{H_g} \right) - 0.1758 \quad (\text{II-21})$$

R_{d0} et R_{d1} sont obtenus si les distributions normalisés du rayonnement correspondant sont disponibles.

$$R_{d0} = \exp(a_0 + a_1 \cos \theta_i + a_2 \cos^2 \theta_i + a_3 \cos^3 \theta_i) + F(\beta) + G(h) \quad (\text{II.22})$$

$$a_0 = -0.897 - 3.364h' + 3.960h'^2 - 1.909h'^3$$

$$a_1 = 4.448 - 12.962h' + 34.601h'^2 - 48.784h'^3 + 27.511h'^4$$

$$a_2 = -2.770 + 9.164h' - 18.876h'^2 + 23.776h'^3 - 13.014h'^4$$

$$a_3 = 0.312 - 0.217h' - 0.805h'^2 + 0.318h'^3$$

$$F(\beta) = \frac{1 + b_0 \sin^2 \beta + b_1 \sin(2\beta) + b_2 \sin(4\beta)}{1 + b_0} \quad (\text{II.23})$$

$$b_0 = -0.2249 \quad b_1 = 0.1231 \quad b_2 = -0.0342$$

$$G(h) = 0.428 - 0.233h' + 0.384h'^2 - 0.170h'^3$$

$$h' = 0.01h$$

h : hauteur de soleil

Equation de Steven-Unsworth

$$R_{d1} = \cos^2 \left(\frac{\beta}{2} \right) + \frac{2b}{\pi(3+2b)} \times \left(\sin \beta - \beta \cos \beta - \pi \sin^2 \left(\frac{\beta}{2} \right) \right) \quad (\text{II.24})$$

Gueymard propose $b = 1.5$

$$R_{d1} = \cos^2 \left(\frac{\beta}{2} \right) + \frac{1}{2\pi} \times \left(\sin \beta - \beta \cos \beta - \pi \sin^2 \left(\frac{\beta}{2} \right) \right) \quad (\text{II.25})$$

c.2 Modèle de Perez

Le modèle de Perez (1990) est basé sur trois composantes. L'équation de Perez est donnée comme suit :[23]

$$H_D = H_d \left[(1 - F_1) \cos^2 \left(\frac{\beta}{2} \right) + F_1 \left(\frac{a_0}{a_1} \right) + F_2 \sin \beta \right] \quad (\text{II-26})$$

Avec,

$$a_0 = \max[0; \cos \theta_i] \quad ; \quad a_1 = \max[\cos 85^\circ, \cos \theta_z]$$

F_1 et F_2 sont des coefficients de luminosité relatifs à la fraction diffuse et la fraction diffuse horizon et sont fonction de trois paramètres ; l'angle Zénital θ_z , la clarté ε et la luminosité Δ .

Perez a formulé un algorithme unique qui couvre l'ensemble des conditions du ciel. Il a introduit deux paramètres caractérisant les conditions climatiques du ciel qui sont :

- La clarté ε (sky clearness) qui représente le trouble de l'atmosphère

$$\varepsilon = \frac{\frac{H_d + H_{bn}}{H_d} + 0.535 \cdot 10^{-6} \theta_z^3}{1 + 5.535 \cdot 10^{-6} \theta_z^3} \quad (\text{II.27})$$

Avec,

H_d Rayonnement diffus horizontal,

H_{bn} Rayonnement direct normal,

θ_z Angle azimutal en degrés ($\theta_z = 90 - h$) telle que h est la hauteur du soleil.

- La luminosité Δ (sky brightness) qui représente le caractère lumineux du rayonnement diffus du ciel est donnée par la formule suivante :

$$\Delta = m \frac{H_d}{H_{bne}} \quad (\text{II.28})$$

Avec,

m : Masse d'air optique,

H_{bne} : Rayonnement direct normal hors atmosphère,

F_1 et F_2 sont donnés par des tables.

$$F_1 = \max \left[0, \left\{ F_{11} + F_{12}\Delta + \left(\frac{\pi}{180} \right) \theta_z F_{13} \right\} \right] \quad (\text{II.29})$$

$$F_2 = F_{21} + F_{22}\Delta + \left(\frac{\pi}{180} \right) \theta_z F_{23} \quad (\text{II.30})$$

Perez classifie les divers cieux en huit catégories basées sur l'indice de clarté ε de 1.000 à 1.065 pour un ciel couvert (rayonnement direct nul) ; au-delà de 6.200 pour un ciel sans nuages et entre les valeurs extrêmes on a des états de ciel nuageux voir le tableau ci-dessous.

TableauII. 2 : coefficients F_{ij} de Perez.[23]

ε	F_{11}	F_{12}	F_{13}	F_{21}	F_{22}	F_{23}
1-1.065	-0.196	1.084	-0.006	-0.114	0.180	-0.019
1.065-1.230	0.236	0.519	-0.180	-0.011	0.020	-0.038
1.230-1.500	0.454	0.321	-0.255	0.072	-0.098	-0.046
1.500-1.950	0.866	-0.381	-0.375	0.203	-0.403	-0.049
1.950-2.800	1.026	-0.711	-0.426	0.273	-0.602	-0.061
2.800-4.500	0.978	-0.986	-0.350	0.280	-0.915	-0.024
4.500-6.200	0.748	-0.913	-0.236	0.173	-1.045	0.065
6.200-	0.318	-0.757	-0.103	0.062	-1.698	0.236

II.3.1.2.2 Indice de clarté

Pour estimer l'irradiation diffusée sur un plan horizontale, nous pouvons définir une nouvelle grandeur appelée indice de clarté moyenne par mois kt . Cet indice est obtenu à partir du rapport

entre l'irradiation journalière moyenne sur un plan horizontal et l'irradiation journalière moyenne sur un plan horizontal hors atmosphère.

$$k_t = \frac{H_g}{H_0} \quad (\text{II. 31})$$

Avec,

$$k_t \leq 0.13 \quad \frac{H_d}{H_g} = 0.952$$

$$0.13 < k_t \leq 0.8 \quad \frac{H_d}{H_g} = 0.868 + 1.335k_t - 5.782k_t^2 + 3.721k_t^3$$

$$k_t > 0.8 \quad \frac{H_d}{H_g} = 0.41$$

II.3.1.3 Rayonnement réfléchi

Le rayonnement réfléchi est à prendre en compte seulement dans le cas d'une surface inclinée. Il est directement proportionnel au rayonnement global. Le sol réfléchit une partie de l'éclairement qu'il reçoit en fonction de sa nature.

$$H_R = H_g \rho \frac{(1 - \cos\beta)}{2} \quad (\text{II. 32})$$

Où ρ est la réflectivité du sol. Elle varie comme suit :

De 10 à 25% pour un sol cultivé,

De 60 à 90%. Pour de la neige,

De 30 à 40% pour du sable.

II.3.1.3.1 Albédo

L'albédo est le rapport du rayonnement incident diffusé ou réfléchi sur le rayonnement incident. Ce terme étant généralement réservé au sol ou aux nuages, c'est une valeur moyenne de leur réflectance pour le rayonnement considéré et pour tous les angles d'incidences possibles. Par définition, le corps noir possède un albédo nul. Le Tableau suivant donne les valeurs typiques de l'albédo du sol.

Tableau.II.3 : Valeurs typiques de l'albédo selon la nature du sol

Nature du sol	valeurs	Valeurs moyennes
Sable sec	0.1 à 0.4	0.25
Déserts	0.2 à 0.4	0.3
Prairies et herbages	0.2 à 0.3	0.25
Foret	0.1 à 0.2	0.15

Neige fraîche	0.7 à 0.8	0.75
Neige ancienne	0.5 à 0.7	0.6
Habitat très dense	0.1 à 0.2	0.15
habitat	0.15 à 0.25	0.2

II.3.1.4 Rayonnement global

Le rayonnement global sur une surface inclinée est la somme des trois composantes suivantes ; la première est le rayonnement direct H_B , la deuxième est le rayonnement diffus du ciel H_D calculé selon un des modèles choisis et la troisième est le rayonnement réfléchi par le sol H_R .

$$H_T = H_B + H_D + H_R \quad (\text{II.33})$$

II.4.1 Calcul de l'irradiation globale hors atmosphère journalière reçue sur un plan horizontale

L'énergie reçue au cours de la journée est donnée par la relation suivante:[16]

$$H_0 = \int_{-180}^{180} G_o \cdot dw = G_{os} \cdot \int_{w_1}^{w_2} (\cos \theta_i) dw \quad (\text{II.34})$$

G_o : Puissance du rayonnement globale hors atmosphère,

G_{on} : Puissance du rayonnement globale hors atmosphère à incidence normale,

θ_i : Angle d'incidence.

$$G_{on} = G_{sc} \cdot C \quad (\text{II.35})$$

G_{sc} : La constante solaire

C : La correction de distance

$$C = 1 + 0.034 \cdot \cos \left(\frac{360}{365} (n - 2) \right) \quad (\text{II.36})$$

(w_1, w_2) : Sont les valeurs de (w) entre lesquelles $(\cos i)$ est positif, le soleil étant au-dessus de l'horizon.

- Pour un plan horizontal

$$\begin{aligned} \int_{w_1}^{w_2} \cos \theta_i \cdot dw &= \int_{w_1}^{w_2} (\cos \varphi \cdot \cos \delta \cdot \cos \omega + \sin \varphi \cdot \sin \delta) dw \\ &= \cos \varphi \cdot \cos \delta \cdot [\sin \omega]_{w_1}^{w_2} + \sin \varphi \cdot \sin \delta [\omega]_{w_1}^{w_2} \\ &= \cos \varphi \cdot \cos \delta [\sin \omega_2 - \sin \omega_1] + \sin \delta \cdot \sin \varphi \cdot (\omega_2 - \omega_1) \end{aligned} \quad (\text{II.37})$$

Alors l'énergie reçue au cours de la journée est :

$$H_0 = \left(\frac{24 \cdot 3600}{\pi \cdot 10^6} \right) \cdot G_{on} \cdot \left[\cos \phi \cdot \cos \delta \cdot \sin \omega_s + \sin \delta \cdot \sin \phi \cdot \frac{\pi}{180} \cdot \omega_s \right] \quad (II.38)$$

Avec :

ω_s : l'angle horaire de coucher de soleil sur le plan horizontal, en degré.

$$\omega_s = \cos^{-1}(-\tan \phi \cdot \tan \delta) \quad (II.39)$$

La déclinaison du soleil δ calculée à partir de l'équation de Cooper suivante :

$$\delta = 23.45^\circ \cdot \sin 360 \cdot \frac{(284 + n)}{365} \quad (II.40)$$

Où : (n) est le numéro du jour de l'année copte à partir du premier janvier.

Le jour type du mois : On appelle jour type du mois pour une grandeur donnée, le jour du mois se rapprochant le plus de la moyenne mensuelle de cette grandeur.

II.5 Inclinaison optimale

la valeur de l'angle optimal pour un système de captation d'énergie solaire, plusieurs propositions de la littérature ont été étudiées et effectuées. Quelques-unes de ces propositions sont présentées ci-après.

II.5.1 Inclinaison optimale annuelle

Pour une inclinaison optimale annuelle, Duffie et Beckmann proposent une inclinaison optimale annuelle égale à latitude ϕ du lieu, ce type de capteur est appelé capteur Tel . Hottel , suivant ses observation, a proposé une inclinaison optimale $\beta_{opt} = \phi + 20^\circ$ ou ϕ est la latitude du lieu. Il a abouti à ce choix par le fait que les charges en matière de chauffage son plus importantes durant la période hivernale et cette inclinaison conduit à orienter la capteur d'une manière à minimise l'angle d'incidence durant cette période puisque la hauteur du soleil est plus faible. Tandis que a proposé une autre relation $\beta_{opt} = \phi + 10^\circ$. quant à lui, proposa un angle optimale $\beta_{opt} = \phi - 10^\circ$ [16] [24]

II.5.1.1 Modèle de Gladius

Gladius a utilisé les données relatives à quatre sites en Alabama (USA), avec lesquelles il a comparé la quantité d'énergie captée par un capteur plan sous diverses inclinaisons et a établi la relation suivante [18] :

$$\beta_{opt} = \arctan \left[\frac{\sum_{i=1}^{12} (G_{hi} \cdot \tan(\phi + \delta_i))}{\sum_{i=1}^{12} G_{hi}} \right] \quad (II.41)$$

Avec : ϕ , G_{hi} et δ_i sont respectivement la latitude du lieu, la moyenne mensuelle par jour de l'irradiation globale mesurée sur un plan horizontal et déclinaison du soleil pour la journée représentative du mois i . [16]

II.5.2 Inclinaison optimale saisonnière

Plusieurs études ont été effectuées dans le sens de déterminer l'inclinaison optimale saisonnière, hivernale là où la déclinaison du soleil est négative, et estivale qui correspond à des valeurs positives de cette déclinaison. Ce qui correspond respectivement aux deux périodes de l'année où la hauteur du soleil est basse ou élevée. La valeur pratique de cet angle est spécifiée comme étant une fonction linéaire de la latitude du lieu qui tient compte de la situation géographique du site considéré et de la valeur moyenne de la déclinaison caractérisant la saison considérée. [16]

Généralement, à l'hémisphère nord le capteur est orienté vers le sud, et incliné avec un certain angle. Beaucoup de recherches ont été faites pour avoir le meilleur angle, comme par exemple : $\phi + 20^\circ$, $\phi + 10^\circ$, $\phi - 10^\circ$, cependant certaines recherches suggèrent des valeurs respectivement pour les période été et hiver, $\phi \pm 20^\circ$, $\phi \pm 8^\circ$, et $\phi \pm 5^\circ$, avec ϕ ; est la latitude, "+" pour l'hiver, et "-" pour l'été. Dans les années précédentes, des programmes d'ordinateur ont été utilisés et ont montré que l'angle optimal d'inclinaison est la latitude [21]

II.5.2.1 Modèle d'El Kassaby

El Kassaby a développé un modèle analytique permettant la détermination de l'angle d'inclinaison optimale en fonction de la latitude du lieu et pour n'importe quelle période de l'année. En effet, il propose alors l'expression suivante :

$$\beta_{opt} = \frac{1}{N_2 - N_1 + 1} \sum_{i=N_1}^{N_2} \beta_{opt}(i) \quad (II. 42)$$

Avec N_1 , N_2 et β_{opt} sont respectivement le premier et le dernier jour sur la période considérée et l'angle optimal journalier qui est donné par la relation suivante :

$$\beta_{opt} = \phi - \arctan \left[\frac{\omega_s}{\sin(\omega_s)} \tan(\delta) \right] \quad (II. 43)$$

Où ϕ , ω_s , δ , sont respectivement la latitude du lieu, l'angle horaire du lever du soleil et la déclinaison du soleil pour journée. [24]

II.5.3 Inclinaison optimale mensuelle

Il n'est pas pratique de désigner un capteur solaire de telle sorte que l'angle d'inclinaison change chaque jour, par contre il est possible de la changer une fois par mois. El Kassaby a développé un autre modèle analytique qui permet de déterminer l'angle de l'inclinaison optimale en relation de latitude du lieu, moyennant les méthodes des moindres carrés, il a paraphrasé des corrélations, qui permet le calcul de l'angle de l'inclinaison optimale de chaque mois de l'année. [16,24] Ces relations sont données comme suit :

Pour la période du mois de janvier au mois de mars,

$$\beta_{opt} = 60.00012 + 1.49986 * N_m - 3.49996 * N_m^2 + (\emptyset - 30)[0.7901 + 0.01749 * N_m + 0.0165N_m^2] \quad (II.44)$$

Pour la période du mois d'avril au mois de juin,

$$\beta_{opt} = 216.0786 - 72.032219 * N_m + 6.0031 * N_m^2 + (\emptyset - 40)[1.07515 + 0.11244 * N_m - 0.03749 * N_m^2] \quad (II.45)$$

Pour la période du mois de juillet au mois de septembre,

$$\beta_{opt} = 29.11831 - 20.5298 * N_m + 2.50186 * N_m^2 + (\emptyset - 50)[-11.17256 + 2.70569 * N_m - 0.015035 * N_m^2] \quad (II.46)$$

Prévoyant que si $\beta < 0$ alors $\beta_{opt} = 0$.

Optimale est donnée par :

$$\beta_{opt} = -441.2385 + 84.54332 * N_m - 3.50196 * N_m^2 + (\emptyset - 40) [4.2137 - 0.54834 * N_m + 0.0223 * N_m^2] \quad (II.47)$$

Dans ces relations, N_m représente le numéro du mois.

II.6 Appareils de mesures

Les données nécessaires à l'établissement d'un bilan énergétique solaire d'un lieu déterminé sont : les durées d'insolation, les mesures des rayonnements directs et diffus et celle du rayonnement globale.[20]

II.6.1 Les héliographes

En ce qui concerne les durées d'insolation, les durées d'insolation, les héliographes mesurent les périodes de la journée pendant les quelles l'intensité du rayonnement direct a dépassé un certain seuil. La somme de ces périodes représente l'insolation journalière. L'intervalle de temps

compris entre le lever et le coucher du soleil définit le maximum pour un jour et un lieu donné de l'insolation journalière.

La fraction d'insolation est le rapport de l'insolation journalière à cette durée théorique maximale d'insolation. Plusieurs types d'héliographes fournissent cette insolation journalière.

Le capteur est un concentrateur du rayonnement direct ; la « lentille focalisatrice » est généralement une sphère en verre massif, ce qui permet de suivre le mouvement apparent



Fig.II.8: Héliographe Campbell-Stokes

II.6.2 Principe généraux

Local du soleil pendant toute la journée. La détection se fait à l'aide soit d'un simple papier qui sera carbonisé quand l'intensité du rayonnement direct aura dépassé le seuil choisi (héliographe de Campbell-stokes), soit d'un papier photographique (héliographe Jordan). Ces deux appareils ne sont pas munis d'un système d'horlogerie, puisque la répartition temporelle peut se déduire des enregistrements eux-mêmes.

L'héliographe Marvin (U.S.A.) comporte d'une part un système d'horloge, d'autre part un thermomètre différentiel pour réaliser des enregistrements à distance.

II.6.3 Les pyrhéliomètres.

Les pyrhéliomètres mesurent le rayonnement direct. Ainsi le pyrhéliomètre à disque d'argent permet de déduire de lectures thermométriques successives l'intensité du direct, en ouvrant et en occultant alternativement l'entrée de l'appareil. Bien entendu, un tel dispositif doit être muni d'un système de poursuite automatique.

II.6.4 Les pyranomètres

Les pyranomètres, auxquels on associe généralement un enregistrement continu (à thermopile par exemple : schéma sur la fugur8) donnent le rayonnement global (direct et diffus). Aussi pour éliminer le rayonnement direct, certains pyromètres comme celui utilisé à la station du C.N.R.S. au four solaire d'odeillo, sont munis d'un cache qui élimine le direct. Bien entendu, si ces

appareils sont largement suffisants pour la détermination des gisements solaire en vue d'applications « software » à l'habitat, ils présentent, pour des études plus spécifiques, l'inconvénient de ne pas être sélectifs en fonction de la longueur d'onde.

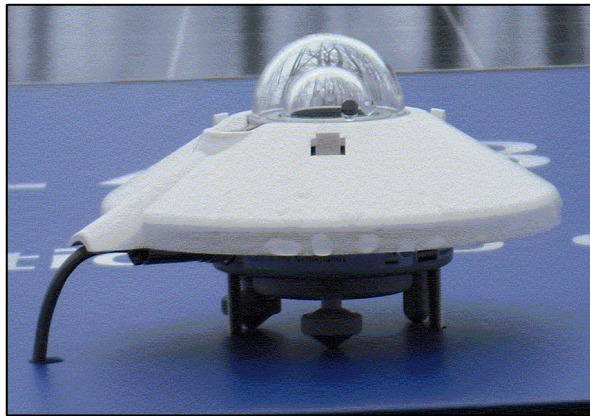


Fig.II.9: Héliographe à fibres optique

D'autres appareils, comme les spectrobolomètres, donneront les mêmes paramètres en fonction des différents parties du spectre (ultraviolet, visible, infrarouge très proche).

II.7 Conclusion

L'étude du rayonnement solaire s'avère nécessaire pour le choix du meilleur site en vue d'une installation d'un système de captation solaire. Le développement des applications de l'énergie solaire dans le domaine photovoltaïque, thermodynamique nécessite des données de longue durée sur l'irradiation solaire, beaucoup de modèles pour estimer le rayonnement solaire global, diffus sur plan incliné. et le modèle le plus simple, de première génération suppose que le rayonnement solaire diffus est isotrope et le rayonnement provient du disque solaire, alors que les autres modèles plus complexes introduisent différents paramètres représentant les caractéristiques inhérentes anisotropiques du rayonnement diffus. Le rayonnement reçu par un capteur solaire dépend également du niveau d'ensoleillement du site considéré et de son orientation par rapport au soleil.

Nous pouvons trouver l'inclinaison mensuelle tous les mois, mais par facilité, on peut également choisir une inclinaison pour chaque saison ou inclinaison annuelle pour toute l'année. L'orientation optimale de l'angle d'inclinaison des capteurs solaires, s'avère la méthode idéale pour optimiser le générateur PV.

CHAPITRE III

DISPOSITIF

EXPERIMENTAL

III.1.Introduction

Ce chapitre présente la description du dispositif expérimental: le capteur solaire photovoltaïque utilisé dans notre étude à savoir ; sa composition, son principe de fonctionnement et la description de la procédure expérimentale.

III.2.Description du capteur photovoltaïque

Le banc d'essai ET 250 est un système de démonstration photovoltaïque illustré sur la figure (III.1). Il comprend deux modules solaires à technologie monocristalline, un appareil de mesure à affichage numérique et une résistance à curseur. Ces différents composants peuvent être reliés entre eux par des câbles.

Ce capteur photovoltaïque se trouve au niveau des laboratoires du département de Génie Mécanique de la faculté de technologie à l'Université de M'sila.[25]



Fig. III.1 : Vue d'ensemble du capteur photovoltaïque.

Le module solaire photovoltaïque est un générateur électrique de courant continu, il est constitué d'un ensemble de cellules photovoltaïques. Il sert de module de base pour les installations photovoltaïques et notamment dans les centrales solaires photovoltaïques.

Nos modules inclinables (figure III.2) sont montés sur un châssis mobile de sorte que les essais à l'air libre sont possibles. Ils sont de type SM50, à technologie monocristalline et qui possèdent les caractéristiques présentées au tableau (III.1).[25]



Fig.III.2 : Module solaire photovoltaïque.[25]

Tab.III.1 : Caractéristiques des modules solaires.[25]

Paramètres électriques	Valeurs (1000 W/m ² , spectrum AM 1,5, Cell temp. 25°C)
Puissance nominale	80 W
Courant nominal	4,76 A DC
Tension nominale	16,9 V DC
Tension en circuit ouvert	21,8 V DC
Surface	0,63 m ²
Cellules solaires	36 (par 125x125 mm)

Les modules solaires photovoltaïques ont un détecteur de température (Figure 3.a) et d'un détecteur de luminosité (Figure 3.b).



(a)



(b)

Fig.III.3 : Détecteur de température (a) et détecteur de luminosité (b).

La partie principale du système solaire de démonstration est l'appareil de mesure combiné. Elle présente une fenêtre à affichage digital des valeurs mesurées du courant, tension, intensité lumineuse et température comme illustré sur la figure III.4.[25]



Fig.III.4 : Appareil de mesure combiné.

Une résistance à curseur simule représentée sur la figure III.5 es différentes charges. Elle permet ainsi d'enregistrer les caractéristiques électriques I-U.[25]



Fig.III.5 : Résistance à curseur(Rhéostat).

III.3 Principe de fonctionnement

Le principe de fonctionnement du capteur solaire photovoltaïque repose sur la production de l'électricité à partir de la lumière en utilisant un semi-conducteur telle que décrit au chapitre 1.

La lumière solaire arrive sur les cellules du capteur photovoltaïque, les électrons se rassemblent dans le conducteur n et les trous dans le conducteur p, photo-tension opposée au champ interne et de même valeur faisant son apparition des deux côtes. Il est possible de récupérer cette tension photoélectrique avec des contacts et de la neutraliser dans circuit de courant continu.[25]

III.4 Description de la procédure expérimentale

La procédure expérimentale s'effectue suivant les étapes suivantes :

- a- Installer l'appareil à proximité d'une alimentation en secteur (220V/50Hz).
- b- Placer les panneaux photovoltaïques dans un endroit ensoleillé dans la direction du sud et suivant des inclinaisons choisies à savoir; 0° , 20° , 40° , 60° , 90° (voir la figure III-6);
- c- Relier les deux panneaux soit en série ou en parallèle suivant le cas d'étude;
- d- Relier ces panneaux à l'appareil de mesure combiné et au rhéostat avec des câbles;
- e- Actionner l'interrupteur principal, puis l'interrupteur de démarrage de l'installation
- f- Prélever l'intensité de la lumière, la température du panneau chaque quart d'heure pour les différentes inclinaisons (qui se font en même temps).



Fig.III.6 : Inclinaisons du panneau solaire

CHAPITRE IV

RESULTATS ET

DISCUSSION

IV. 1. Introduction

Il est important de connaître le meilleur angle d'inclinaison des panneaux solaires afin d'utiliser au mieux l'énergie provenant du soleil. Pour des questions d'efficacité et de meilleurs rendements, lorsque cela est possible, on règle l'inclinaison des panneaux en fonction du soleil.

Ce chapitre, a pour objectif de déterminer la meilleure inclinaison des capteurs solaires au niveau de la région de M'sila, et ce théoriquement (utilisation de modèles abordés au deuxième chapitre) et expérimentalement.

IV.2 Situation géographique de la région de M'sila

La région d'étude (Wilaya de M'sila) s'étend sur la zone des hauts plateaux entre les deux chaînes de montagnes qui sont l'Atlas Tellien et l'Atlas Saharien (Figure IV.1). M'sila se situe à une altitude de 441 m au niveau de la mer. Elle couvre une superficie globale de 18 175 km². Le Tableau IV.1 regroupe les caractéristiques géographiques de la Wilaya de M'sila.

Tableau IV.1 : Caractéristiques géographiques de la Wilaya de M'sila.

Latitude	35° 42'07''
Longitude	4° 32'43''
Altitude	441 m

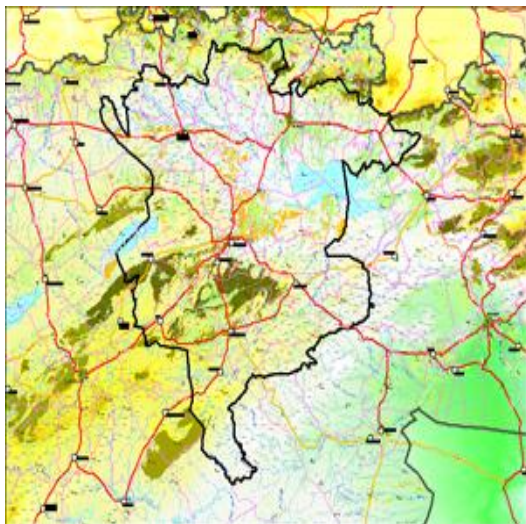


Fig.IV.1 : Localisation de la Wilaya de M'sila[26,27].

IV.3 Déclinaison du soleil

La déclinaison solaire est l'angle formé par la droite reliant la terre au soleil et le plan équatorial (positif vers le nord) (Cf § chapitre I).

La figure IV.2 montre l'évolution de la déclinaison solaire au cours de l'année.

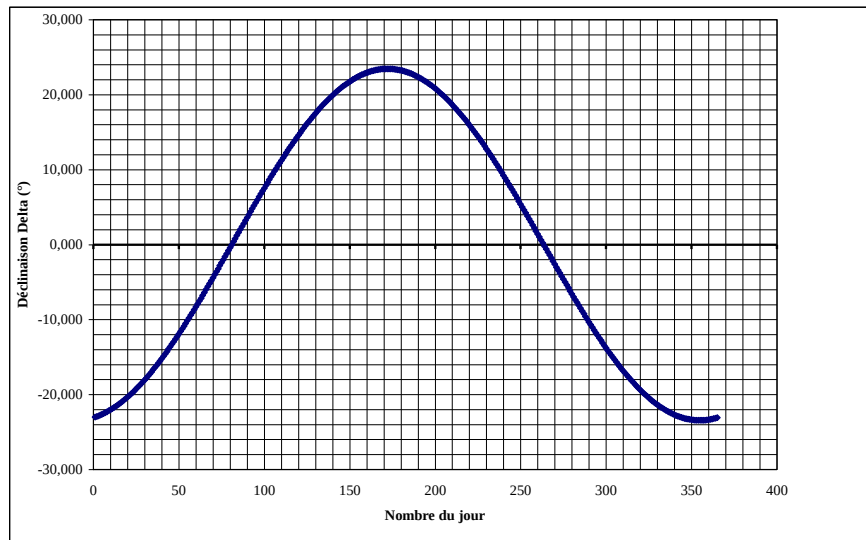


Fig.IV.2 : Evolution de la déclinaison solaire δ au cours de l'année.

Sur la figure IV.2 on voit que la déclinaison est égale à zéro aux équinoxes et varie de $+23,45^\circ$ (21 juin) à $-23,45^\circ$ (21 décembre).

Les équinoxes sont les deux dates de l'année où le soleil est exactement dans le plan de l'équateur : sa déclinaison est alors nulle et les durées du jour et de la nuit sont égales. L'équinoxe d'automne intervient vers le 21 septembre et l'équinoxe de printemps vers le 22 mars, dans l'hémisphère Nord.

Dans l'hémisphère Nord, le solstice d'été (vers le 21 juin) est la date où le Soleil est au dessus de l'équateur, sa déclinaison est alors, maximale et la durée qui sépare le lever et le coucher du soleil cesse de croître. Le solstice d'hiver (vers le 21 décembre) est la date où le Soleil est en dessous de l'équateur, sa déclinaison est alors minimale et la durée du jour cesse de décroître. Les saisons sont inversées dans l'hémisphère Sud.

IV.4 Estimation de l'irradiation globale journalière hors atmosphère reçue sur un plan horizontal (relatif à la région de M'Sila)

L'énergie hors atmosphère reçue sur un plan horizontale au cours de la journée est donnée par l'équation suivante (Cf §chapitre II):

$$H_0 = (24 \cdot 3600 / \pi \cdot 10^6) G_{on} [\cos \phi \cos \delta \sin \omega_s + (\pi / 180) \omega_s \sin \delta \sin \phi] \quad (IV-1)$$

La figure IV.3 montre l'évolution de l'énergie journalière hors atmosphère reçue sur un plan horizontale relatif à la région de M'sila au cours de l'année. On constate que cette énergie atteint son pic le 20 juin et son min le 20 décembre. En effet, l'irradiation globale hors atmosphère

journalière reçue sur un plan horizontal (relatif à la région de M'Sila) varie entre $16,176 \text{ MJ/m}^2$ et $41,698 \text{ MJ/m}^2$.

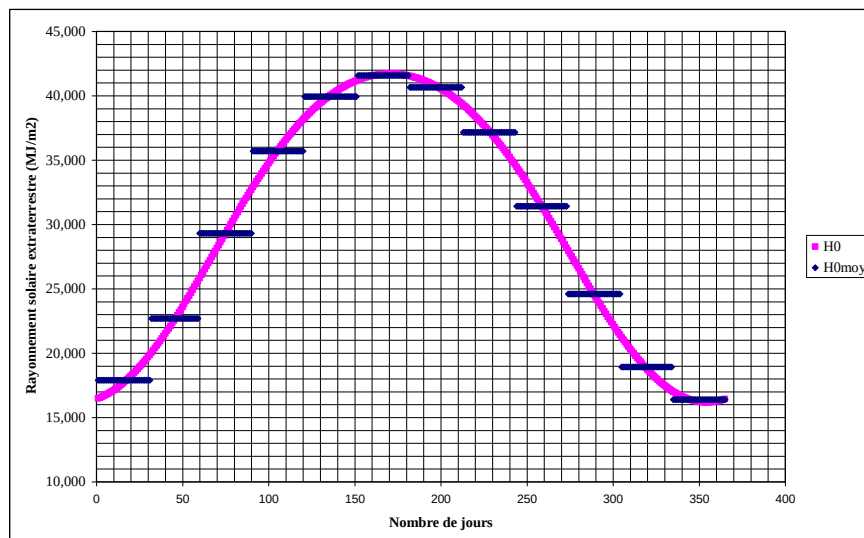


Fig.IV.3: Evolution de l'énergie journalière hors atmosphère reçue sur un plan horizontale relative à la région de M'sila au cours de l'année.

On constate également sur la figure IV.3 (concernant les tirets horizontaux), que le mois de juin est le mois qui reçoit le plus d'énergie solaire sur un plan horizontale hors atmosphère, estimée en moyenne à $41,573 \text{ MJ/m}^2/\text{jour}$, contrairement au mois de décembre où cette dernière est la plus faible, elle de l'ordre de $16,396 \text{ MJ/m}^2/\text{jour}$.

Notant qu'un plan horizontal hors atmosphère relatif à la région de M'Sila reçoit en moyenne une énergie de $29,72 \text{ MJ/m}^2/\text{jour}$ (l'équivalent de $8,26 \text{ kWh}$).

Pour le rayonnement solaire extraterrestre, le jour type du mois est le jour du mois qui se rapprochant de la moyenne mensuelle de ce dernier. La liste des jours types proposés pour la région de M'Sila est représentée sur le tableau IV-2

H_0 (MJ/m^2) est l'énergie solaire hors atmosphère reçue par unité de surface horizontale, le jour type.

H_{0m} (MJ/m^2) est l'énergie solaire moyenne hors atmosphère reçue, par unité de surface horizontale, au cours du mois.

Notons d'après le tableau IV-1, que nos résultats sont presque identiques à ceux proposés par Klein (écrit en italique)[16].

Tableau IV-2 : Liste des jours types par mois pour la région de M'Sila.

Mois	Jan.	Fév.	Mar.	Avr.	Mai	Jun.	Juil	Août	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.
Jour type	17(17)	15(16)	16(16)	15(15)	15(15)	10(11)	18(17)	17(16)	16(15)	16(15)	15(14)	11(10)
N° de jour	17	46	75	105	135	161	199	229	259	289	319	345
H_{0m} (MJ/m ²)	17,887	22,736	29,328	35,692	39,933	41,573	40,657	37,155	31,413	24,604	18,927	16,396
H_0 (MJ/m ²)	17,845	22,701	29,306	35,690	39,950	41,572	40,618	37,102	31,352	24,554	18,868	16,372

IV.5 Estimation de l'irradiation moyenne reçue sur un plan horizontal à M'Sila

Les données concernant l'énergie journalière moyenne reçue sur un plan horizontal à M'Sila utilisée au cours de ce travail sont issues du site de la NASA (National Aeronautics and Space Administration)[28], vue que la station météorologique de M'Sila ne dispose pas, à ce jour, d'une base de données suffisante. La plage de données utilisées au cours de cette étude s'étale sur 21 ans de 1984 à 2004.

La figure IV.4 montre l'évolution de l'irradiation moyenne journalière de 2 ans, 5 ans, 10 ans, 15 ans et 21 ans au cours de l'année.

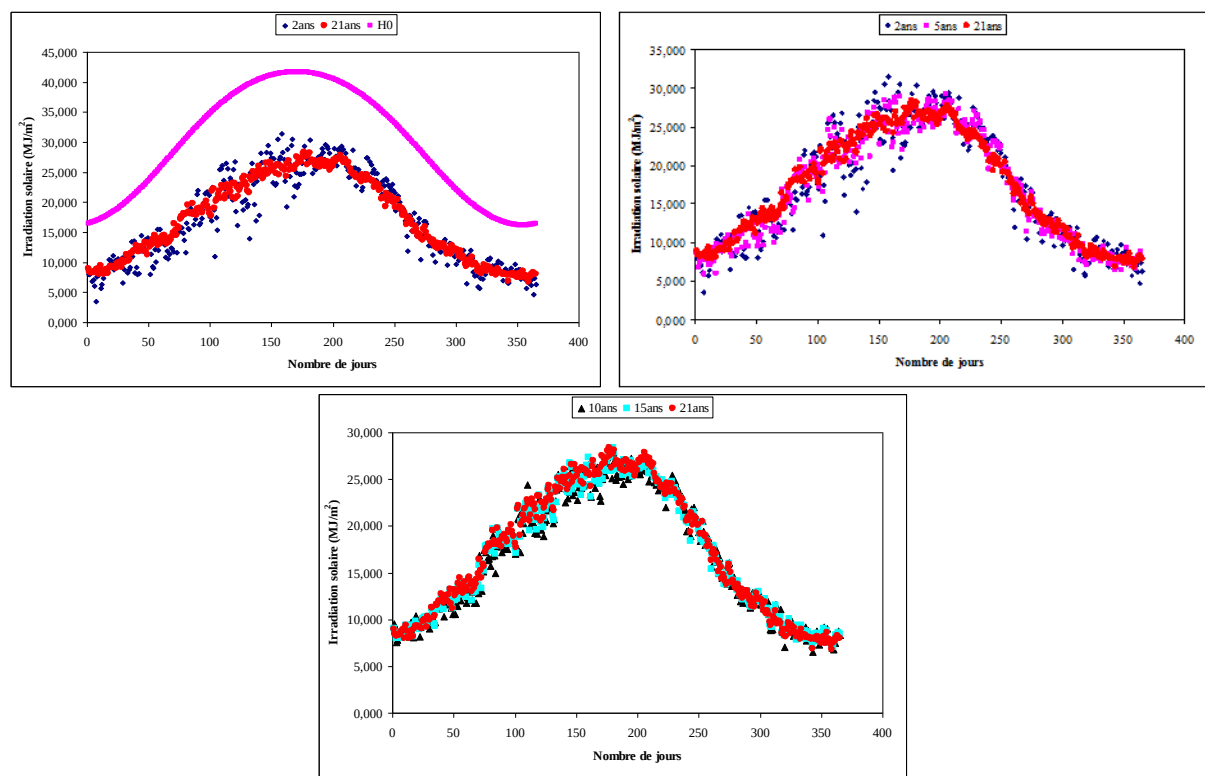


Fig.IV.4: Evolution de l'irradiation moyenne journalière de 2 ans, 5 ans, 10 ans, 15 ans et 21 ans reçue sur un plan horizontal à M'sila au cours de l'année.

On n'a pas présenté toutes les courbes sur une même figure à cause de l'illisibilité du graphe qui devient trop chargé. On constate d'après la figure IV.4 que les points formant la courbe de l'évolution de l'irradiation de 2 ans, 5 ans, 10 ans, et de 15 ans sont plus dispersés que ceux formant la courbe de 21 ans. Cette dernière est plus raffinée (moins de fluctuations) et se rapproche de la courbe donnant l'évolution de l'irradiation solaire hors atmosphère en forme. Raison pour laquelle on va travailler dans ce qui suit avec les données de 21 ans.

La figure IV.5 compare l'irradiation solaire moyenne mensuelle hors atmosphère avec celle réellement reçue sur une surface horizontale (issue de la moyenne des 21 ans) à M'Sila.

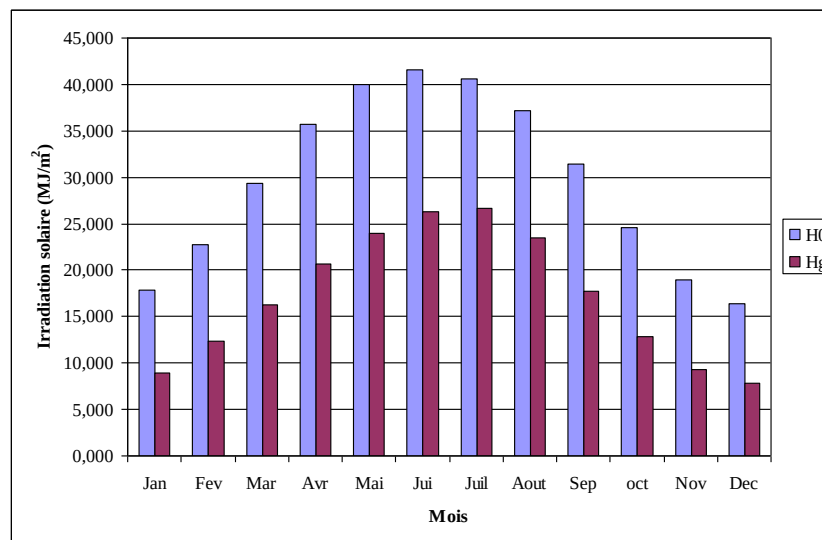


Fig.IV.5: Comparaison entre l'irradiation solaire moyenne mensuelle hors atmosphère (H_0) et celle réellement reçue sur une surface horizontale à M'Sila (H_g).

On constate d'après la figure IV.5 que l'irradiation solaire moyenne mensuelle hors atmosphère et celle réellement reçue sur une surface horizontale à M'Sila ont la même allure ; la forme d'une cloche. En effet l'irradiation solaire au cours de l'année croît, atteint un maximum en été, puis décroît.

On remarque aussi sur la figure VI.5, que le rayonnement solaire atteignant une surface horizontale de 1 m^2 à M'sila est inférieur à celui reçu sur la même surface se trouvant hors atmosphère. Effectivement, le rayonnement solaire, en traversant l'atmosphère subit une diminution d'intensité par absorption, réflexion et diffusion.

L'importance du rayonnement solaire reçu à la surface du sol dépend de la spécificité de chaque région (latitude du lieu, le relief –montagne, vallées, rivières..., et de la nature du sol qui peuvent agir directement sur la qualité du rayon incident).

Le tableau IV-3 montre le pourcentage d'atténuation mensuelle du rayonnement solaire arrivant au sol de M'Sila par rapport à celui reçu hors atmosphère.

Tableau IV-3 : Pourcentage d'atténuation du rayonnement solaire arrivant au sol de M'Sila par rapport à celui reçu hors atmosphère.

Mois	Jan	Fev	Mars	Avr.	Mai	Jui.	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Dec
% d'atténuation du rayonnement solaire	49,90	45,50	44,60	42,23	39,94	36,73	34,45	36,83	43,40	47,80	50,89	52,05

On remarque d'après le tableau IV-2 que moins de rayonnements solaires atteignent le sol de M'Sila en hiver, et plus de rayonnements l'atteignent en été, vue la nature du ciel et la position terre soleil.

L'énergie solaire annuelle hors atmosphère reçue sur une surface horizontale de M'sila de 1 m² est estimée à 10 847,825 MJ, Il n'arrive à la même surface se trouvant au sol de M'Sila que 6 286,514 MJ, soit une perte de 42,048%. Donc, le rayonnement solaire subit de considérables modifications en traversant l'atmosphère.

En effet, L'atmosphère est l'enveloppe gazeuse la plus externe de notre planète. Elle est transparente aux rayons lumineux dans le domaine visible, ce qui nous permet de voir le monde qui nous entoure. Sa présence est tout de même révélée par la couleur bleue du ciel. Ses propriétés de transparence sélective sont dues à la capacité des molécules qui la composent d'absorber une partie du rayonnement électromagnétique et d'émettre un rayonnement du même type dans une autre longueur d'onde.

Il est à noter qu'une surface horizontale de 1 m² se trouvant à M'Sila reçoit en moyenne 17,223 MJ/jour.

IV.5.1 Estimation de l'indice de clarté K_T

Les études des données de l'irradiation solaire sur un plan horizontal ont montré que le rayonnement diffus reçu sur un plan horizontal est fonction de l'indice de clarté noté, K_T , (traduction littérale de l'américain clearness index), qui représente le rapport entre le rayonnement au sol et le rayonnement extraterrestre.

$$K_T = \frac{H_g}{H_0} \quad (\text{IV.1})$$

La moyenne mensuelle de l'indice de clarté, K_T , est définie par :

$$\overline{K_T} = \frac{\overline{H_g}}{\overline{H_0}} \quad (\text{IV.2})$$

Où H_g et $\overline{H_g}$ prisent dans cet ordre, représentent le rayonnement solaire quotidien et la moyenne mensuelle du rayonnement solaire quotidien sur un plan horizontal, et H_0 et $\overline{H_0}$ sont respectivement le rayonnement solaire extraterrestre quotidien et la moyenne mensuelle du rayonnement solaire extraterrestre quotidien interceptées par la même surface horizontale.

Les valeurs de K_T varient selon les endroits et les saisons, elles varient généralement entre 0,3 (pour les régions où les saisons sont pluvieuses) et 0,8 (pour les saisons où les climats sont secs et ensoleillés).

A partir de la mesure H_g moyenne de l'ensoleillement dû aux rayonnements solaires quotidiens sur un plan horizontal, on évalue l'irradiation diffuse H_d puis l'irradiation directe H_b , qui seront en suite converti sur une surface inclinée en utilisant l'un des modèles cités au chapitre II.

La figure IV.6 montre l'évolution de l'indice de clarté k_t au cours de l'année, pour la région de M'Sila. Il varie entre 0,417 et 0,695.

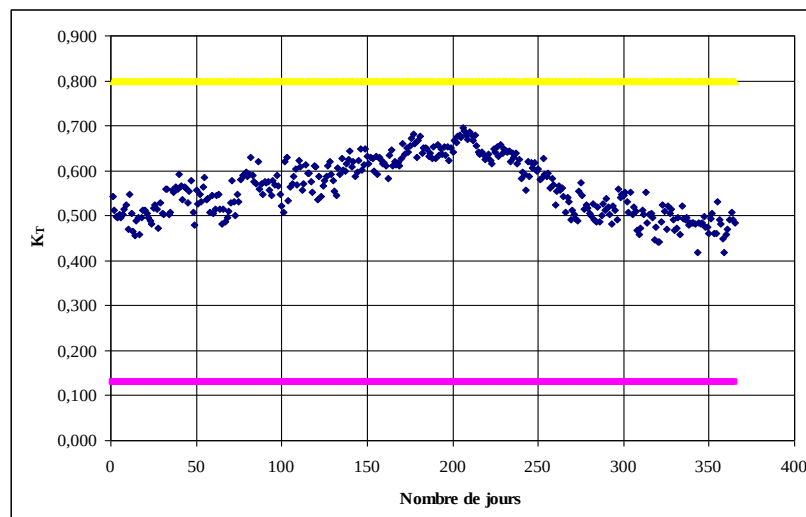


Fig.IV.6: Indice de clarté k_t pour la région M'Sila.

On remarque aussi d'après la figure IV.6 que l'indice de clarté K_T prend des faibles valeurs en hiver, et des valeurs élevées en été.

Le tableau IV-3 donne les valeurs moyennes mensuelles de l'indice de clarté, $\overline{K_T}$. Ces valeurs varient d'un mois à l'autre, $\overline{K_T}$ enregistre des valeurs faibles aux mois de novembre et de

décembre, par contre aux mois de mai, juin, juillet et août ces valeurs sont les plus élevées, ceci est dû l'état du ciel.

Tableau IV-4 : Valeurs moyennes mensuelles de l'indice de clarté, $\overline{K_T}$.

Mois	Jan	Fev	Mars	Avr.	Mai	Jui.	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Dec.
$\overline{K_T}$	0,501	0,545	0,554	0,578	0,601	0,633	0,656	0,632	0,566	0,522	0,491	0,479

IV.5.2 Estimation des composantes du rayonnement global reçu sur une surface horizontale à M'Sila

Une méthode simple a été proposée par Miguel et al. [29] pour estimer le rayonnement quotidien diffus H_d et direct H_b à partir du rayonnement global quotidien H_g en utilisant les formules suivantes (Cf § ChapitreII) :

$$H_d/H_g = \begin{cases} 0,952 & \text{si } K_T \leq 0,13 \\ 0,868 + 1,335K_T - 5,782K_T^2 + 3,721K_T^3 & \text{si } 0,13 < K_T \leq 0,80 \\ 0,141 & \text{si } K_T \geq 0,8 \end{cases} \quad (IV.3)$$

$$H_b = H_g - H_d \quad (IV.4)$$

L'irradiation globale sur une surface horizontale est la somme des composantes directe et diffuse.

La figure IV.7 montre les différentes composantes du rayonnement global mensuel reçu sur une surface horizontale à M'Sila, en plus, de l'évolution de l'indice de clarté K_T au cours de l'année.

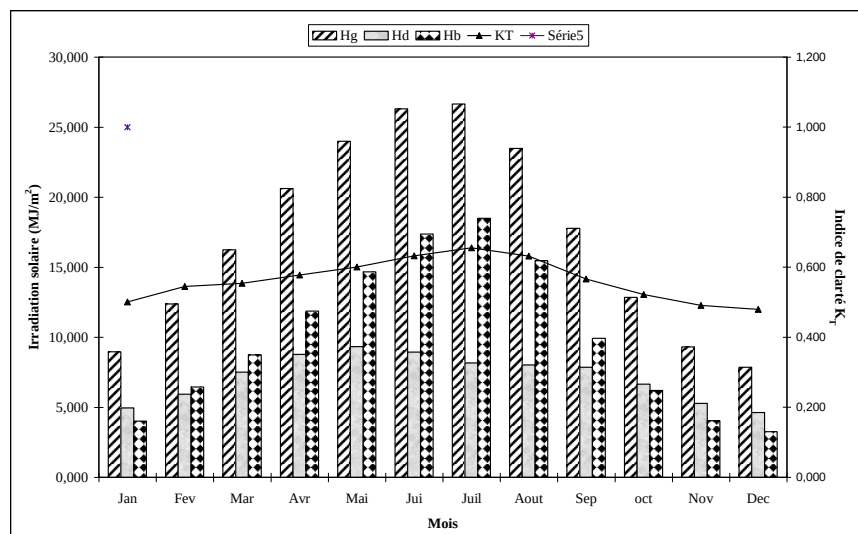


Fig.IV.7: Composantes du rayonnement global mensuel reçu sur une surface horizontale à M'Sila.

On constate d'après la figure IV.7 que l'irradiation globale mensuelle reçue sur une surface horizontale à M'Sila évolue suivant une cloche au cours de l'année, en d'autres termes, elle croît à partir du mois de janvier atteint un maximum au mois de juillet puis décroît. De même pour la composante directe du rayonnement solaire H_b . La composante diffuse du rayonnement solaire, par contre, présente une forme légèrement aplatie au cours de l'année.

On remarque d'après la figure IV.7 qu'au cours des mois de janvier, octobre, novembre et décembre, le rayonnement diffus est le rayonnement le prédominant, il occupe plus de 51% du rayonnement global reçu sur un plan horizontal à M'Sila. Ceci correspond à un indice de clarté mensuel moyen $\overline{K_t}$ inférieur ou égal à 0,501 ($\overline{K_t} \leq 0,501$). Pour le reste des mois (février, mars, avril, mai, juin, juillet, août et septembre), c'est le rayonnement direct qui l'emporte avec plus de 52% et un indice de clarté mensuel moyen $\overline{K_t}$ supérieur ou égal à 0,545 ($\overline{K_t} \geq 0,545$).

En moyenne 41,61% du rayonnement annuel global reçu sur une surface horizontale à M'Sila présente un rayonnement diffus.

IV.6 Estimation de l'irradiation moyenne globale reçue sur un plan incliné à M'Sila

Le rayonnement solaire incident sur un plan incliné d'orientation arbitraire H_T à un instant quelconque de la journée est la somme des trois composantes qui le constituent, à savoir la composante directe H_B , diffuse H_D et réfléchi par le sol H_R (voir l'équation IV.5). La quantité d'énergie solaire reçue dépend de l'orientation et de la pente de la surface réceptrice.

$$H_T = H_B + H_D + H_R \quad (IV.5)$$

La composante directe du rayonnement solaire incident sur un plan incliné d'orientation arbitraire à un instant quelconque de la journée est donnée par la relation suivante :

$$H_B = R_b (H_g - H_d) \quad (IV.6)$$

Où,

R_b est le facteur de transposition géométrique, ou facteur d'inclinaison de rayonnement direct,

H_B est le rayonnement direct incident sur un plan incliné,

H_g est le rayonnement global reçu sur le même plan mais se trouvant en position horizontale,

H_d est le rayonnement diffus reçu sur le même plan horizontal.

L'expression du facteur d'inclinaison R_b est donnée au chapitre II.

Sur la figure IV.8 on a porté l'évolution du rayonnement direct incident sur des surfaces (de 1 m² d'aire) de différentes inclinaisons se trouvant à M'Sila.

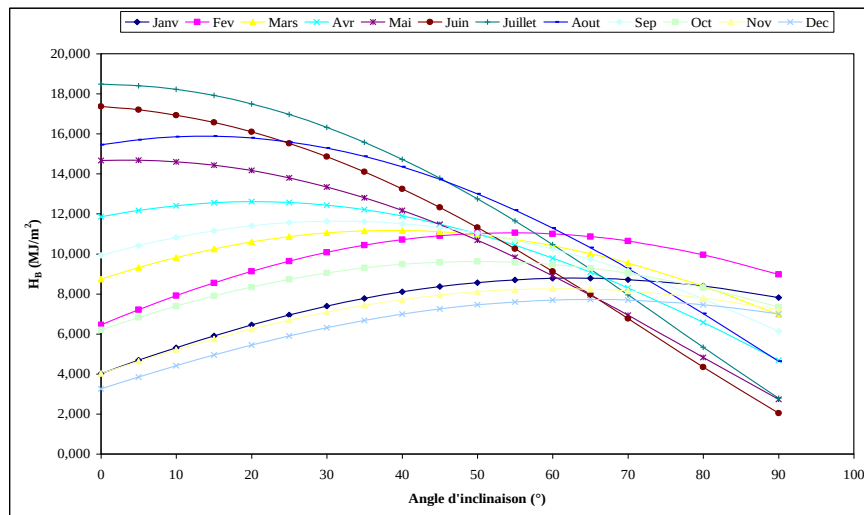


Fig.IV.8: Evolution du rayonnement moyen mensuel direct incident sur des surfaces unités de différentes inclinaisons à M'Sila.

Il est clair d'après la figure IV.8 que le rayonnement mensuel direct incident est influencé par l'inclinaison de la surface réceptrice en plus de la distance terre soleil (effet des mois).

En effet, lorsque la surface réceptrice est inclinée de 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40 et 45° par rapport à l'horizontal, le rayonnement mensuel direct incident est maximal au mois de juillet.

Lorsque la surface réceptrice est inclinée de 50, 55, et 60° par rapport à l'horizontal, elle reçoit le maximum de rayonnement direct incident au mois de août.

Lorsque la surface réceptrice est inclinée de 65, 70, 80 et 90° par rapport à l'horizontal, elle reçoit le maximum de rayonnement direct incident au mois de février.

Le tableau IV-4 indique pour chaque mois l'angle d'inclinaison pour laquelle la surface réceptrice reçoit le maximum de rayonnement direct incident.

Tableau IV-5 : Angle d'inclinaison optimal pour le rayonnement direct incident.

Mois	Jan	Fev	Mars	Avr.	Mai	Jui.	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Dec.
l'inclinaison (°)	65	55	40	20	5	0	0	15	30	50	60	65
H _B (MJ/m ²)	272,1	309,4	346,3	378,2	455,0	520,8	573,0	492,1	348,9	298,2	247,5	239,3

La composante réfléchie du rayonnement solaire incident sur un plan incliné d'orientation arbitraire à un instant quelconque de la journée est donnée par la relation suivante en supposant que la réflexion du rayonnement est isotropique:

$$H_R = \rho H_g \left[\frac{1 - \cos \beta}{2} \right] \quad (IV.7)$$

Où,

H_R est le rayonnement réfléchi intercepté par le plan incliné,

ρ est l'albédo du sol (Cf §chapitre II),

H_g est le rayonnement global reçu sur le même plan mais se trouvant en position horizontale,

β est l'angle d'inclinaison du plan incliné.

Dans cette étude, on prendra $\rho = 0,2$.

Sur la figure IV.9 on a porté l'évolution de la composante réfléchi du rayonnement incident sur des surfaces (de 1 m^2 d'aire) de différentes inclinaisons se trouvant à M'Sila.

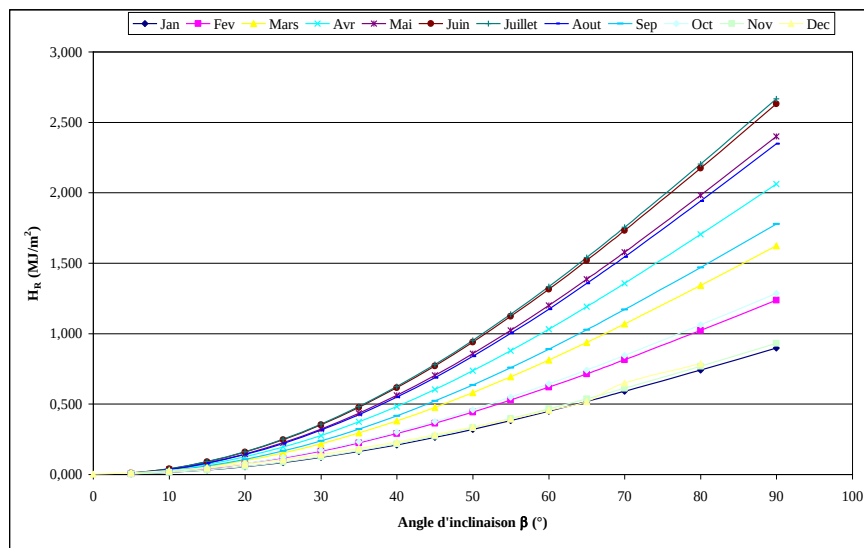


Fig.IV.9: Evolution du rayonnement moyen mensuel réfléchi reçu sur des surfaces unités de différentes inclinaisons à M'Sila.

D'après la figure IV.9, on constate une autre fois, que le rayonnement mensuel réfléchi incident est influencé par l'inclinaison de la surface réceptrice. En plus son intensité varie en fonction des mois de l'année.

En effet, le rayonnement mensuel réfléchi incident sur une surface inclinée croît avec l'inclinaison de cette dernière. En d'autres termes la surface inclinée de 90° intercepte plus d'énergie réfléchie par le sol que celle inclinée de 5° par exemple.

Quelque soit l'angle d'inclinaison de la surface réceptrice se trouvant à M'Sila (à l'exception de la surface horizontale 0°), le rayonnement réfléchi intercepté par cette dernière est maximale au mois de juillet.

Il existe plusieurs modèles qui permettent de déterminer la composante diffuse du rayonnement solaire incident sur un plan incliné d'orientation arbitraire à un instant quelconque de la journée. Au cours de cette étude, on va aborder les quatre modèles suivants (Cf § chapitre II)

- Modèle de Liu & Jordan,
- Modèle Circumsolaire
- Modèle de Reindl
- Modèle de Hay,

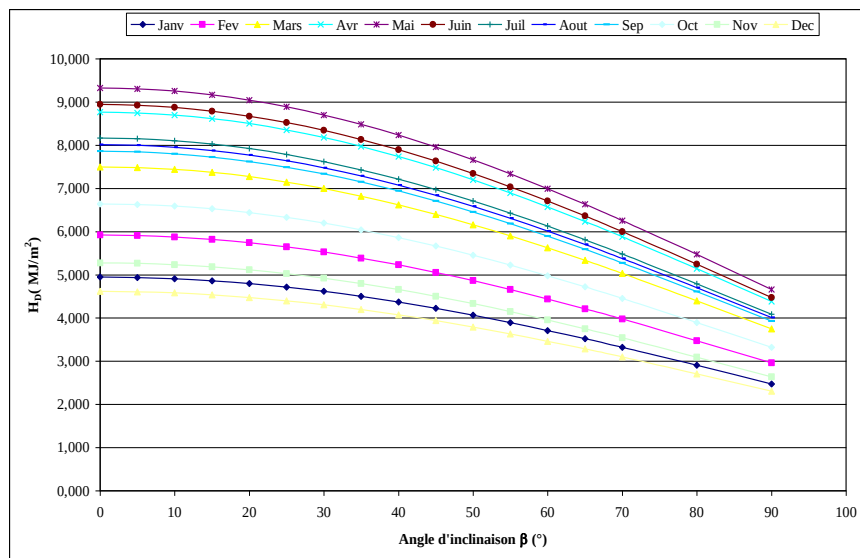


Fig.IV.10: Evolution moyenne mensuelle du rayonnement diffus reçu sur des surfaces unités de différentes inclinaisons à M'Sila, selon le modèle de Liu & Jordan.

Selon le modèle de Liu & Jordan, on constate d'après la figure IV.10 que la moyenne mensuelle du rayonnement diffus reçu sur un plan incliné à M'sila décroît avec l'inclinaison de ce dernier.

Quelque que soit l'inclinaison du plan récepteur, la moyenne mensuelle du rayonnement diffus interceptée par ce dernier à M'sila est maximale au mois de mai, et minimale au mois de décembre.

La figure IV.11 montre l'évolution moyenne mensuelle de la composante diffuse du rayonnement solaire incident, selon le modèle circumsolaire, sur un plan (de 1 m^2 de surface) à différents angles d'inclinaison.

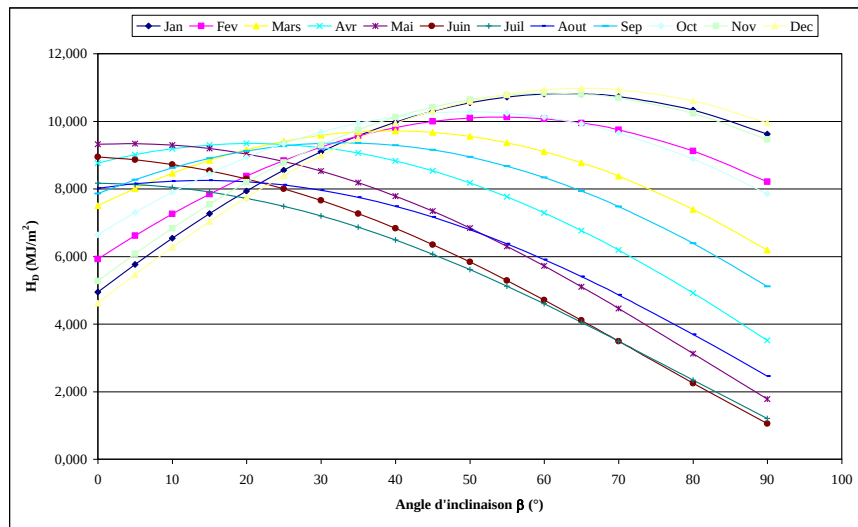


Fig.IV.11: Evolution moyenne mensuelle du rayonnement diffus reçu sur des surfaces unités de différentes inclinaisons à M'Sila, selon le modèle circumsolaire.

Selon le modèle circumsolaire, on constate que :

Lorsque la surface réceptrice est inclinée de 5° et de 10° par rapport à l'horizontal, le rayonnement moyen mensuel diffus incident est maximal au mois de mai.

Lorsque la surface réceptrice est inclinée de 15 et 20° par rapport à l'horizontal, elle reçoit le maximum de rayonnement moyen mensuel diffus incident au mois d'avril.

Lorsque la surface réceptrice est inclinée de 25° par rapport à l'horizontal, elle reçoit le maximum de rayonnement moyen mensuel diffus incident au mois de mars.

Lorsque la surface réceptrice est inclinée de 30, 35 et 40° par rapport à l'horizontal, elle reçoit le maximum de rayonnement moyen mensuel diffus incident au mois d'octobre.

Lorsque la surface réceptrice est inclinée de 45 et 50° par rapport à l'horizontal, elle reçoit le maximum de rayonnement moyen mensuel diffus incident au mois de novembre.

Enfin, le maximum de rayonnement moyen mensuel diffus est reçu au mois de décembre, lorsque la surface réceptrice est inclinée de 55, 60, 65, 70, 80 et 90° par rapport à l'horizontal.

Le tableau IV-6 indique pour chaque mois l'angle d'inclinaison pour laquelle la surface réceptrice reçoit le maximum de rayonnement diffus incident.

Tableau IV-6 : Angle d'inclinaison optimal pour le rayonnement diffus (Modèle circumsolaire).

Mois	Jan	Fev	Mars	Avr.	Mai	Jui.	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Dec.
l'inclinaison (°)	65	55	40	20	5	0	0	15	35	50	60	65
$H_D(MJ/m^2)$	335,0	283,4	301,2	280,2	289,5	268,2	253,2	255,7	280,5	318,8	324,9	340,1

La figure IV.12 montre l'évolution moyenne mensuelle de la composante diffuse du rayonnement solaire incident, selon le modèle de Hay, sur un plan (de 1 m² de surface) à différents angles d'inclinaison.

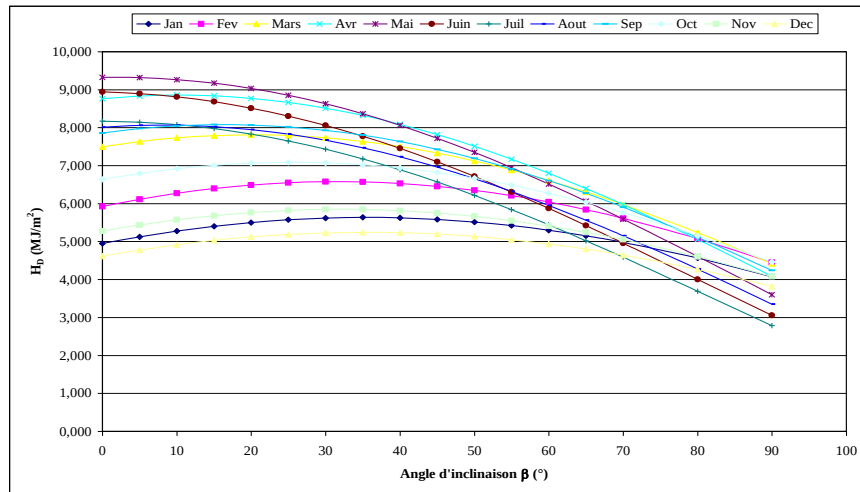


Fig.IV.12: Evolution moyenne mensuelle du rayonnement diffus reçu sur des surfaces unités de différentes inclinaisons à M'Sila, selon le modèle de Hay.

Selon le modèle de Hay, on constate que :

Lorsque la surface réceptrice est inclinée de 5°, 10, 15, 20, 25, 30, et 35° par rapport à l'horizontal, le rayonnement moyen mensuel diffus incident est maximal au mois de mai.

Lorsque la surface réceptrice est inclinée de 40, 45, 50, 60 et 65° par rapport à l'horizontal, elle reçoit le maximum de rayonnement moyen mensuel diffus incident au mois d'avril.

Lorsque la surface réceptrice est inclinée de 70, et 80° par rapport à l'horizontal, elle reçoit le maximum de rayonnement moyen mensuel diffus incident au mois de mars.

Lorsque la surface réceptrice est inclinée de 90° par rapport à l'horizontal, elle reçoit le maximum de rayonnement moyen mensuel diffus incident au mois d'octobre.

Le tableau IV-7 indique pour chaque mois l'angle d'inclinaison pour laquelle la surface réceptrice reçoit le maximum de rayonnement diffus incident.

Tableau IV-7 : Angle d'inclinaison optimal pour le rayonnement diffus (Modèle de Hay).

Mois	Jan	Fev	Mars	Avr.	Mai	Jui.	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Dec.
l'inclinaison	35	30	20	10	0	0	0	10	15	25	30	35
H _D (MJ/m ²)	174,6	184,1	242,1	265,7	289,0	268,2	253,2	249,9	242,3	219,6	175,3	162,5

La figure IV.13 montre l'évolution moyenne mensuelle de la composante diffuse du rayonnement solaire incident à M'Sila, selon le modèle de Reindl, sur un plan (de 1 m² de surface) à différents angles d'inclinaison.

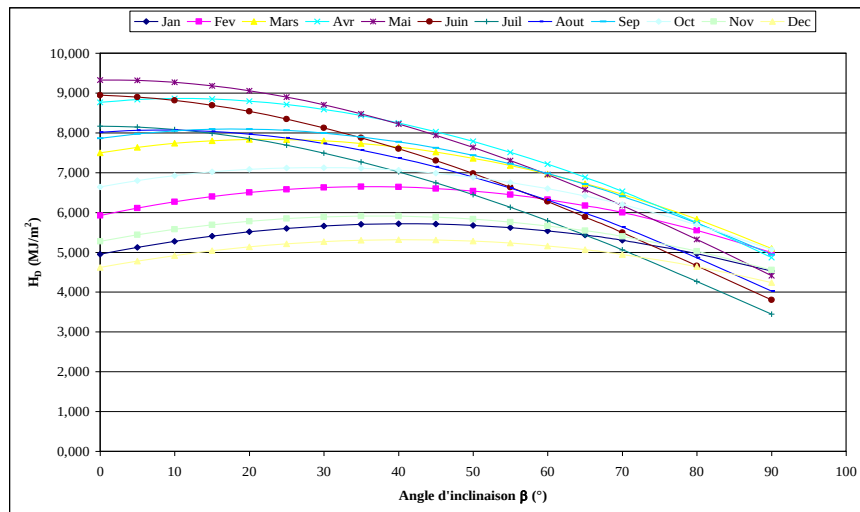


Fig.IV.13: Evolution moyenne mensuelle du rayonnement diffus reçu sur des surfaces unités de différentes inclinaisons à M'Sila, selon le modèle de Reindl.

Selon le modèle de Reindl, on constate que :

Lorsque la surface réceptrice est inclinée de 5, 10, 15, 20, 25, 30, et 35° par rapport à l'horizontal, le rayonnement moyen mensuel diffus incident est maximal au mois de mai.

Lorsque la surface réceptrice est inclinée de 40, 45, 50, 60, 65 et 70° par rapport à l'horizontal, elle reçoit le maximum de rayonnement moyen mensuel diffus incident au mois d'avril.

Lorsque la surface réceptrice est inclinée de 80, et 90° par rapport à l'horizontal, elle reçoit le maximum de rayonnement moyen mensuel diffus incident au mois de mars.

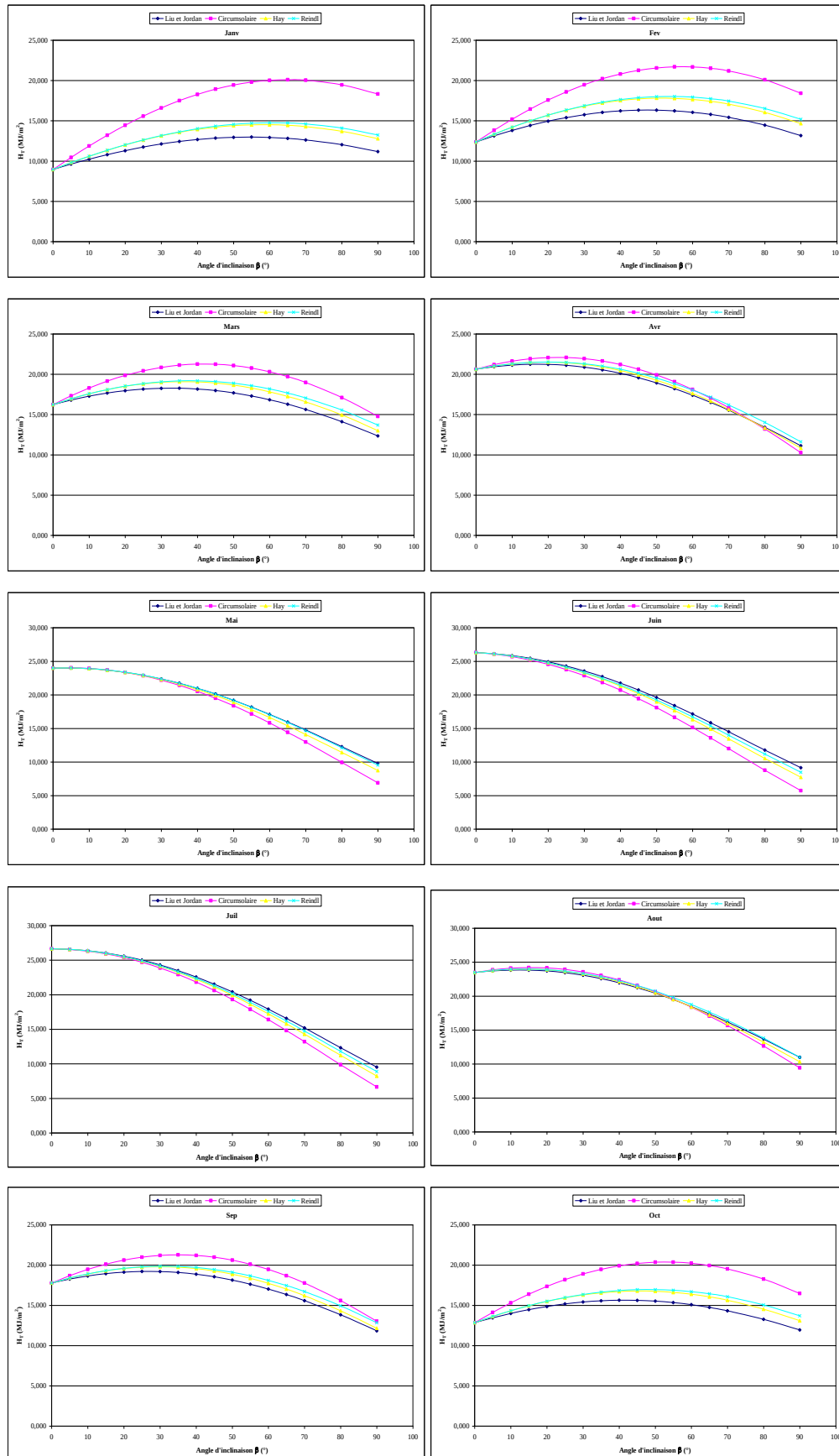
Le tableau IV-8 indique pour chaque mois l'angle d'inclinaison pour laquelle la surface réceptrice reçoit le maximum de rayonnement diffus incident.

Tableau IV-8 : Angle d'inclinaison optimal pour le rayonnement diffus (Modèle de Reindl).

Mois	Jan	Fev	Mars	Avr.	Mai	Jui.	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Dec.
Angle d'inclinaison	40	35	20	10	0	0	0	10	20	30	35	40
$H_D(MJ/m^2)$	177,1	186,0	242,7	265,8	289,0	268,2	253,2	250,0	242,6	220,9	177,3	164,8

D'après les résultats des modèles cités ci-dessus, il est clair que l'inclinaison de la surface réceptrice en plus de la distance terre soleil (effet des mois) influent sur le rayonnement diffus.

La figure IV.14 montre l'évolution moyenne mensuelle du rayonnement solaire incident sur un plan (de 1 m² de surface) orienté vers le sud, à différents angles d'inclinaison, selon les quatre modèles d'étude cités ci-dessus (modèle de Liu & Jordan, modèle Circumsolaire, modèle de Hay, et le modèle de Reindl) à M'Sila.



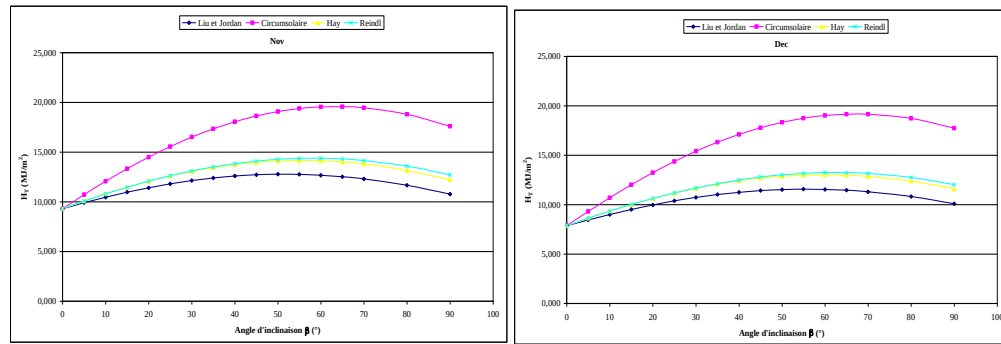


Fig.IV.14: Comparaison du rayonnement moyen mensuel reçu sur des surfaces unités de différentes inclinaisons à M'Sila, obtenu selon les modèles de : Liu & Jordan, Circumsolaire, Hay, et Reindl.

On remarque d'après la figure IV.14 que :

Les valeurs du rayonnement moyen mensuel intercepté, à M'Sila, par un plan incliné, orienté vers le sud, pour tous les mois de l'année, selon le modèle de Hay et celui de Reindl se rapprochent, donc, on peut dire que les modèles de Hay et Reindl donnent des valeurs presque similaires pour tous les mois de l'année concernant le rayonnement incident sur un plan incliné à M'Sila et orienté vers le sud.

Pour les mois de : janvier, février, mars, septembre, octobre, novembre et décembre, les valeurs les plus faibles du rayonnement moyen mensuel incident sur une surface inclinée à M'Sila et orientée vers le sud, sont obtenues par le modèle de Liu & Jordan. Les valeurs les plus élevées par contre, sont estimées par le modèle circumsolaire.

Pour le mois d'avril, les valeurs du rayonnement moyen mensuel incident sur un plan incliné en plein sud, à M'Sila, et ce quelque soit son inclinaison, sont similaires pour les modèles de Hay, Reindl et Liu & Jordan (l'erreur relative par rapport au modèle de Jordan ne dépasse pas les 5%). Le modèle circumsolaire donne des valeurs inférieures au modèle de Liu & Jordan pour les angles d'inclinaison inférieurs à 80°. L'erreur relative dans ce cas ne dépasse pas les 10% (par rapport au modèle de Jordan).

Pour le mois de mai et pour un plan incliné d'un angle inférieur ou égale à 30° en plein sud à M'Sila, tous les modèles donnent des valeurs presque identiques du rayonnement moyen mensuel incident sur ce plan, (l'erreur relative par rapport au modèle de Jordan ne dépasse pas les 1%).

Le modèle de Liu & Jordan et le modèle de Reindl sont presque identiques pour le mois de mai, vue que l'erreur relative entre eux ne dépasse pas les 3%.

A M'Sila, pour le mois de juin et pour un plan incliné d'un angle inférieur ou égale à 10° en plein sud, tous les modèles donnent des valeurs presque identiques du rayonnement moyen

mensuel incident sur ce plan, (l'erreur relative par rapport au modèle de Jordan ne dépasse pas les 1%).

Pour le mois de juillet et pour un plan incliné d'un angle inférieur ou égale à 20° en plein sud, tous les modèles donnent des valeurs presque identiques du rayonnement moyen mensuel incident sur ce plan à M'Sila, (l'erreur relative par rapport au modèle de Jordan ne dépasse pas les 1%).

Le modèle de Liu & Jordan et le modèle de Reindl sont presque identiques pour le mois d'août, vue que l'erreur relative entre eux ne dépasse pas les 2%.

Pour le mois d'août et pour un plan incliné d'un angle inférieur ou égale à 70° en plein sud, tous les modèles donnent des valeurs proches du rayonnement moyen mensuel incident sur ce plan à M'Sila, (l'erreur relative par rapport au modèle de Jordan ne dépasse pas les 5%).

La figure IV.15 montre l'évolution moyenne annuelle du rayonnement solaire incident sur un plan (de 1 m^2 de surface) orienté vers le sud, à différents angles d'inclinaison, selon les quatre modèles d'étude cités ci dessus (modèle de Liu & Jordan, modèle Circumsolaire, modèle de Hay, et le modèle de Reindl) à M'Sila.

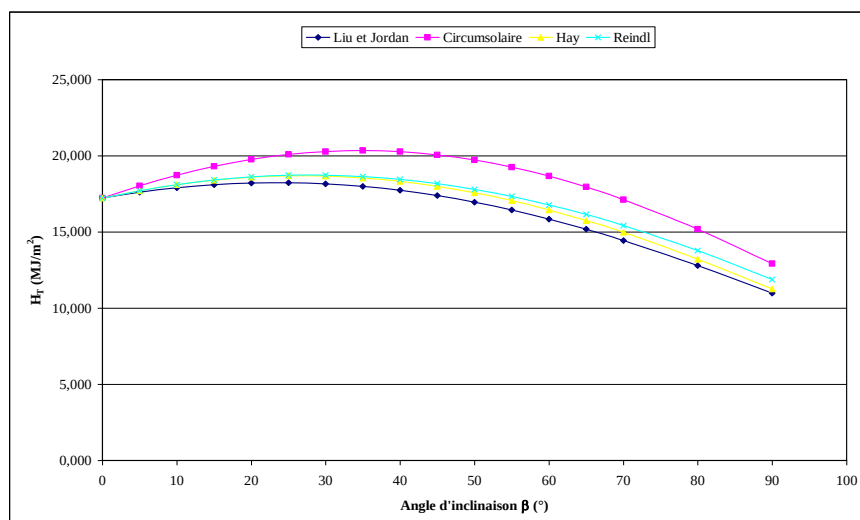


Fig.IV.15: Evolution moyenne annuelle du rayonnement solaire incident sur un plan de 1 m^2 de surface, orienté vers le sud, à différents angles d'inclinaison, selon les modèles de : Liu & Jordan, Circumsolaire, Hay, et Reindl.

On remarque d'après la figure IV.15 que :

Les valeurs du rayonnement moyen annuel intercepté, à M'Sila, par un plan incliné, orienté vers le sud, selon les modèles de Hay et Reindl se rapprochent, donc, on peut dire que les modèles de Hay et Reindl donnent des valeurs presque similaires concernant le rayonnement incident sur un plan incliné à M'Sila et orienté vers le sud.

Le modèle de Liu & Jordan et le modèle de Hay sont presque identiques pour le rayonnement moyen annuel, vue que l'erreur relative entre eux ne dépasse pas les 4%.

De même, les valeurs les plus faibles du rayonnement moyen annuel incident sur une surface inclinée à M'Sila et orientée vers le sud, sont obtenues par le modèle de Liu & Jordan. Les valeurs les plus élevées par contre, sont estimées par le modèle circumsolaire.

IV.7 Optimisation de l'angle d'inclinaison pour la collecte d'énergie solaire maximale à M'sila

Les paramètres permettant de capter le maximum d'énergie solaire durant la journée sont l'inclinaison et l'orientation des capteurs. Effectivement, les capteurs solaires sont orientés vers le sud s'ils se trouvent dans l'hémisphère nord, ils sont par contre dirigés vers le nord s'ils sont placés dans des zones de l'hémisphère sud. Dans ce qui suit on se propose de déterminer l'angle optimale mensuel, saisonnière et annuel des capteurs solaires placés à M'Sila afin de maximiser l'énergie collectée par ces derniers.

IV.7.1 Inclinaison optimale mensuel

A partir des graphes tracés pour chaque mois sur la figure IV.14, on peut déterminer l'angle optimal mensuel permettant la collecte maximale du rayonnement solaire mensuel incident. Le tableau IV-9 indique pour chaque mois l'angle d'inclinaison optimal pour lequel la surface réceptrice reçoit le maximum de rayonnement incident selon les différents modèles mentionnés ci-dessus.

Tableau IV-9 : Angle d'inclinaison optimal mensuel et radiations globales correspondantes selon les modèles de : Liu & Jordan, Circumsolaire, Hay, et Reindl.

Modèle Liu & Jourdan			Modèle circumsolaire		Modèle de Hay		Modèle de Reindl	
Mois	$\beta_{opt}(^{\circ})$	H_T (MJ /m ² /jour)	$\beta_{opt}(^{\circ})$	H_T (MJ /m ² /jour)	$\beta_{opt}(^{\circ})$	H_T (MJ /m ² /jour)	$\beta_{opt}(^{\circ})$	H_T (MJ /m ² /jour)
Jan	54.5	12.98	65	20.10	58.5	14.52	60.5	14.76
Fev	47.5	16.33	57	21.71	51.5	17.81	53.5	18.02
Mars	32.5	18.28	42	21.28	36	19.09	38	19.20
Avr	17	21.25	22.5	22.09	19	21.50	20	21.52
Mai	3	24.00	4	24.03	4	24.01	3.5	24.01
Juin	-4	26.35	-5	26.39	-4.5	26.36	-4.5	26.36
Juil	-1	26.65	-1	26.66	-1	26.65	-1	26.65
Aout	12.5	23.85	15.5	24.20	14	23.98	14	23.99
Sep	27	19.22	35	21.29	30	19.80	31	19.87
Oct	41.5	15.65	52.5	20.38	46	16.78	48.5	16.96
Nov	51.5	12.77	63.5	19.57	55.5	14.15	58.5	14.38
Dec	55.5	11.57	67.5	19.16	60	13.02	62.5	13.24
H_T/an		6967.028		8118.33		7233.095		7272.277

Remarque :

Les valeurs du tableau IV-8 sont obtenues en utilisant l'indice de clarté K_T .

Le même calcul a été refait en utilisant cette fois-ci la moyenne mensuelle de l'indice de clarté, $\overline{K_T}$. Les résultats ainsi trouvés sont portés sur le tableau IV-10.

Tableau IV-10 : Angle d'inclinaison optimal mensuel et radiations globales correspondantes selon les modèles de : Liu & Jordan, Circumsolaire, Hay, et Reindl (Calcul obtenu pour $\overline{K_T}$).

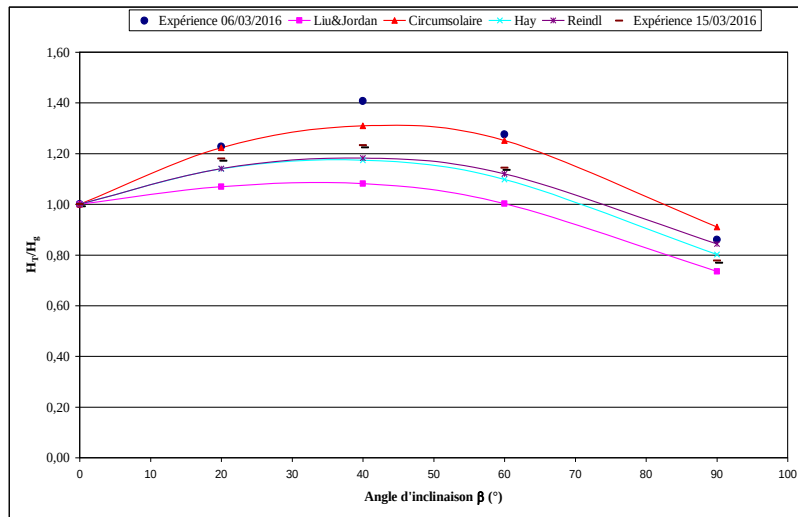
Modèle Liu & Jourdan			Modèle circumsolaire		Modèle de Hay		Modèle de Réndl	
Mois	$\beta_{opt}(^\circ)$	H_T (MJ /m ² /jour)	$\beta_{opt}(^\circ)$	H_T (MJ /m ² /jour)	$\beta_{opt}(^\circ)$	H_T (MJ /m ² /jour)	$\beta_{opt}(^\circ)$	H_T (MJ /m ² /jour)
Jan	54.5	12.89	65.5	20.06	58.5	14.42	61	14.66
Fev	47.5	16.27	57	21.69	51	17.75	53.5	17.96
Mar	33.5	18.32	42.5	21.38	37	19.17	39	19.29
Avr	17.5	21.23	23	22.09	19.5	21.49	20	21.52
Mai	8.5	24.12	11	24.29	9.5	24.19	10	24.19
Juin	-4	26.32	-4.5	36.36	-4	26.34	-4	26.34
Juil	-1	36.67	-1	26.67	-1	26.67	-1	26.67
Aout	13	23.92	15.5	24.27	14	24.06	14.5	24.07
Sep	27.5	19.34	35	21.38	30.5	19.95	32	20.02
Oct	41.5	15.59	52.5	20.33	45.5	16.71	48	16.90
Nov	50.5	12.68	63.5	19.48	55.5	14.05	57.5	14.27
Dec	55.5	11.59	67	19.19	59.5	13.05	62	13.28
H_T /an		6967,4095		8114,8858		7233,0508		7271,4825

A partir des tableaux IV-8 et IV-9 on constate que la différence entre les valeurs obtenues en utilisant K_T ou $\overline{K_T}$ n'est pas importante que ce soit pour l'angle optimal d'inclinaison ou pour l'énergie maximale collectée correspondante, à l'exception du mois de mai, où cette différence est remarquable et ce concernant juste l'angle optimal d'inclinaison.

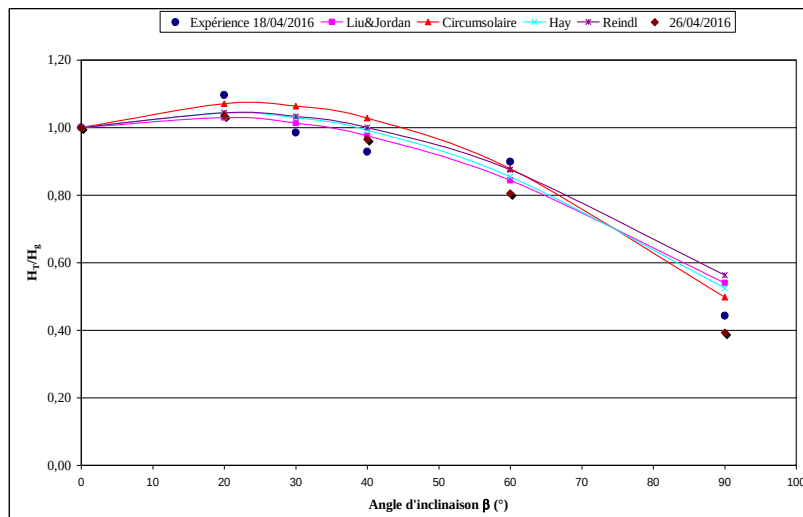
On remarque d'après le tableau IV-8, qu'il faut bien incliner le capteur solaire d'un angle supérieur à 30° ($\beta > 30^\circ$) aux mois de janvier, février, mars, octobre, novembre et décembre et le placer en position presque horizontale aux mois de mai, juin et juillet afin de collecter le maximum d'irradiations solaires.

Encore une fois et comme signalé précédemment, on constate que les valeurs maximales, que ce soit pour l'angle d'inclinaison ou bien l'énergie maximale collectée, sont obtenues avec le modèle circumsolaire. Le modèle de Liu & Jordan par contre donne les valeurs les plus faibles. Les modèles de Hay et Reindl donnent des valeurs presque similaires qui se situent entre celles de Liu & Jordan et les valeurs obtenues par le modèle circumsolaire (Valeurs intermédiaires).

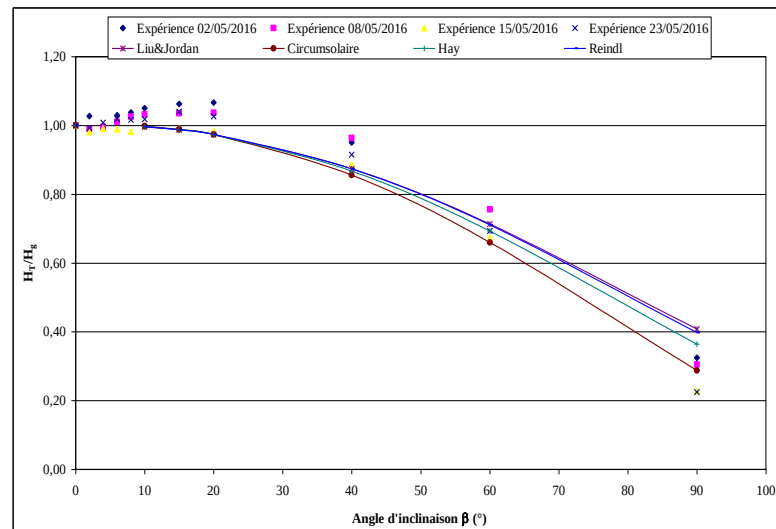
Arrivé à ce stade-là, on se demande quel est le modèle adéquat à M'Sila parmi les quatre modèles étudiés à savoir le modèle de Liu & Jordan, le modèle circumsolaire, modèle de Hay et le modèle de Reindl. Pour cela on a opté à la pratique. Sur la figure IV.16 on a comparé les résultats obtenus expérimentalement en changeant l'inclinaison d'un capteur photovoltaïque orienté en plein sud et en mesurant l'énergie collectée pour chaque inclinaison avec ceux des modèles étudiés.



(a) Mois de mars



(b) Mois d'avril



(c) Mois de mai

Fig.IV.16: Comparaison entre les résultats expérimentaux et ceux des modèles de : Liu & Jordan, Circumsolaire, Hay, et Reindl (Mois de mars, avril et mai).

On constate d'après la figure IV.16 a que l'angle optimal obtenu expérimentalement pour les deux journées dont on a effectué les expériences est de l'ordre de 40° pour le mois de mars, valeur qui se rapproche du modèle de Reindl et du modèle circumsolaire.

On remarque également que la variation de l'énergie réelle collectée entre les angles d'inclinaison allant de 20° à 40° est de $0,02 \text{ MJ}/^\circ$, elle est de l'ordre de $0,04 \text{ MJ}/^\circ$ lorsque l'angle d'inclinaison varie de 40° à 60° . On peut dire que dans ce cas que le modèle de Reindl est le plus adéquat pour M'Sila au mois de mars.

On constate d'après la figure IV.16 b que l'angle optimal obtenu expérimentalement pour les deux journées dont on a effectué les expériences est de l'ordre de 20° pour le mois d'avril, valeur qui se rapproche le plus du modèle de Reindl.

On peut dire que dans ce cas que le modèle de Reindl est le plus adéquat pour M'Sila au mois d'avril.

On constate d'après la figure IV.16 c que l'angle optimal obtenu expérimentalement pour les quatre journées dont on a effectué les expériences varie selon la date de la journée d'expérience. En effet, il est de l'ordre de 20° pour le 02 et le 08 mai 2016. L'angle optimal prend la valeur de 0° le 15/05/2016, et la valeur de 15° le 23 /05/2016.

On remarque également que la variation de l'énergie réelle collectée entre les angles d'inclinaison allant de 0° à 20° ne dépasse pas $0,003 \text{ MJ}/^\circ$. On peut dire que dans ce cas que l'angle d'inclinaison n'exerce qu'un faible effet lorsqu'elle varie de 0° jusqu'à 20° . Tous les modèles donnent des valeurs presque similaires au mois de mai à M'Sila.

D'après ces essais, on peut généraliser et dire que le modèle de Reindl est le plus adéquat pour M'Sila vue qu'il donne des valeurs proches de celles trouvées expérimentalement.

Il existe une autre technique plus simple basée sur le modèle analytique développé par EL Kassaby (Cf § Chapitre II) qui permet de calculer l'angle optimal mensuel. Le tableau IV-11 regroupe les valeurs ainsi obtenues pour M'Sila et les compare avec celles du modèle de Reindl.

Tableau IV-11 : Angle d'inclinaison optimal mensuel selon les modèles de EL Kassaby et Reindl.

Mois	Jan	Fev	Mars	Avr.	Mai	Jui.	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Dec
Angle d'inclinaison (°) Reindl	60,5	53,5	38	20	3,5	-4,5	-1	14	31	48,5	58,5	62,5
Angle d'inclinaison (°) EL Kassaby	62.70	54.08	38.65	20.02	2.98	0	0	0	0	49.87	61.22	65.37

D'après le tableau IV-10, on remarque que modèle d'EL Kassaby peut être adéquat à M'Sila pour tous les mois de l'année à l'exception des deux mois d'août et de septembre où l'écart entre les résultats des valeurs des angles optimaux des deux modèles est important (dépasse 10°).

IV.7.2 Inclinaison optimale saisonnière

L'inclinaison saisonnière permet de changer l'inclinaison des panneaux quatre fois par an au lieu de les changer chaque mois.

Le tableau IV-12 indique pour chaque saison l'angle d'inclinaison optimal pour lequel la surface réceptrice reçoit le maximum de rayonnement incident selon les différents modèles cités ci-dessus.

Tableau IV-12 : Angle d'inclinaison optimal saisonnier et radiations globales correspondantes selon les modèles de : Liu & Jordan, Circumsolaire, Hay, et Reindl

Modèle Liu & Jourdan			Modèle circumsolaire		Modèle de Hay		Modèle de Reindl	
Saison	$\beta_{opt}(^\circ)$	H_T (MJ /m ² /jour)	$\beta_{opt}(^\circ)$	H_T (MJ /m ² /jour)	$\beta_{opt}(^\circ)$	H_T (MJ /m ² /jour)	$\beta_{opt}(^\circ)$	H_T (MJ /m ² /jour)
Hiver	47,00	14,81	58,00	20,47	51,00	16,14	53,00	16,34
Printemps	8,00	22,90	11,50	23,12	9,50	22,97	9,50	22,97

Eté	8,50	24,09	12,00	24,32	10,00	24,17	10,00	24,17
Automne	46,50	13,77	58,50	19,60	50,50	15,01	53,00	15,21
H_T (MJ /m ² /an)		6901,94		7987,91		7147,38		7184,94

Les mêmes constatations concernant l'ordre de grandeur des valeurs obtenues par les modèles étudiés sont valables dans le cas de l'inclinaison saisonnière. En d'autres termes, les valeurs maximales, que ce soit pour l'angle d'inclinaison ou bien l'énergie maximale collectée, sont obtenues avec le modèle circumsolaire. Le modèle de Liu & Jordan par contre donne les valeurs les plus faibles. Les modèles de Hay et Reindl donnent des valeurs presque similaires qui se situent entre les valeurs extrêmes.

En été et en printemps, l'écart entre les résultats des valeurs des angles optimaux des modèles étudiés n'est pas important ($\pm 2^\circ$). Par contre en hiver et en automne cette différence devient importante où elle dépasse les 10° .

On voit d'après le tableau IV-11, que les angles d'inclinaison optimaux des saisons d'hiver et d'automne sont presque les mêmes.

Pareil pour les angles d'inclinaison optimaux des saisons d'été et du printemps et ce pour tous les modèles étudiés.

EL Kassaby propose aussi une méthode analytique (Cf § Chapitre II) qui permet de calculer l'angle optimal saisonnière. Le tableau IV-13 regroupe les valeurs ainsi obtenues pour M'Sila et les compare avec celles des études menées pour déterminer l'inclinaison optimale saisonnière.

Tableau IV-13 : Angle d'inclinaison optimal saisonnière selon les modèles d'EL Kassaby et d'autres.

Saisons	Hiver	Printemps	Eté	Automne
Angle d'inclinaison ($^\circ$) $\beta \pm 10$	45,7	25,7	25,7	45,7
Angle d'inclinaison ($^\circ$) $\beta \pm 15$	50,7	20,7	20,7	50,7
Angle d'inclinaison ($^\circ$) $\beta \pm 20$	55,7	15,7	15,7	55,7

Angle d'inclinaison (°) EL Kassaby	55,4	9,82	10,33	55,89
Angle d'inclinaison (°) Reindl	53,00	9,50	10,00	53,00

On constate d'après le tableau IV-12 que la méthode d'El Kassaby donne des valeurs presque similaires à celles trouvées par Reindl concernant l'inclinaison optimale saisonnière (l'écart entre les résultats des valeurs des angles optimaux des deux modèles n'est pas important $\pm 3^\circ$). Donc, on peut estimer l'angle d'inclinaison optimal saisonnier à M'Sila en utilisant la méthode analytique proposée par El Kassaby. Comme on peut l'estimer aussi, grossièrement en utilisant la relation suivante :

$$\beta_{\text{opt}} = \varphi \pm 20^\circ \quad (\text{IV.8})$$

IV.7.3 Inclinaison optimale annuelle

L'inclinaison annuelle permet de fixer l'inclinaison des panneaux durant toute l'année au lieu de la changer chaque mois ou chaque saison.

Le tableau IV-14 indique l'angle d'inclinaison optimal annuel à M'Sila pour lequel la surface réceptrice reçoit le maximum de rayonnement incident selon les différents modèles cités ci-dessus.

On constate que le modèle Circumsolaire donne la même valeur la plus élevée d'angle d'inclinaison optimal annuel qui est de $34,5^\circ$.

Tableau IV-14 : Angle d'inclinaison optimal annuel et radiations globales correspondantes selon les modèles de : Liu & Jourdan, Circumsolaire, Hay, et Reindl

Modèle Liu & Jourdan		Modèle circumsolaire		Modèle de Hay		Modèle de Reindl	
$\beta_{\text{opt}}(^{\circ})$	H_T (MJ /m ² /jour)	$\beta_{\text{opt}}(^{\circ})$	H_T (MJ /m ² /jour)	$\beta_{\text{opt}}(^{\circ})$	H_T (MJ /m ² /jour)	$\beta_{\text{opt}}(^{\circ})$	H_T (MJ /m ² /jour)
23,5	18,24	34,5	20,34	27	18,69	28	18,731
H_T (MJ /m ²)	6656,52		7424,77		6820,57		6836,834

Le plus petit angle d'inclinaison optimal annuel est estimé par le modèle de Jordan. Le modèle de Reindl et le modèle de Hay donnent des valeurs presque identiques (valeur intermédiaire entre les valeurs extrêmes).

La figure IV.17 compare les gains en énergies reçues pour les différentes inclinaisons mensuelle, saisonnière et annuelle.

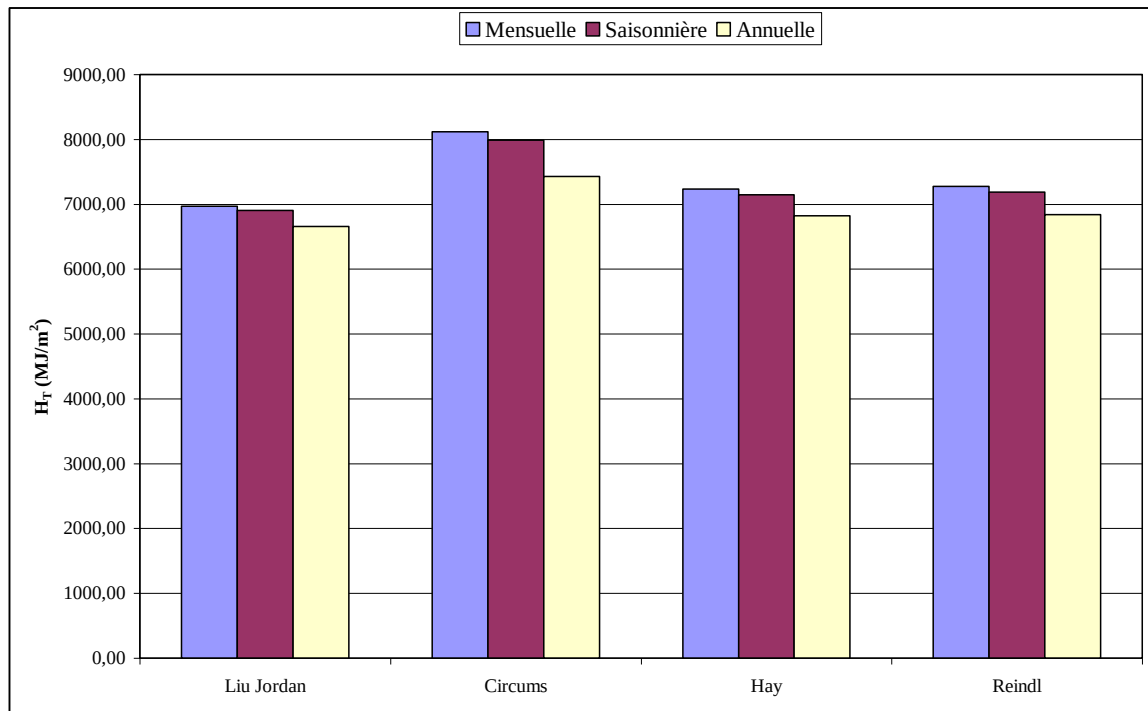


Fig.IV.17: Energies reçues pour les différentes inclinaisons : mensuelle, saisonnière et annuelle.

Il est clair d'après la figure IV.17 qu'il est préférable de changer l'inclinaison des capteurs chaque mois ou chaque saison au lieu de la fixer, pour gagner plus d'énergie.

IV.8 Conclusion

L'application des formules du rayonnement solaire pour la région de M'sila donne de bons résultats en comparaison avec les valeurs expérimentales. L'utilisation des formules simplifiées permet l'estimation rapide de l'angle optimal et de l'énergie journalière et mensuelle. La détermination de l'angle d'inclinaison optimal est très importante pour pouvoir obtenir le maximum d'énergie. Nous pouvons trouver l'inclinaison mensuelle tous les mois, mais par facilité, on peut également choisir une inclinaison pour chaque saison ou inclinaison annuelle pour toute l'année. L'orientation optimale de l'angle d'inclinaison des capteurs solaires, s'avère la méthode idéale pour optimiser le générateur PV.

Conclusion

générale

Conclusion générale

L'objectif de ce modeste travail est de déterminer l'angle optimal d'inclinaison des capteurs solaires à M'Sila. Cette étude a été abordée à travers deux parties ; une théorique et l'autre expérimentale. Cette dernière est menée au laboratoire d'hydraulique appartenant au département de génie mécanique de l'université de M'Sila.

Les paramètres permettant de capter le maximum d'énergie solaire durant la journée sont l'inclinaison et l'orientation des capteurs. Effectivement, les capteurs solaires sont orientés vers le sud s'ils se trouvent dans l'hémisphère nord, ils sont par contre dirigés vers le nord s'ils sont placés dans des zones de l'hémisphère sud. Les capteurs placés à M'Sila donc, doivent s'orienter vers le sud.

Le rayonnement solaire incident sur un plan incliné d'orientation arbitraire H_T à un instant quelconque de la journée est la somme des trois composantes qui le constituent, à savoir la composante directe H_B , diffuse H_D et réfléchi par le sol H_R . La quantité d'énergie solaire reçue dépend de l'orientation et de la pente de la surface réceptrice.

L'étude théorique du rayonnement solaire incident sur une surface inclinée nous a permis de retenir les points suivants :

- le rayonnement mensuel direct incident est influencé par l'inclinaison de la surface réceptrice en plus de la distance terre soleil (effet des mois),
- le rayonnement mensuel réfléchi incident sur une surface inclinée croît avec l'inclinaison de cette dernière,
- Quelque soit l'angle d'inclinaison de la surface réceptrice se trouvant à M'Sila (à l'exception de la surface horizontale 0°), le rayonnement réfléchi intercepté par cette dernière est maximale au mois de juillet,
- Il existe plusieurs modèles qui permettent de déterminer la composante diffuse du rayonnement solaire incident sur un plan incliné d'orientation arbitraire à un instant quelconque de la journée. Au cours de cette étude, on a abordé quatre modèles à savoir :
 - Le modèle de Liu & Jordan,
 - le modèle Circumsolaire,
 - Le modèle de Hay,
 - Le modèle de Reindl.
- l'inclinaison de la surface réceptrice en plus de la distance terre soleil (effet des mois) influent sur le rayonnement diffus,

Conclusion général

- Les modèles de Hay et Reindl donnent des valeurs presque similaires pour tous les mois de l'année concernant le rayonnement mensuel incident sur un plan incliné à M'Sila et orienté vers le sud. De même pour le rayonnement moyen annuel,

- les valeurs les plus faibles du rayonnement moyen saisonnier et annuel incident sur une surface inclinée à M'Sila et orientée vers le sud, sont obtenues par le modèle de Liu & Jordan. Les valeurs les plus élevées par contre, sont estimées par le modèle circumsolaire,

-Il faut bien incliner le capteur solaire d'un angle supérieur à 30° ($\beta > 30^\circ$) aux mois de janvier, février, mars, octobre, novembre et décembre et le placer en position presque horizontale aux mois de mai, juin et juillet afin de collecter le maximum d'irradiations solaires.

La combinaison de la partie expérimentale et théorique nous a permis de retenir suivants :

- Le modèle de Reindl est le plus adéquat pour M'Sila vue qu'il donne des valeurs proches de celles trouvées expérimentalement,.

-Le modèle analytique d'EL Kassaby peut être adéquat à M'Sila pour tous les mois de l'année à l'exception des deux mois d'août et de septembre où l'écart entre les résultats des valeurs des angles optimaux des modèles d'EL Kassaby et Reindl est important (dépasse 10°),

-Les angles d'inclinaison optimaux des saisons d'hiver et d'automne sont presque les mêmes. Pareil pour les angles d'inclinaison optimaux des saisons d'été et du printemps et ce pour tous les modèles étudiés,

- On peut estimer l'angle d'inclinaison optimal saisonnier à M'Sila en utilisant la méthode analytique proposée par El Kassaby,

-Il est préférable de changer l'inclinaison des capteurs chaque mois ou chaque saison au lieu de la fixer, pour gagner plus d'énergie.

Référence

- [1] V. Daniel.2003, « le rayonnement thermique, bilan radiatif et effet de serre » en ligne sur le list ENS-DEGESCO planet-terre : <http://planet-terre.ens-lyon.fr>
- [2] M. Orgeret. « Les piles solaires (le composant et ses application). Edition MASSON. Paris.1985.
- [3] José Miguel Navarro ‘‘Cellules photovoltaïque de l’étage d’adaptation électronique dédié à la conversion photovoltaïque ‘’. Thèse de doctorat, Université de Toulouse, 2008
- [4] Helali Kamelia ‘‘ Modélisation D’une Cellule photovoltaïques : Etude comparative ‘’. Mémoire de magister. Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou. 2012.
- [5] Zouache Foudil ‘‘Etude de la concentration solaire sur les performances des systèmes photovoltaïque’’ .mémoire de magister en Electronique, Université Mentouri de Constantine 2009.
- [6] Benmeriem Fatiha ‘‘Contribution a l’analyse de la faisabilité énergétique d’une installation de production de l’eau chaude sanitaire par voie solaire’’. Mémoire de magister. Université de Hassiba Benbouali. Chlef. 2009.
- [7] L.de Schoulepnikoff et Gymnase Auguste Piccard ‘‘Quelle source d’énergie pour les vingt prochaines années ?’’. Travail de maturité Alexandra Catana, 3M7, 2009.
- [8] Jimmy Royer, Thomas Djiako, Eric Schiller, Bocar sada Sy ‘‘Le pompage photovoltaïque’’ université d’Ottawa. 1998.
http://www.pseau.orgoutilsouvragesiepf_pompage_photovoltaique.
- [9] Jacque Bernard ‘‘Energie solaire ‘‘Calcules et Optimisation ‘’. Nouvelle Edition. Edition Ellipses. Paris.2011.
- [10] Khoudrane Ismail ‘‘ Etude d’un système de poursuite solaire pour les panneaux photovoltaïques ‘’. Mémoire de master en énergétique. Université de Ksdi Merbah Ouargla 2014.
- [11] L’AFFAIRE TOURNESOL. Olympiade de Physique 2008.
http://www.odpf.orgimagesarchives_docs15emememoiresgr-4memoire.

- [12] A. Labouret. M. Villos "Les Energie Solaire Photovoltaïque ". 4^{eme} Edition, Edition de DUNOD. Paris.2009.
- [13] Hamdani Maamar " Etude et Effet l'orientation de Pièces d'un Habitat en Pierre Situé à Ghardaïa ". Mémoire de Magister Energie Renouvelables. Université Abou-Bakar Belkid Tlemcen.2011.
- [14] Abdelkarim Bouras "Etude et conception d'un convertisseur solaire pour la production d'eau chaud sanitaire". Mémoire de Magister Physique. Université Mentouri, Constantine. 2007.
- [15] Michel Daguene "les séchoirs solaires : théorie et pratique". Unisco. Paris. 1985.
- [16] Ahmed Djafour. "Etude d'un système de production d'hydrogène solaire". Thèse de Doctorat en science en physique. Université Kasdi Merbah. Ourgla. 2013.
- [17] T. Markvart. " solar electrcity". John Wiley & Sons, England,1994.
- [18] Missoum Mohammed « Contribution de l'énergie photovoltaïque dans la performance énergétique de l'habitat à haute qualité énergétique en Algérie ». Mémoire Magistère en génie mécanique. Université Hassiba Benbouali, Chlef.2011.
- [19] catalogue « l'électricité solaire » Généralité sur l'énergie solaire techno solaire système SPA.1998
- [20] Ch. Chauiaquet. P. Baratçabal. J. P. "Batellier. Energie Solaire dans le Bâtiment " 4eme Edition. Paris. 1981.
- [21] SOTEHI Oualid. "Etude et analyse de l'influence de l'Ecart de température (absorbeur – vitre) sur l'efficacité d'un capteur solaire". Mémoire de Magister en génie climatique, Université Mentouri Constantine. 2007.
- [22] Chanchal Kumar Pandey, A.K. Katiyar. A note on diffuse solar radiation on a tilted surface .Solar Energy 2009
- [23] Samira Mouhous-Chaouchi. " Etude statistique du rayonnement solaire sur un plan incliné " .mémoire de Magister en Energie Renouvelable, Université Abou Bekr Belkaid, Tlemcen. 2012.

- [24] BENCHERIF Mohammed. ‘‘Modélisation de système énergétique photovoltaïques et éoliens intégration dans un système hybride basse tension’’. Mémoire de Doctorat en physique, Université Abou-bacr Belkaid Telmcen.
- [25] Hamidi Aissa .’’ etude experimentale d’un capteur photovoltaïque: Influence d’angle d’inclinaison’’. Mémoire de Licence énergétique. Universite mohamed boudiaf de m’sila
- [26] https://fr.wikipedia.org/wiki/Wilaya_de_M%27Sila
- [27] http://www.msila-dz.org/?action=formunik&type=sous_menu&idformunik=29
- [28] <https://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/grid.cgi?email=skip@larc.nasa.gov>
- [29] Miguel, A.; Bilbao, J.; Aguiar, R.; Kambezidis, H.; Negro, E. Diffuse solar radiation model evaluation in the north Mediterranean belt area. Solar Energy, 2001, 70, 143-53.

Résumé :

L'énergie solaire occupe une place très importante parmi les différentes sources d'énergies renouvelables. Une connaissance précise de la distribution de l'irradiation solaire sur un site géographique particulier est d'une grande importance pour le développement des systèmes photo thermiques ou photovoltaïques. Afin produire un niveau élevé d'énergie, un module photovoltaïque ou un capteur solaire thermique doit être incliné de façon perpendiculaire aux rayons du soleil. La détermination de l'angle d'inclinaison optimal des modules photovoltaïques ou des capteurs solaires thermiques, s'avère nécessaire pour optimiser leur production d'énergie. Il faut bien incliner le capteur solaire d'un angle supérieur à 30° ($\beta > 30^\circ$) aux mois de janvier, février, mars, octobre, novembre et décembre et le placer en position presque horizontale aux mois de mai, juin et juillet afin de collecter le maximum d'irradiations solaires.

Mots clés : Inclinaison, Rayonnement solaire, énergie solaire.

المخلص:

للطاقة الشمسية مكانة هامة جدا بين مختلف مصادر الطاقة المتجددة. والمعرفة الدقيقة لتوزيع الإشعاع الشمسي على منطقة جغرافية معينة لذوا أهمية كبيرة لتطوير الصورة الحرارية أو النظم الكهربائية الضوئية ، لإنتاج مستوى عال من الطاقة، لتجميع الطاقة الشمسية يجب أن يميل اللوح الشمسي عموديا لأشعة الشمس. تحديد زاوية الميل المثلى من الوحدات الكهروضوئية والطاقة الشمسية الحرارية جامعي، ضروري لتحسين إنتاجها من الطاقة. يجب علينا إمالة تجميع الطاقة الشمسية في زاوية أكبر من 30° ($\beta < 30^\circ$) في شهري يناير وفبراير ومارس وأكتوبر ونوفمبر وديسمبر ووضع في وضع أفقي تقريبا في مايو ويونيو ويوليو لجمع أقصى قدر من الإشعاع

الكلمات المفتاحية: ميل، الإشعاع الشمسي ، الطاقة الشمسية