

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



UNIVERSITE ABOU BEKR
BELKAID

CENTRE DE DEVELOPPEMENT
DES ENERGIES
RENOUVELABLES



ECOLE DOCTORALE «ENERGIES RENOUVELABLES»

MEMOIRE DE MAGISTER

Spécialité : Energies Renouvelables

Option : Photothermique

Thème

**Etude statistique du rayonnement solaire
sur un plan incliné**

Présenté par : Mme Samira MOUHOUS-CHAOUCHI

Soutenu le :

Devant le jury composé de :

Président	Pr BENYOUCEF Boumediene	Professeur	Université de Tlemcen
Encadreur	Dr MALEK Ali	Directeur de Recherche	CDER Bouzareah
Examineur	Dr BELHAMEL Maiouf	Directeur de Recherche	CDER Bouzareah
Examineur	Pr BIBI-TRIKI Nasr-Eddine	Professeur	Université de Tlemcen
Examineur	Pr HADDADI Mourad	Professeur	Ecole Nationale Polytechnique

Année Universitaire : 2011-2012

ملخص:

هذا العمل يقدم دراسة إحصائية للشعاع الشامل و الشعاع المنثور على سطح مائل في منطقة بوزريعة (الجزائر العاصمة) على خط عرض (36.8°) . حساب الشعاع المنثور يكون حسب خمسة نماذج: النموذج الأول و هو نموذج موحد الخواص للجيل الأول و النموذجين هاي و راندل من الجيل الثاني و نموذجين من الجيل الثالث و هما نموذجا قيمار و بيراز. يتم تقييم النماذج بالطريقة البيانية و الإحصائية. نموذج بيراز يقدم احسن النتائج ويمثل الشعاع المباشر اهم اسباب اخطاء الحساب.

الكلمات الرئيسية: الشعاع الشامل، الشعاع المنثور المباشر، سطح مائل ، نموذج موحد الخواص، نموذج هاي، نموذج راندل، نموذج قيمار ، نموذج بيراز

Résumé

Ce travail présente une étude statistique des valeurs des rayonnements Diffus et Global mesurées et calculées sur un plan incliné à la latitude du lieu à Bouzaréah (36.8°). Pour le calcul du rayonnement diffus sur plan incliné cinq modèles ont été choisis ; le modèle isotrope de la première génération, le modèle de Hay et le modèle de Reindl de la deuxième génération et le modèle de Gueymard et le modèle de Perez de la troisième génération. Les modèles sont évalués sur une base graphique et statistique. Les meilleurs résultats sont obtenus par le modèle de Perez. Les erreurs de calcul sont engendrées essentiellement par l'estimation du rayonnement direct sur plan incliné

Mots clés : rayonnement Global, diffus, direct plan incline, modèle isotrope, modèle de Hay, modèle de Reindl, modèle de Gueymard, modèle de Perez.

Abstract

This work presents a statistical study of values of Global and Diffuse radiation wich measured and calculated on a inclined plane at the latitude of Bouzaréah (36.8°). For the calculation of diffuse radiation on inclined plane five models were selected, the isotropic model of the first generation; Hay and Reindl models for the second generation models and the Gueymard and Perez models of the third generation. The models are assessed on a graphical and statistical. The best results are obtained by the model of Perez. Calculation errors are caused mainly by the estimate of direct radiation on inclined surface.

Keywords: Global radiation, diffuse, direct, inclined plane, isotropic model, Hay model, Reindl model, Gueymard model, Perez model.

Merci au bon dieu tout puissant et miséricordieux

Dédicaces

À la mémoire de mon père

À ma mère qui m'a tant encouragé

À toute ma famille et tous mes amis

À tous ceux qui m'ont aidé pour l'élaboration de ce travail

Samira Chaouchi

Remercîments

Je remercie en premier lieu Monsieur Malek Ali Directeur au Centre de Développement et de Recherches a Bouzareah d'avoir accepté d'encadrer et de diriger cette étude.

Je remercie Monsieur Benyoucef Boumediene Professeur à l'université de Tlemcen de m'avoir accordé l'honneur de présider le jury pour ce mémoire.

Je remercie vivement Messieurs ;Belhamel Maiouf directeur du Centre de Développement des Energies Renouvelables Bouzareah ; Haddadi Mourad Professeur a l'Ecole Nationale Polytechnique ;Bibi-Triki Nasr-Eddine Professeur a l'Université de Tlemcen pour avoir accepté d'examiner ce travail et de participer au jury .

J'exprime toute ma gratitude à tous les enseignants de l'Ecole doctorale <<Energies Renouvelables >>

Je tiens à remercier en particulier Monsieur M'Raoui Abdelhamid Chercheur au centre de Développement des Energies Renouvelables de Bouzareah pour son aide précieuse et pour tous ses conseils.

LISTE DES FIGURES

	Page
.Figure 1. Distance Terre -Soleil	14
.Figure 2 Moyenne annuelle du Rayonnement solaire journalier sur un plan horizontal [41]	15
Figure 3 . Latitude. Longitude [45]	16
Figure 4. Les coordonnées horaires [42]	19
Figure 5 . Déclinaison solaire	19
Figure 6. Angle horaire du soleil [43]	21
Figure 7.Les coordonnées Horizontales [42].....	22
Figure 8. Hauteur angulaire; azimut du soleil [44].....	23
Figure 9. Couches de l'atmosphère [46].....	24
Figure 10 .Trajet du Rayonnement solaire	25
Figure 11. Eclaircissement spectral du rayonnement solaire [1][47]	26
Figure 12 .Rayonnement Direct	27
Figure 13. Rayonnement Diffus [2].....	28
Figure 14. L'éclipse solaire totale mettant en évidence le rayonnement diffus de la couronne solaire [48].....	28
Figure 15. Rayonnement Global [49].....	30
Figure 16. Le rayonnement direct sur une surface inclinée.....	34
Figure 17 .Station radiométrique du CDER de Bouzareah	43
Figure 18 .Pyranomètre qui mesure du rayonnement global sur plan horizontal.....	44
Figure 19. Pyranomètre pour la mesure du rayonnement global sur plan incliné. CDER de Bouzareah.....	44
Figure 20. Fréquence du rayonnement diffus.....	47
Figure 21. Rayonnement diffus selon le modèle Isotropique en fonction du rayonnement diffus mesuré	48
Figure 22. Rayonnement diffus selon le modèle de Hay en fonction du rayonnement diffus mesuré.....	48
Figure 23 . Rayonnement diffus selon le modèle de Reindl en fonction du rayonnement diffus mesuré.....	49
Figure 24. Rayonnement diffus selon le modèle de Gueymard en fonction du rayonnement diffus mesuré	49
Figure 25. Rayonnement diffus selon le modèle de Perez en fonction du rayonnement diffus mesuré.....	50
Figure 26. Distribution de l'écart absolu pour les différents modèles en fonction du rayonnement diffus incliné mesuré	51
Figure 27. Distribution de l'écart relatif sur le calcul du rayonnement diffus en fonction du rayonnement diffus mesuré	52
Figure 28. Fréquence du rayonnement global incliné mesuré en fonction de celui-ci.....	53
Figure 29. Rayonnement global incliné calculé selon le modèle Isotropique en fonction de celui mesuré.....	54

Figure 30 Rayonnement global incliné calculé selon le modèle de Hay en fonction de celui mesuré.....	55
Figure 31 .Rayonnement global incliné calculé selon le modèle de Reindl en fonction de celui mesuré.....	55
Figure 32 .Rayonnement global incliné calculé selon le modèle de Gueymard en fonction de celui mesuré.....	56
Figure 33. Rayonnement global incliné calculé selon le modèle de Perez en fonction de celui mesuré.....	56
Figure 34. Distribution de l'écart en fonction de l'intensité du rayonnement Global.....	57
Figure 35 . Distribution de l'écart relatif en fonction de l'intensité du rayonnement Global mesuré.....	58
Figure 36. Rayonnement direct et diffus en fonction du global incliné	59
Figure 37. Écart du calcul du rayonnement direct calculé et mesuré en fonction de l'intensité du global incliné	60
Figure 38 . Écart de calcul du rayonnement direct calculé et mesuré en fonction de son intensité.....	61
Figure 39. Fréquence du rayonnement direct en fonction de son intensité	61

NOMENCLATURE

Symboles

a	Azimut du soleil (deg)
C	Coefficient de diffusion du ciel.
D_0	Distance moyenne Terre-Soleil (km)
D	Distance Terre-Soleil (km)
E	Equation du temps (minutes)
F, F'	Fonctions de modulation
f	Racine carrée du rapport du rayonnement direct à celui du rayonnement Global
$I_0=1367(W/m^2)$	Constante solaire
I_{ex}	Rayonnement reçu par la Terre (W/m^2)
I_b	Rayonnement direct sur plan horizontal (W/m^2)
I_{bn}	Rayonnement direct sur un plan normal (W/m^2)
I_{bne}	Rayonnement direct normal hors atmosphère (W/m^2)
I_d	Rayonnement diffus sur plan horizontal (W/m^2)
I_G	Rayonnement Global sur plan horizontal (W/m^2)
I_r	Rayonnement réfléchi sur plan horizontal (W/m^2)
$I_b(\beta)$	Rayonnement direct sur plan incliné (W/m^2)
$I_d(\beta)$	Rayonnement diffus sur plan incliné (W/m^2)
$I_G(\beta)$	Rayonnement Global sur plan incliné (W/m^2)
$I_r(\beta)$	Rayonnement réfléchi sur plan incliné (W/m^2)

NOMENCLATURE

m	Masse d'air optique
R_b	Rapport entre le rayonnement direct sur un plan incliné à celui du plan horizontal
r_b	Rapport entre le rayonnement direct journalier sur un plan incliné à celui plan horizontal
r_d	Rapport entre le rayonnement diffus sur un plan incliné à celui du plan horizontal
$\omega=AH$	Angle Horaire (deg)
δ	Déclinaison (deg)
γ	Angle azimutal du plan récepteur (deg)
φ	Latitude (deg)
λ	Longitude (deg)
h	Hauteur du soleil (deg)
Δt	Equation du temps (minutes)
β	Inclinaison de la surface réceptrice (deg)
ε	Indice de clarté
θ_i	Angle d'incidence (deg)
θ_z	L'angle zénital du soleil (deg)
ρ	Valeur albédo du sol pour le rayonnement réfléchi
Δ	La luminosité

Abréviations

TSL	Temps solaire local (heures)
TSV	Temps solaire vrai (heures)
TU	Temps universel (heures)

TABLE DES MATIERES

	Page
LISTE DES FIGURES.....	4
NOMENCLATURE	6
TABLE DES MATIERES	8
INTRODUCTION GENERALE.....	11
CHAPITRE 1 : NOTIONS D'ASTRONOMIE	13
1.1 L'énergie solaire.....	13
1.1.1 Introduction	13
1.1.2 Le Soleil.....	13
1.1.3 Distance Terre-Soleil.....	13
1.1.4 Le rayonnement hors atmosphère-Constante solaire.....	14
1.1.5 Gisement solaire mondial	15
1.1.6 Rayonnement solaire reçu par la terre	15
1.2 Repérage d'un point sur la surface de la terre	16
1.2.1 La longitude.....	16
1.2.2 La latitude	16
1.3 Equation du temps.....	17
1.3.1 Temps universel.....	17
1.3.2 Temps solaire local.....	17
1.3.3 Temps solaire vrai	17
1.3.4 Equation du temps	17
1.4 Les coordonnées horaires.....	18
1.4.1 La déclinaison solaire	19
1.4.2 L'angle horaire solaire	20
1.5 Les coordonnées Horizontales	21
1.5.1 Hauteur angulaire solaire.....	22

1.5.2	Azimut solaire	22
1.6	Conclusion	23
CHAPITRE 2 : ESTIMATION DU RAYONNEMENT SOLAIRE.....		24
2.1	Atmosphère	24
2.2	Masse atmosphérique.....	24
2.3	L'extinction atmosphérique du rayonnement solaire	25
2.4	Rayonnement solaire au sol	27
2.4.1	Le rayonnement direct I_b	27
2.4.2	Le rayonnement diffus I_d	27
2.4.3	Le rayonnement réfléchi I_r	29
2.4.4	Le rayonnement Global I_G	29
2.4.4.1	<i>Rayonnement Global sur une surface horizontale</i>	<i>29</i>
2.4.4.2	<i>Le rayonnement Global sur une surface inclinée :</i>	<i>30</i>
2.5	Appareils de mesures du rayonnement solaire :.....	31
2.5.1	L'héliographe de Campbell-Stockes	31
2.5.2	Le Pyranomètre :	31
2.5.3	Le Pyrhéliomètre	32
2.5.4	Le Spectroradiomètre :	32
2.5.5	L'Albedomètre :	32
2.6	Conclusion	32
CHAPITRE 3 : ETUDE DES MODELES STATISTIQUES DU RAYONNEMENT GLOBAL.....		33
3.1	Introduction	33
3.2	Estimation du Rayonnement solaire sur une surface.....	33
3.2.1	Rayonnement direct.....	34
3.2.2	Rayonnement diffus du ciel.....	35
3.2.2.1	<i>Modèles de Première génération.....</i>	<i>35</i>
a.	<i>Modèle isotrope.....</i>	<i>35</i>
b.	<i>Modèle circumsolaire</i>	<i>35</i>

3.2.2.2 Modèles de seconde génération:	36
a. <i>Modèle Temps-Coulson</i>	36
b. <i>Modèle de Klucher</i>	36
c. <i>Modèle de Hay</i>	37
d. <i>Modèle de Reindl</i>	37
3.2.2.3 Modèles de troisième génération.....	37
a. <i>Modèle de Gueymard</i>	37
b. <i>Modèle de Perez</i>	39
3.2.3 Rayonnement Réfléchi	40
3.2.4 Rayonnement Global	41
3.3 Conclusion	41
CHAPITRE 4 : RESULTATS ET PERFORMANCE DES MODELES	42
4.1 Introduction	42
4.2 Mesures.....	42
4.3 Etude des modèles.....	45
4.4 Exploitation et comparaison des résultats pour les différents modèles :	46
4.4.1 Comparaison du Rayonnement diffus estimé selon les modèles avec le rayonnement diffus mesuré	47
4.4.2 Comparaison du Rayonnement global estimé avec le rayonnement global mesuré.	53
4.4.3 Comparaison du rayonnement Direct et Diffus en fonction du rayonnement Global incliné	59
4.4.4 Comparaison du rayonnement direct estimé et mesure	59
4.5 Conclusion	62
CONCLUSION GENERALE.....	63
REFERENCES	65
ANNEXE1 - PROGRAMME DE CALCUL DU RAYONNEMENT INCLINE.....	
ANNEXE 2 : PROGRAMME POUR LE CALCUL D'ERREURS	

INTRODUCTION GENERALE

L'épuisement des ressources énergétiques fossiles est inévitable devant la forte consommation énergétique mondiale. D'où la nécessité de trouver de nouvelles sources d'énergie. Les principales sources d'énergie renouvelables sont le soleil, le vent, la biomasse, les marées, les vagues des mers et des océans et la chaleur des profondeurs de la terre. Les avantages des énergies renouvelables sont nombreuses; la durabilité, la disponibilité et la propreté mais l'inconvénient majeur reste le coût initial très élevé pour l'installation du matériel de conversion. [1] [3]

Parmi ces sources, l'énergie solaire arrive au sommet de la liste en raison de son abondance, et également par sa distribution dans la nature plus que tous les autres types d'énergie renouvelables. En effet la terre reçoit du soleil une énergie équivalente à 5000 fois les besoins mondiaux, c'est donc un fort potentiel et une solution pratique devant les défis de plus en plus croissants dans le domaine énergétique et environnemental. C'est là un objectif principal urgent et commun à toute l'humanité afin de préserver un environnement sain pour les générations futures.

De nombreuses études ont été faites sur le rayonnement solaire reçu au sol afin de développer les techniques de conversion et de minimiser le coût du matériel pour une exploitation optimale.

Le développement des applications de l'énergie solaire nécessite des données de longue durée sur l'irradiation solaire. La disponibilité et la qualité de ces données sont obtenues dans les régions munies de stations radiométriques; ces dernières mesurent les paramètres météorologiques, la durée d'insolation et l'irradiation solaire. Les rayonnements solaires globaux directs et diffus qui sont mesurés essentiellement sur un plan horizontal. Ces mesures nous permettent d'estimer le rayonnement sur des plans à différents angles d'inclinaison et angles azimutaux en utilisant les modèles statistiques.

Les modèles statistiques sont élaborés en fonction des données disponibles. La durée d'insolation a été la première donnée exploitée vue la facilité de sa disponibilité et les premiers

modèles sont fonction de la durée d'insolation type équation d'Angstrom (1924). Le rayonnement global est la donnée essentielle pour les conceptions des systèmes solaires

Les modèles prédisant le rayonnement global à différentes positions utilisent presque les mêmes équations. La différence principale réside dans l'estimation du rayonnement diffus.

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 des notions astronomiques.

Le deuxième chapitre est consacré à l'estimation du rayonnement solaire après sa traversée de l'atmosphère et des différents appareils de mesures utilisés.

Le troisième chapitre présente les différents modèles statistiques. Les modèles choisis pour cette étude sont des modèles les plus cités dans la littérature :

- ✓ Le modèle Isotropique ou modèle de Liu et Jordan de la première génération,
- ✓ le modèle de Hay et le modèle de Reindel considérés de la seconde génération
- ✓ Le modèle de Gueymard et le modèle de Perez de la troisième génération.

Le rayonnement global sur un plan incliné est la somme du rayonnement direct calculé par la méthode géométrique ; du rayonnement réfléchi Isotropique calculé avec une valeur albédo constante et du rayonnement diffus du ciel calculé par les différents modèles statistiques cités ci-dessus.

Le quatrième chapitre et le dernier est consacré à la présentation du matériel de mesure et à l'exploitation des résultats.

Enfin une comparaison des résultats expérimentaux avec ceux qui sont prédits par les différents modèles et une évaluation des modèles sur une base graphique et statistique

CHAPITRE 1 : NOTIONS D'ASTRONOMIE

1.1 L'énergie solaire

1.1.1 Introduction

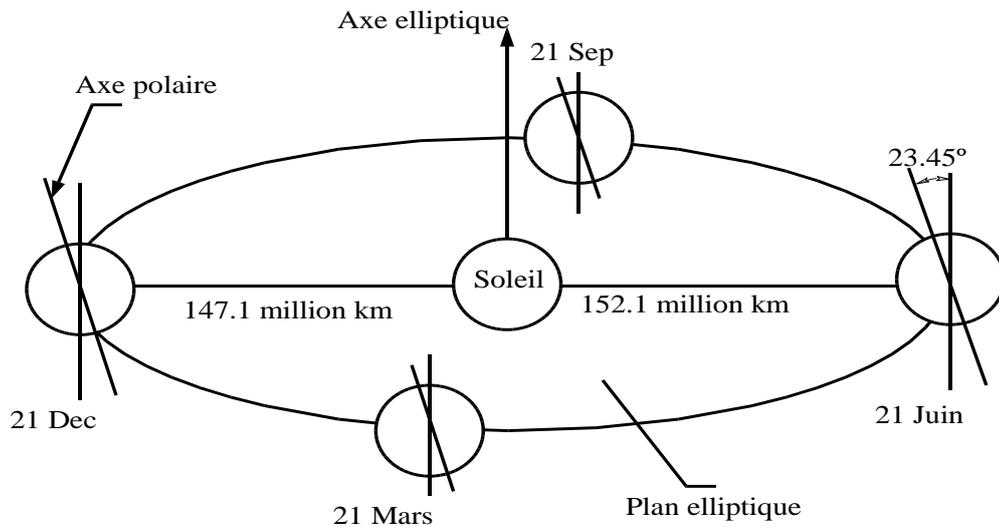
Le soleil est la source essentielle de tout rayonnement reçu par la terre, ce dernier lui procure l'énergie, la chaleur et la lumière qui sont nécessaires à toute forme de vie. La connaissance de la trajectoire du soleil et sa position en chaque point du ciel et la distance terre –soleil sont nécessaires quand à la détermination de la quantité du rayonnement extraterrestre et la durée du jour.

1.1.2 Le Soleil

Le soleil est une sphère gazeuse de $1,392 \cdot 10^9 m$ de diamètre ; c'est une étoile résultant de la condensation d'un nuage interstellaire sous l'effet de la gravité. Ce type de nuage est essentiellement composé d'hydrogène, d'hélium, et dans une moindre mesure de carbone, d'azote et d'autres éléments. Le noyau du Soleil ($400.000 Km$ de diamètre) à une température de l'ordre de $15 \cdot 10^6$ à $16 \cdot 10^6 K$ et agit comme un réacteur thermonucléaire. Les réactions de fusion nucléaire y transforment l'hydrogène en Hélium en libérant $4 \cdot 10^9$ kg/s d'énergie de masse selon la célèbre équation d'Einstein : $E = mc^2$ [1][2] [3]

1.1.3 Distance Terre-Soleil

Le soleil est situé à une distance moyenne de $149\,598\,000$ km de la terre .Cette distance varie peu au cours de l'année (+/- 1.65 %) car l'excentricité de l'orbite terrestre est peu accentuée ($e = 0.017$), d'où la terre suit une révolution elliptique autour du soleil (en réalité elle est légèrement circulaire) .La période de révolution est définie a une année .L'angle entre l'axe de rotation de la terre et le plan écliptique est de 66.55° , ce qui donne un angle de 23.45° entre l'équateur et le plan de l'écliptique[1] [2]



.Figure 1. Distance Terre -Soleil

1.1.4 Le rayonnement hors atmosphère-Constante solaire

La variation de la distance terre soleil conduit néanmoins à des variations d'éclairement de 6.7 % au bénéfice de l'hiver. On estime par ailleurs qu'entre les périodes calmes et les périodes de grandes éruptions solaires, la variation d'intensité ne dépasse pas 4 %. Le rayonnement solaire incident sur la surface de la terre appelé généralement insolation, est mesuré comme énergie par unité de temps et unité de surface (ou puissance par unité de surface). Les unités les plus communes sont le Watt par mètre carré (W/m^2).

La quantité de radiation solaire reçue sur une surface normale hors de l'atmosphère terrestre à la distance moyenne D_0 entre la terre et le soleil est appelé constante solaire I_0 . La constante solaire peut être calculée à partir de la température de surface du soleil. Celle-ci est estimée à $T=5\ 780\ ^\circ K$ [2], [3]

Loi de Stephan

$$\sigma T^4 \cdot 4\pi R_s^2 = I_0 4\pi D_0^2 \quad (1)$$

Avec R_s : rayon du soleil ; D_0 distance moyenne terre –Soleil d'où

$$I_0 = \sigma \left(\frac{R_s}{D_0} \right)^2 T^4 \quad (2)$$

La valeur de cette constante est $1366\ W/m^2$ (selon la norme ASTM E490-00a).

Mesurée par la NASA cette constante a pour valeur $I_0=1367\ (W /m^2)$ [2]

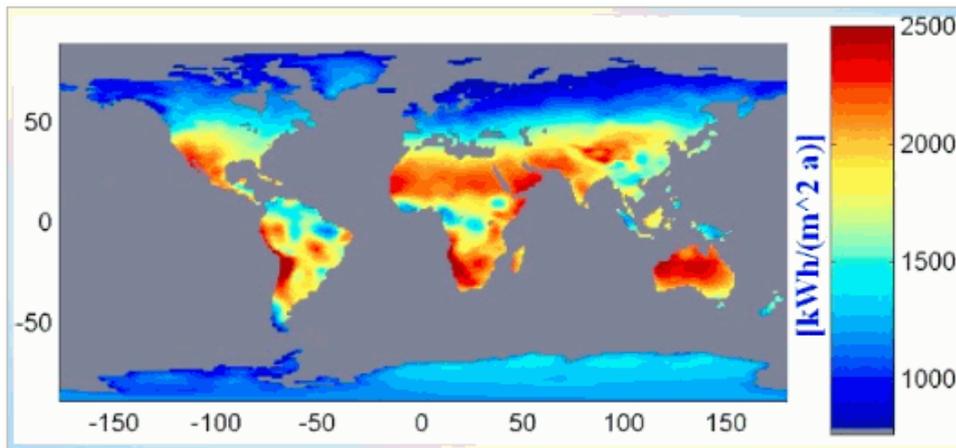
La valeur admise depuis 2008 est égale à $1\,360,8 \pm 0,5 \text{ W/m}^2$

Les unités les plus communes pour la mesure de l'insolation, rayonnement solaire à la surface de la terre (Énergie par unité de temps et unité de surface), sont Watt par mètre carré (W/m^2)

1.1.5 Gisement solaire mondial

L'énergie solaire reçue est inégalement répartie dans le monde. Dans les régions les plus chaudes du globe, l'ensoleillement annuel peut atteindre $2\,300 \text{ kWh/m}^2\cdot\text{an}$ (Energie reçue par une surface de 1 m^2 pendant une année). En Europe centrale l'ensoleillement moyen est de $1100 \text{ kWh/m}^2\cdot\text{an}$.

L'Algérie a un gisement solaire de plus de $2000 \text{ kWh/m}^2\cdot\text{an}$.



.Figure 2 Moyenne annuelle du Rayonnement solaire journalier sur un plan horizontal [41]

1.1.6 Rayonnement solaire reçu par la terre

La distance terre soleil change durant l'année, le minimum 1.4710^{11}m au solstice d'hiver (21 décembre) et le maximum de $1.521\,10^{11}\text{m}$ au solstice d'été (21 juin). De ce fait, la quantité de rayonnement solaire I_{ex} interceptée par la terre varie dans l'année, le maximum est au solstice d'été, l'équation décrivant cette variation est : [1][2]

$$I_{ex} = I_0 \left(\frac{D}{D_0} \right)^2 \quad (\text{W/m}^2) \quad (3)$$

$$\left(\frac{D}{D_0} \right)^2 = 1.00011 + 0.034221 \cos(x) + 0.00128 \sin(x) + 0.000719 \cos(2x) + 0.000077 \sin(2x) \quad (4)$$

$$x = 360(n-1) / 365 \quad (n=1 \text{ pour le premier janvier})$$

La formule approximative suivante peut être utilisée sans introduire trop de pertes dans la précision des détails :

$$I_{ex} = I_0(1 + 0.034 \cos(360n/365.25)) \quad (5)$$

1.2 Repérage d'un point sur la surface de la terre

Un point à la surface de la terre est repéré par deux coordonnées angulaires, la latitude et la longitude.

1.2.1 La longitude

La longitude (λ) mesure de l'angle entre le méridien du lieu et le méridien origine des longitudes (Greenwich) Le méridien de Greenwich est un méridien où la longitude est définie comme égale à 0. Les lieux qui sont situés à l'Est sont comptés avec le signe +. Il y a vingt trois méridiens séparés de 15° donnant naissance aux 24 fuseaux horaires

1.2.2 La latitude

La latitude (φ) permet de repérer la distance angulaire d'un point quelconque par rapport à l'équateur. Elle varie de 0° à l'équateur à 90° au pôle Nord

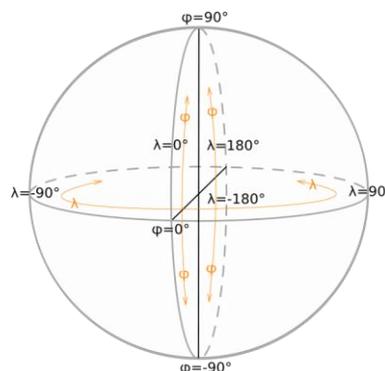


Figure 3 . Latitude. Longitude [45]

1.3 Equation du temps

1.3.1 Temps universel

Le temps universel (TU) est défini par l'heure de passage du soleil au méridien origine

1.3.2 Temps solaire local

La différence entre temps solaire local et temps universel est appelée correction de longitude

La correction de longitude est donnée par la formule

$$TSL = TU + \frac{\lambda}{15}$$

1.3.3 Temps solaire vrai

C'est le temps solaire local corrigé de l'équation du temps, donnée astronomique universelle liée à l'excentricité de l'orbite de la terre autour du soleil [2] [43]

$$TSV = TSL + \Delta t$$

Pour un lieu de longitude, il existe une correspondance directe entre angle horaire AH le temps solaire vrai TSV, le temps solaire local TSL et le temps universel TU tel que :

$$AH = 15(TSV - 12) \tag{6}$$

$$TSV = TSL + \Delta t \tag{7}$$

$$TSL = TU + \frac{\lambda}{15} \tag{8}$$

$$AH = 15\left(TU + \frac{\lambda}{15} + \Delta t - 12\right) \tag{9}$$

1.3.4 Equation du temps

L'expérience montre que les passages du soleil dans le plan méridien d'un lieu donné ne se succèdent pas avec exactement 24h d'intervalle et le midi vrai peut atteindre une avance de 16mn ou un retard de 14mn par rapport à 12h selon l'époque de l'année. [2] [43]

Deux facteurs interviennent dans cette variation :

Le premier facteur est dû l'excentricité de l'ellipse que décrit la terre autour du soleil, il résulte, d'après la loi de Kepler (loi des aires) que la vitesse orbitale au périhélie (Décembre)

est plus grande qu'à l'aphélie (Juin). La variation saisonnière de la vitesse orbitale de la terre affecte l'heure de passage du soleil au méridien.

Le deuxième facteur est l'inclinaison de l'axe de rotation de la Terre par rapport au plan de l'écliptique qui introduit une oscillation supplémentaire de la durée du jour solaire, un jour de novembre étant plus long d'une demi-minute qu'un jour de Mars.

L'écart Δt entre temps solaire local (TSL) et temps solaire vrai (TSV) est désigné sous le terme d'équation du temps.

En outre, le mouvement de la Terre dissipant de l'énergie au détriment de son énergie cinétique, celle-ci ralentit, et des mesures précises ont constaté qu'entre 1900 et 1974, la terre a accumulé 44 secondes de retard dans sa rotation annuelle, ce qui signifie que la durée du jour moyen augmente de 1,6 s par an.

L'expression de l'équation du temps proposée est: [1] [2]

$$E = (9.87 \sin(2B) - 7.35 \cos(B) - 1.5 \sin(B)) \quad (\text{En minute}) \quad (10)$$

L'angle B est défini en fonction du jour de l'année n

$$\text{Avec: } B = 360 \frac{(n - 81)}{365}$$

1.4 Les coordonnées horaires

Le déplacement des astres du fait du mouvement diurne rend intéressante l'utilisation du 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.

On appelle angle horaire de l'astre M l'angle de son cercle horaire et du demi-méridien contenant le zénith : c'est l'angle au centre $H = EOM$ ou l'arc Em de l'équateur. Il est compté positivement de 0 à 360° à partir de E et dans le sens rétrograde.(fig4)

On appelle déclinaison de l'astre M l'angle formé par la direction de M et l'équateur c'est l'angle au centre $\delta = mOM$ ou l'arc mM du cercle horaire. On la compte à partir de l'équateur de 0 à + 90° vers le pôle nord et de 0 à - 90° vers le pôle sud. Au cours du

mouvement diurne l'astre M décrit un petit cercle de la sphère céleste parallèle à l'équateur, donc sa déclinaison ne varie pas. (fig4)

Les coordonnées horaires sont bien adaptées à la représentation du mouvement diurne ; mais leur mesure est moins précise que celle des coordonnées horizontales, la direction de la ligne des pôles étant plus difficile à déterminer avec précision que celle de la verticale.

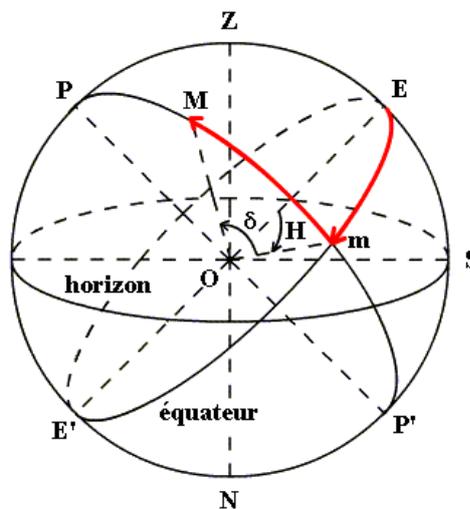


Figure 4. Les coordonnées horaires [42]

1.4.1 La déclinaison solaire

La déclinaison solaire est l'angle formé par la direction du soleil et le plan équatorial terrestre. Cet angle varie au cours des saisons.

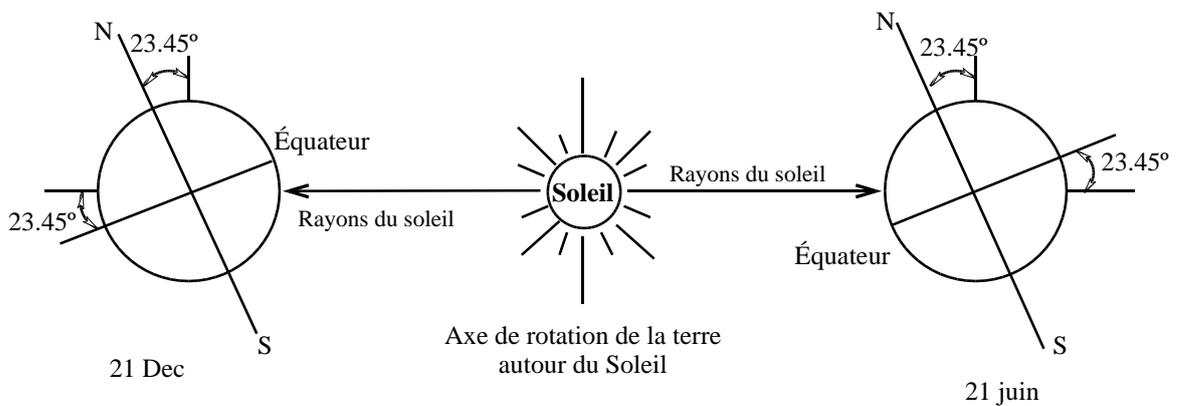


Figure 5 . Déclinaison solaire

Equinoxe de printemps :	21 Mars	$\delta = 0$
Solstice d'été :	22 Juin	$\delta = + 23^{\circ} 27'$
Equinoxe d'automne :	23 Septembre	$\delta = 0$
Solstice d'hiver :	22 Décembre	$\delta = - 23^{\circ} 27'$
Approche maximale :	Périhélie	2 Janvier
Approche minimale :	Aphélie	2 Juillet

Entre ces 4 points remarquables δ prend toutes les valeurs intermédiaires qui peuvent se calculer par la relation :

$$\sin \delta = 0.4 \sin t \quad \text{où} \quad t = N \cdot \frac{360}{365} \quad (11)$$

avec N, nombre de jours écoulés depuis l'équinoxe de printemps

Ou par l'équation de Cooper (1969), [2] [43]

$$\delta = 23.45 \sin\left(360 \frac{284 + n}{365}\right) \quad (\text{En degrés}) \quad (12)$$

Avec n nombre de jours écoulés depuis le 1er Janvier.

La déclinaison étant une fonction sinusoïdale, elle varie rapidement au voisinage des Équinoxes (0.4 degré / jour) alors qu'elle est pratiquement stationnaire durant les périodes qui encadrent les solstices d'été et d'hiver.

1.4.2 L'angle horaire solaire

L'angle horaire ω (encore noté AH) du soleil est déterminé par la rotation diurne de la terre autour de son axe. C'est la mesure de l'arc de trajectoire solaire compris entre le soleil et le plan méridien du lieu. Exprimé en degrés.

$$\omega = 15(\text{TSV} - 12) \quad (13)$$

Où TSV est le temps solaire vrai exprimé en heures.

A chaque heure qui s'écoule correspond une augmentation de l'angle horaire de 15° , soit encore 4mn de temps par degré de longitude

A la latitude de 45° , une mn de temps représente environ 20 km, 11 km au cercle polaire et 28 km à l'équateur.

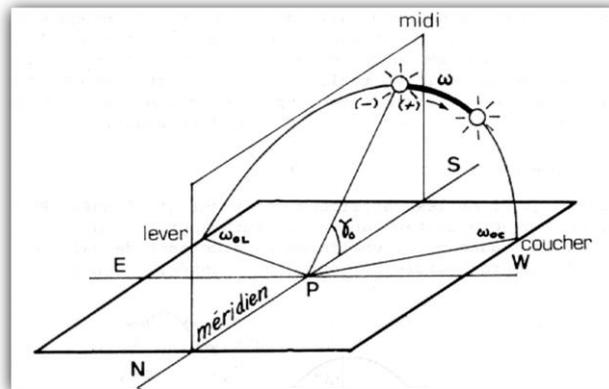


Figure 6. Angle horaire du soleil [43]

1.5 Les coordonnées Horizontales

Le plan fondamental est l'horizon astronomique ; la perpendiculaire en 0 à ce plan est verticale nadir-zénith (NZ).

Soit un astre M. Le demi plan passant par la droite NZ et l'astre M s'appelle le vertical de l'astre M ; il coupe la sphère céleste suivant le demi grand cercle NMZ et le grand cercle horizon en m. Sur ce grand cercle horizon la direction OS du sud est déterminée (Voir sphère céleste).

On appelle azimut de M l'angle $a = SOm$ ou l'arc Sm ; il se compte de 0 à 360° dans le sens rétrograde, c'est à dire dans le sens du mouvement diurne. Tous les astres situés sur un même vertical ont même azimut.

On appelle hauteur de l'astre M l'angle $h = mOM$ ou l'arc mM du vertical. Les hauteurs se comptent à partir de l'horizon, de 0 à + 90° vers le zénith si M se trouve au-dessus de l'horizon, de 0 à - 90° vers le nadir si M est au-dessous. a et h sont les coordonnées horizontales locales de M.

On remplace quelquefois h par son complément algébrique, la distance zénithale z .Dans tous les cas on a : $h + z = 90^\circ$.(fig7)

Ces coordonnées se mesurent facilement et avec précision mais varient avec le lieu d'observation et pour un lieu donné varient d'un instant à l'autre (a varie de 360° en 24 h).

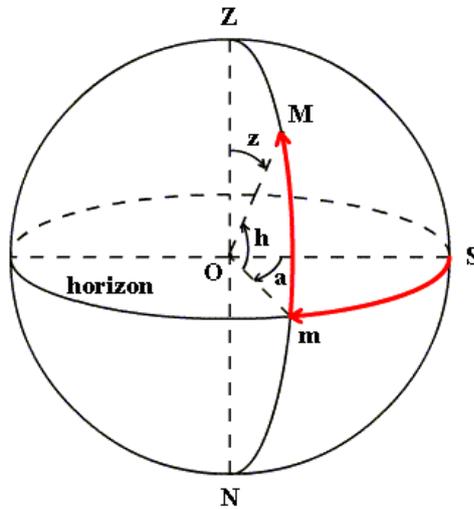


Figure 7. Les coordonnées Horizontales [42]

1.5.1 Hauteur angulaire solaire

C'est l'angle (h) formé par le plan horizontal au lieu d'observation et la direction du soleil.

Il est donné par la relation: [2]

$$\sinh = \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos \omega \quad (14)$$

φ , δ et ω sont respectivement la latitude du lieu, la déclinaison du soleil et l'angle horaire. De la hauteur h, on peut déduire les heures de lever et de coucher de soleil.(fig8)

1.5.2 Azimut solaire

La position du soleil est exprimée en fonction de l'angle azimut solaire a , l'angle que fait la projection de la direction du soleil avec la direction du sud, cet angle est mesuré positivement vers l'ouest. (fig8)

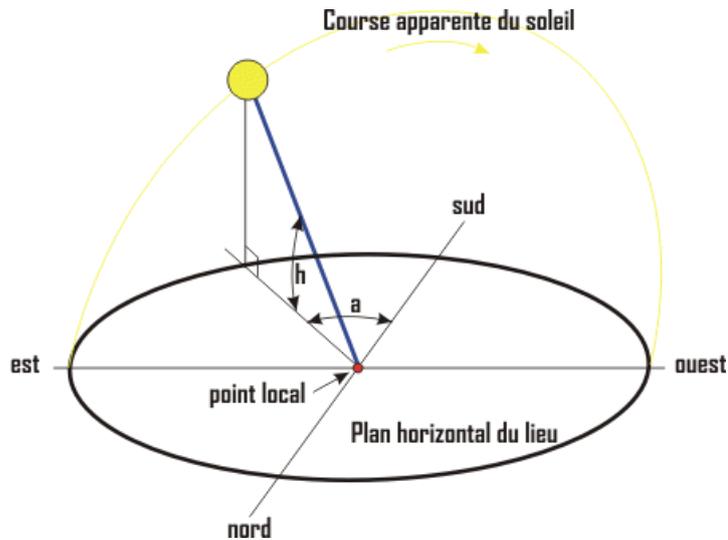


Figure 8. Hauteur angulaire; azimut du soleil [44]

Relation entre l'azimut, l'angle horaire, la hauteur et la déclinaison

$$\sin a = \frac{\cos \delta \sin \omega}{\cosh} \quad (15)$$

1.6 Conclusion

La connaissance des mouvements et des positions du soleil pour un observateur terrestre, permet de mettre à jour les principales spécificités d'ensoleillement et de ressources solaires d'un site.

L'estimation du rayonnement solaire reçu sur la terre nécessite des informations précises sur les paramètres météorologiques dans un lieu donné. Ces paramètres sont mesurés par des stations radiométriques.

Une base de données typique comprend les mesures du rayonnement solaire global, rayonnement direct et rayonnement diffus, la durée d'ensoleillement et des données complémentaires comme la couverture nuageuse, la turbidité atmosphérique, l'humidité, température, etc

Estimation du rayonnement solaire reçu au sol et les différents appareils feront l'objet du prochain chapitre.

CHAPITRE 2 : ESTIMATION DU RAYONNEMENT SOLAIRE

2.1 Atmosphère

L'atmosphère terrestre est l'enveloppe gazeuse entourant la Terre solide. L'air sec se compose de 78,08 % d'azote, 20,95 % d'oxygène, 0,93 % d'argon, 0,039 % de dioxyde de carbone et des traces d'autres gaz. Les différentes couches atmosphériques, chacune avec ses propriétés physiques forment un véritable filtre naturel pour le rayonnement électromagnétique.

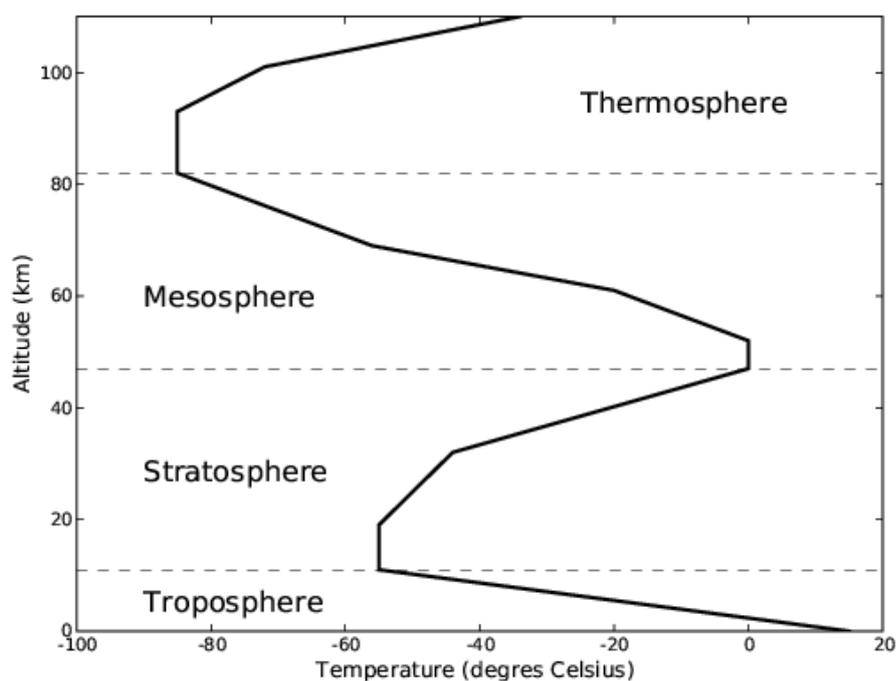


Figure9. Couches de l'atmosphère [46]

2.2 Masse atmosphérique

Le rayonnement solaire est un rayonnement électromagnétique Il est partiellement épuisé et atténué quand il traverse les couches atmosphériques. Hors atmosphère, le rayonnement reçu par la terre varie selon la période de l'année entre 1350 et 1450W/m². Il est ensuite partiellement réfléchi, absorbé et diffusé par les atomes, les molécules, les gaz et tous les

aérosols qui constituent l'atmosphère de telle sorte que le rayonnement reçu au sol comporte une part directe I_b et une part diffuse I_d .

La diffusion et l'absorption du rayonnement solaire dépendent non seulement des constituants de l'atmosphère mais aussi de la longueur parcourue par les rayons lumineux à travers l'atmosphère.

Cette distance est caractérisée par la masse atmosphérique qui est le rapport entre la longueur (L) de cette trajectoire et l'épaisseur verticale moyenne de l'atmosphère. L'angle zénithal θ_z est le complémentaire de la hauteur solaire h .

Pour les angles zénithaux inférieurs à 70° , l'effet de la courbure terrestre est négligeable et on peut donc écrire : [1][2]

$$m = \frac{1}{\cos(\theta_z)} = \frac{1}{\sin(h)} \quad (16)$$

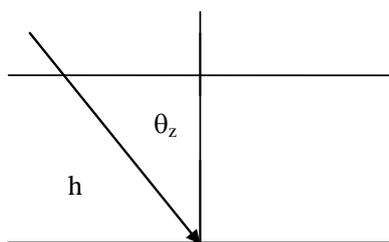


Figure 10 .Trajet du Rayonnement solaire

2.3 L'extinction atmosphérique du rayonnement solaire

L'extinction (ou atténuation) atmosphérique résulte de la superposition de deux processus physiques distincts qui sont l'absorption et la diffusion.

Ces processus s'appliquent aussi bien aux molécules qu'aux aérosols, brumes, brouillards et pluie.

Le type de diffusion est lié au diamètre des particules qui constituent la couche atmosphérique par rapport aux longueurs d'ondes du rayonnement incident.

L'absorption du rayonnement par les molécules atmosphériques est intimement liée à leurs caractéristiques énergétiques. Un photon peut être absorbé lorsque son énergie correspond à une transition entre le niveau fondamental et un des états excités des atomes des composants

CHAPITRE 2 : ESTIMATION DU RAYONNEMENT SOLAIRE

de l'atmosphère, essentiellement les composantes gazeuses telles que la vapeur d'eau H₂O, le gaz carbonique CO₂ et l'oxygène O₂

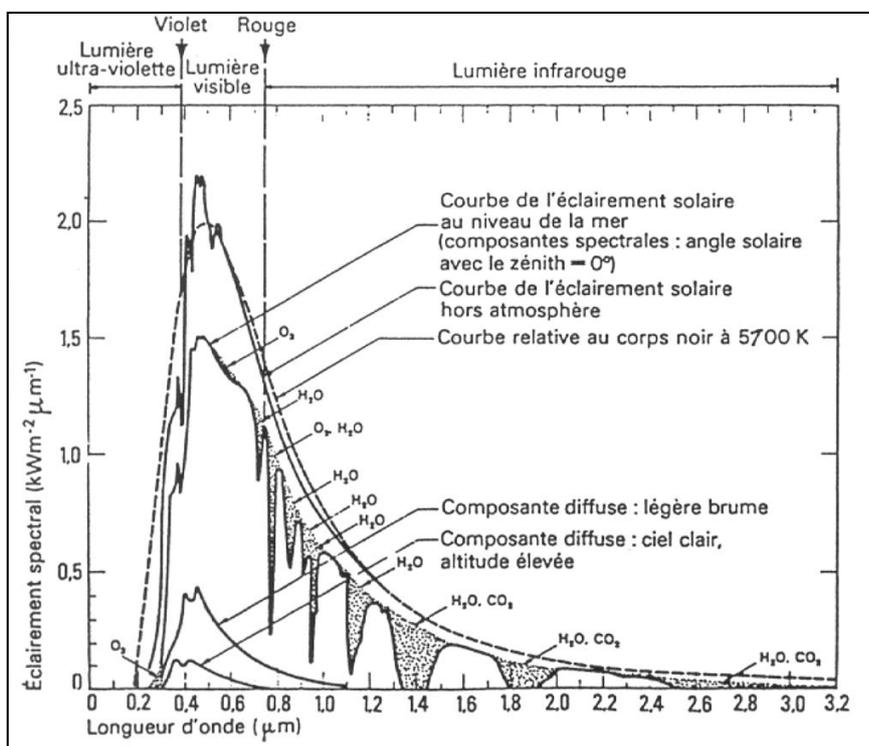


Figure 11. Eclairage spectral du rayonnement solaire [1][47]

Tableau 1. La répartition de cet éclairage énergétique du rayonnement solaire dans divers domaines de longueur d'onde:

Région spectrale	Longueurs d'onde (μm)	Eclairage énergétique (w/m ²)	Pourcentage(%)
infrarouge	>0.70	695	50.8
visible	0.40 à 0.70	559	40.9
UV-A	0.32 à 0.40	86	6.3
UV-B	0.28 à 0.32	21	1.5
UV-C	<0.28	6	0.4

La plus grande partie de l'énergie solaire est rayonnée principalement dans le domaine visible et infrarouge.

2.4 Rayonnement solaire au sol

Le rayonnement solaire au sol a trois composantes: une composante directe I_b et une composante diffuse I_d et une composante réfléchie I_r . [1] [2]

2.4.1 Le rayonnement direct I_b

C'est le rayonnement qui arrive directement du disque solaire au niveau du sol sans subir des modifications.

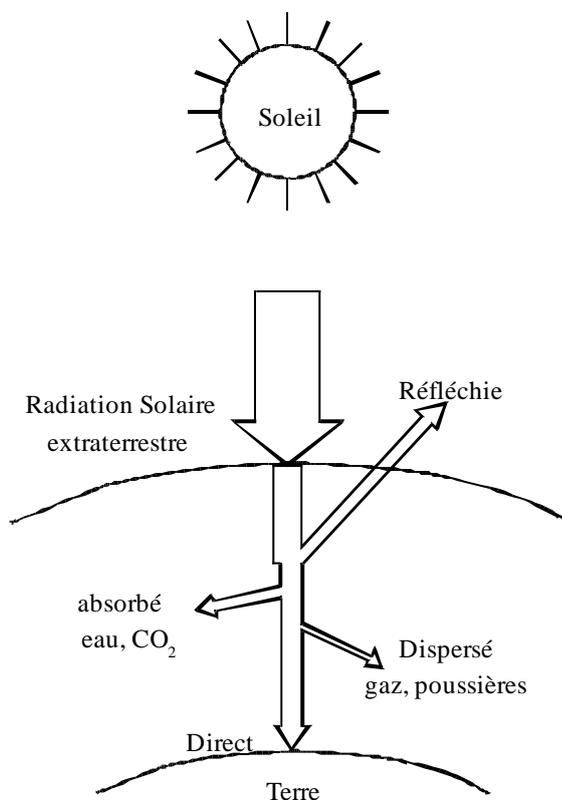


Figure 12 .Rayonnement Direct

2.4.2 Le rayonnement diffus I_d

C'est le rayonnement qui arrive au niveau au sol après avoir subi des collisions avec les constituants atmosphériques [2]

CHAPITRE 2 : ESTIMATION DU RAYONNEMENT SOLAIRE

On en distingue :

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

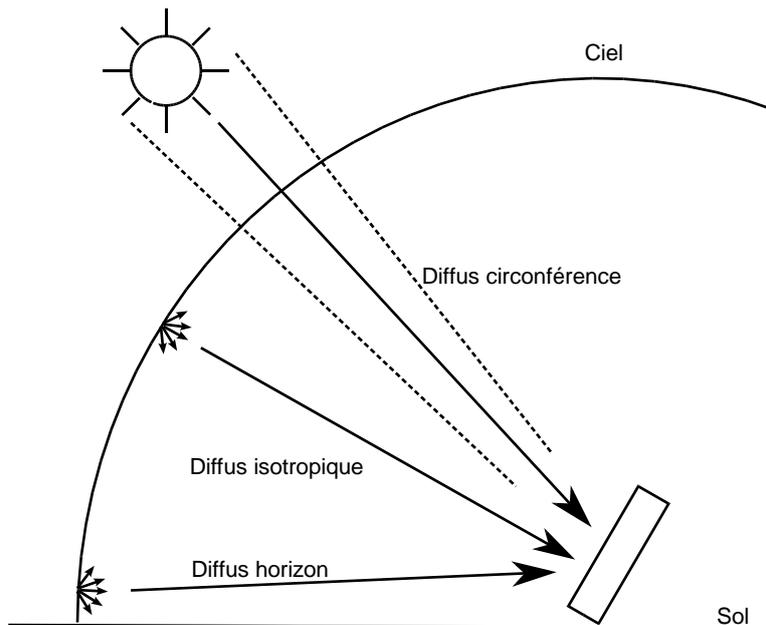


Figure 13. Rayonnement Diffus [2]

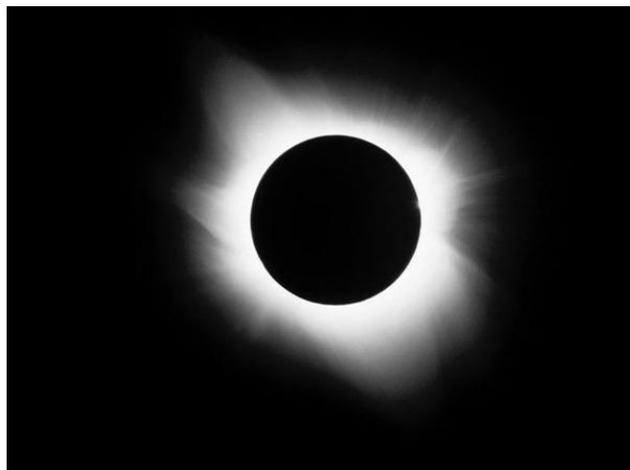


Figure 14. L'éclipse solaire totale mettant en évidence le rayonnement diffus de la couronne solaire [48]

2.4.3 Le rayonnement réfléchi I_r

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.

- sol cultivé 10 à 25%
- neige 60 à 90%
- sable 30 à 40%

Albédo : c'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.

Tableau 2 : Valeurs typiques de L'albédo 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
forêt	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

2.4.4 Le rayonnement Global I_G

2.4.4.1 Rayonnement Global sur une surface horizontale

Pour un rayonnement incident I_b faisant un angle h avec l'horizontale, le rayonnement Global I_G est la somme du rayonnement direct I_b et du rayonnement diffus I_d [1]

CHAPITRE 2 : ESTIMATION DU RAYONNEMENT SOLAIRE

$$I_G = I_b \sin h + I_d \quad (17)$$

Le rayonnement diffus peut être estimé par la relation : [1]

$$I_d = C \times I_b \quad (18)$$

Où C est un coefficient de diffusion du ciel.

Les valeurs de C sont tabulées et sont fonction de paramètres climatiques

2.4.4.2 Le rayonnement Global sur une surface inclinée :

Le rayonnement solaire global $I_G(\beta)$ sur une surface arbitraire ayant une inclinaison β par rapport à l'horizontale et un angle azimutal γ est la somme des composantes directe $I_b(\beta)$, diffuse $I_d(\beta)$ et réfléchi par le sol $I_r(\beta)$ du rayonnement solaire. [1] [2]

$$I_G(\beta) = I_b(\beta) + I_d(\beta) + I_r(\beta) \quad (19)$$

Une étude sera détaillée dans le chapitre 3

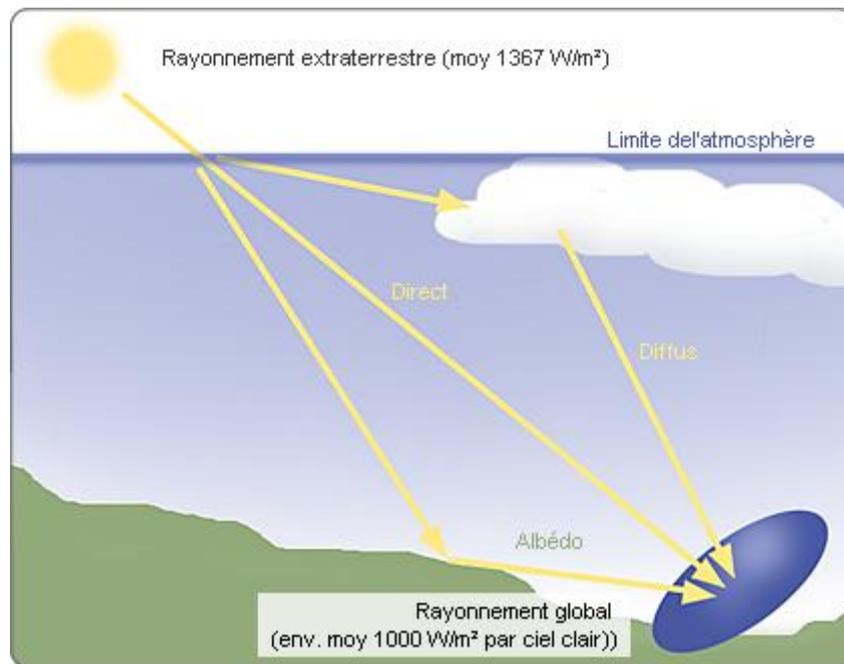


Figure 15. Rayonnement Global [49]

2.5 Appareils de mesures du rayonnement solaire :

2.5.1 L'héliographe de Campbell-Stockes

L'héliographe de Campbell-Stockes permet de mesurer avec une résolution de six minutes la durée d'ensoleillement quotidienne. Le principe consiste à focaliser les rayons solaires (grâce à la sphère en verre centrale) sur le diagramme sans que ce dernier ne s'enflamme. Une règle transparente permet ensuite d'apprécier la longueur de la trace de brûlure avec une résolution permettant de mesurer la durée d'insolation à 6 minutes près.

Un héliographe plus récent mesure automatiquement l'insolation c'est un héliographe à fibre optique.

La connaissance de la durée d'ensoleillement est utile en météorologie, mais aussi pour les énergéticiens (pour les calculs de production d'eau chaude ou d'électricité par panneaux ou moquettes solaires par exemple), ainsi que pour les écologues (la lumière étant la condition de la photosynthèse).

2.5.2 Le Pyranomètre :

C'est le capteur le plus fréquemment utilisé pour mesurer le rayonnement global ou diffus. Il se compose d'une thermopile composé d'une série de thermocouples avec alternance des soudures chaudes et soudures froides.

Les soudures chaudes sont en contact thermique avec la surface absorbante une «noire» avec une capacité thermique faible.

Les soudures froides sont en contact avec un matériau ayant une capacité thermique relativement élevée et reste à la température ambiante.

Lorsque le rayonnement solaire tombe sur la surface absorbante (noire) la quasi-totalité du rayonnement incident est absorbé. Il en résulte une augmentation de la température à la «jonction chaude» proportionnelle à l'intensité du rayonnement. Une tension est alors générée par la thermopile, qui est proportionnelle à la différence de température entre le «chaud» et le «froid».

CHAPITRE 2 : ESTIMATION DU RAYONNEMENT SOLAIRE

Cette tension de sortie est converti Watts/metre² par l'utilisation d'un facteur de sensibilité. Les pyranomètres ont une réponse spectrale comprise entre 335 et 2200 nm du spectre solaire qui inclut la bande de longueurs d'onde visibles.

Pour la mesure du rayonnement réfléchi par le sol on utilise un Pyranomètre inversé et pour le rayonnement diffus on utilise un Pyranomètre plus un pare –soleil [2][43]

2.5.3 Le Pyrhéliomètre

C'est est un instrument destiné à la mesure de l'intensité du rayonnement solaire direct. Il est généralement constitué par une thermopile peinte en noir, donc très absorbante, montée sur un système de suivi. Ainsi cet instrument ne mesure que le rayonnement directement issu du soleil.

2.5.4 Le Spectroradiomètre :

mesure la repartition spectrale du rayonnement solaire et fourni la densite spectrale de l'eclaircement energetique

2.5.5 L'Albedomètre :

mesure l'albedo qui est definie par le raport du rayonnement reflechi au rayonnement global on utilise deux pyranomètres opposés à l'horizontal .

2.6 Conclusion

Le développement des applications de l'énergie solaire dans le domaine photovoltaïque, thermodynamique ou bioclimatique nécessite des données de longue durée sur l'irradiation solaire.

A défaut plusieurs modèles empiriques [12][32][38] ont été élaboré pour prédire le rayonnement solaire. Dans la littérature, beaucoup de modèles pour estimer le rayonnement solaire global, diffus sur plan horizontal. Les modèles prédisant le rayonnement global à différentes positions utilisent presque les mêmes équations[18]. La différence principale réside dans l'estimation du rayonnement diffus. Une étude des différents modèles pour l'estimation du rayonnement diffus du ciel sera traitée dans le chapitre 3.

CHAPITRE 3 : ETUDE DES MODELES STATISTIQUES DU RAYONNEMENT GLOBAL

3.1 Introduction

Les modèles statistiques utilisés dans la littérature la plus part sont pour estimer le rayonnement global quotidien a partir de la durée d'insolation [15][35]. Ces modèles sont une modification de l'équation type d'Angstrom (1924) par l'ajout de termes supplémentaires [22][28]. L'estimation des paramètres des modèles est réalisée le plus souvent par la méthode des moindres carrés et la technique de la régression. [4][36]

Les premières études reliant le rayonnement global au diffus sont celles de Liu et Jordan (1960) [2] en utilisant des valeurs quotidiennes. Au cours des dernières années, plusieurs régressions ont été proposées entre la fraction diffuse du rayonnement global et l'indice de clarté (rapport du rayonnement Global au rayonnement extra-terrestre) [16] [32] sur la base horaire, quotidienne et les données mensuelles en moyenne. L'ajout d'éléments météorologiques a considérablement amélioré l'estimation des mesures.[22][29]

3.2 Estimation du Rayonnement solaire sur une surface

Le rayonnement global sur une surface avec orientation arbitraire et une inclinaison β par rapport à l'horizontale est la somme de trois composantes .la première composante c'est le rayonnement direct $I_b(\beta)$, la deuxième composante c'est le rayonnement diffus du ciel et la troisième composante est le rayonnement réfléchi [1][2] [4]

Des modèles empiriques permettent l'estimation de l'éclairement global reçu sur un plan incliné à partir des éclaircements mesurés sur un plan horizontal[19] [27][31][34].Ces modèles sont basé sur les différentes contributions du ciel au rayonnement diffus, à savoir l'anisotropie et l'isotropie du ciel et la valeur estimée albédo pour le rayonnement réfléchi du sol

3.2.1 Rayonnement direct

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

L'angle d'incidence θ_i est l'angle formé entre la normale du plan et les rayons du soleil. 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 (a)], l'inclinaison (β) du plan récepteur et de son azimut (γ), par la relation : [2] [3]

$$\cos(\theta_i) = \cos(90 - h)\cos(\beta) + \sin(\beta)\sin(90 - h)\cos(a - \gamma) \quad (20)$$

L'éclairement du au rayonnement direct sur un plan d'inclinaison et d'orientation quelconque est donné par la relation [4]

$$I_b(\beta) = I_{bn} R_b \quad (21)$$

$$R_b = \max \left[0, \frac{\cos \theta_i}{\sin h} \right] \quad (22)$$

$$I_b(\beta) = I_{bn} \cos \theta_i \quad (23)$$

Avec I_{bn} est le rayonnement sur un plan normal et θ_i est l'angle d'incidence sur le plan considéré (Angle entre la normale à la surface et le rayon du soleil)

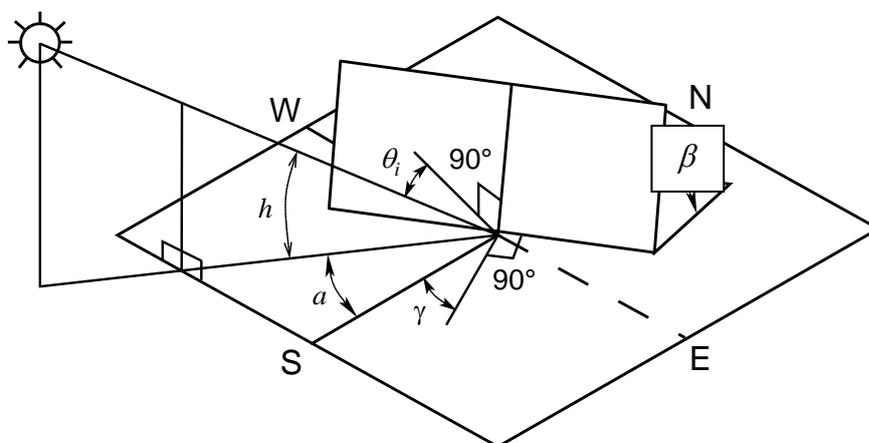


Figure 16. Le rayonnement direct sur une surface inclinée

3.2.2 Rayonnement diffus du ciel

Modèles pour l'estimation du rayonnement diffus du ciel

3.2.2.1 Modèles de Première génération

a. Modèle isotrope

Le modèle Isotrope de Liu et 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 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: [1] [2][4] [5][6][30]

$$I_d(\beta) = \frac{1}{2} I_d (1 + \cos \beta) \quad (24)$$

Où I_d est le rayonnement diffus sur un plan horizontal

b. 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 :

[1] [4][6] [30]

$$I_d(\beta) = I_d r_b \quad (25)$$

$$r_b = \frac{\sin \delta \cdot \sin(\varphi - \beta) + \cos \delta \cdot (\cos \varphi - \beta) \cdot \cos \omega}{\sin \delta \sin \varphi + \cos \delta \cos \varphi \cos \omega} \quad (26)$$

Où r_b est le rapport entre le rayonnement direct journalier sur un plan incliné à celui du plan horizontal.

φ est la latitude (degrés) et β la pente de la surface à l'horizontale (degré). La déclinaison de la journée δ (degré) et l'angle horaire ω (degré).

3.2.2.2 *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.

a. Modèle Temps-Coulson

Le modèle de Temps-Coulson (1977) pour un ciel clair prend en considération la correction de au rayonnement diffus horizon et diffus circonférence ; Il peut être estime :

$$I_d(\beta) = I_d \cos^2\left(\frac{\beta}{2}\right) \cdot \left(1 + \sin^3\left(\frac{\beta}{2}\right)\right) \cdot (1 + \cos^2\theta_i) \sin^3 \theta_z \quad [4] [10] [30] \quad (27)$$

θ_i : Angle d'incidence

θ_z Angle zénithal du soleil

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

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

b. Modèle de Klucher

Le modèle de Klucher (1979) est une généralisation du modèle Temps-Coulson pour tout type de ciel. [4] [6] [7] [30]

$$I_d(\beta) = \frac{1}{2} I_d (1 + \cos \beta) \cdot (1 + F \sin^3 \beta) \cdot (1 + F \cos^2 \theta_i \sin^3 \theta_z) \quad (28)$$

F est une fonction de modulation

$$F = 1 - \left(\frac{I_d}{I}\right)^2 \quad (29)$$

Sa valeur est nulle lorsque le ciel est couvert et l'équation devient pour l'isotrope. Quand F tend à un, l'équation devient pour les conditions de ciel clair équation donnée par Temps et Coulson .

c. Modèle de Hay

Le modèle de Hay (1979) est un modèle de rayonnement diffus du ciel .il est compose de la composante isotrope et de la composante circumsolaire. Il est donné par la relation :

$$I_d(\beta) = I_d \left[\left(\frac{I - I_d}{I_0} \right) r_b + \frac{1}{2} (1 + \cos \beta) \left(1 - \frac{I - I_d}{I_0} \right) \right] \quad [4] [6][8][9] [30] \quad (30)$$

d. Modèle de Reindl

Reindl (1990) a utilisé les travaux de Hay et de Klucher et a proposé : [4] [21]

$$I_d(\beta) = I_d \left\{ \left(1 - F' \right) \cos^2 \left(\frac{\beta}{2} \right) \left[\left(1 + f \sin^3 \left(\frac{\beta}{2} \right) \right) + F' r_d \right] \right\} \quad (31)$$

$$\text{Avec : } F' = \frac{I_G - I_d}{I_E} \quad ; \quad f = \sqrt{\frac{I_b}{I_G}} \quad ; \quad r_d = \frac{I_d(\beta)}{I_d}$$

3.2.2.3 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 décompose en trois composantes.

a. 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 : [4] [20] [30][33]

$$I_d(\beta) = I_d r_d \quad (32)$$

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

CHAPITRE 3 : ETUDE DES MODELES STATISTIQUES DU RAYONNEMENT GLOBAL

un facteur qui correspond à tout type de ciel où les indices 0 et 1 correspondent à l'état du ciel (0:clair ; 1 ciel couvert).

$$r_d = (1 - N_{pt}) r_{d0} + N_{pt} r_{d1} \quad (33)$$

$$N_{pt} = \max\{\min(Y, 1), 0\} \quad (34)$$

$$Y = 6.6667(I_d / I_G) - 1.416 \quad \text{avec} \quad (I_d / I_G) \leq 0.227 \quad (35)$$

$$\text{Autrement :} \quad Y = 1.2121(I_d / I_G) - 0.1758 \quad (36)$$

r_{d0} et r_{d1} sont obtenus si les distributions normalisés du rayonnement correspondantes sont disponibles.

$$r_{d0} = \exp\left(a_0 + a_1 \cos \theta_i + a_2 \cos^2 \theta_i + a_3 \cos^3 \theta_i\right) + F(\beta) + G(h) \quad (37)$$

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

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

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

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

$$F(\beta) = \frac{1 + b_0 \sin^2 \beta + b_1 \sin(2\beta) + b_2 \sin(4\beta)}{1 + b_0} \quad (38)$$

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

$$G(h) = 0.408 - 0.323h' + 0.384h'^2 - 0.170h'^3 \quad (39)$$

$$h' = 0.01h$$

Equation de Steven-Unsworth

$$r_{d1} = \cos^2\left(\frac{\beta}{2}\right) + \frac{2b}{\pi(3+2b)} \times \left(\sin \beta - \beta \cos \beta - \pi \sin^2\left(\frac{\beta}{2}\right)\right) \quad (40)$$

Gueymard propose $b=1.5$

$$r_{d1} = \cos^2\left(\frac{\beta}{2}\right) + \frac{1}{2\pi} \times \left(\sin \beta - \beta \cos \beta - \pi \sin^2\left(\frac{\beta}{2}\right)\right) \quad (41)$$

b. Modèle de Perez

Le modèle de Perez et al (1990) est basé sur trois composantes. [4] [11] [30]

L'équation de Perez est :

$$I_d(\beta) = I_d \left[(1 - F_1) \cos^2 \left(\frac{\beta}{2} \right) + F_1 \left(\frac{a_0}{a_1} \right) + F_2 \sin \beta \right] \quad (42)$$

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

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

$$\varepsilon = \frac{\frac{I_d + I_{bn}}{I_d} + 5,535 \cdot 10^{-6} \theta_Z^3}{1 + 5,535 \cdot 10^{-6} \theta_Z^3} \quad (43)$$

Avec I_d est le rayonnement diffus horizontal

I_{bn} est le rayonnement direct normal

θ_Z est l'angle azimutal en degrés ($\theta_Z = 90 - h$) h est la hauteur du soleil

- La luminosité Δ (sky brightness) qui représente le caractère lumineux du rayonnement diffus du ciel

$$\Delta = m \frac{I_d}{I_{bne}} \quad (44)$$

m : Masse d'air optique

CHAPITRE 3 : ETUDE DES MODELES STATISTIQUES DU RAYONNEMENT GLOBAL

I_{bne} Rayonnement direct normal hors atmosphère

F_1 et F_2 Sont donnés par des tables

$$F_1 = \max \left[0, \left\{ F_{11} + F_{12}\Delta + \left(\frac{\pi}{180} \right) \theta_Z F_{13} \right\} \right] \quad (45)$$

$$F_2 = F_{21} + F_{22}\Delta + \left(\frac{\pi}{180} \right) \theta_Z F_{23} \quad (46)$$

Perez classifie les divers ciels en huit catégories basées sur l'indice de clarté ε de 1.000 à 1.065 pour 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 ciels nuageux voir tableau ci-dessous.

Tableau 3 : coefficients F_{ij} de Perez

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

3.2.3 Rayonnement Réfléchi

Le sol reçoit du rayonnement direct et du rayonnement diffus. La valeur albédo du sol pour les rayonnements direct ρ_b et diffus ρ_d peut être différente

Pour une Réflexion Isotropique ; On suppose que $\rho_b = \rho_d = \rho$

$$I_r(\beta) = \frac{1}{2} I \rho (1 - \cos \beta) \quad (47)$$

3.2.4 Rayonnement Global

Le rayonnement global sur une surface inclinée est la somme des trois composantes ; la première composante c'est le rayonnement direct, la deuxième composante c'est le rayonnement diffus du ciel calculé selon un des modèles choisis et la troisième composante c'est le rayonnement réfléchi par le sol [eq 19].

3.3 Conclusion

Les modèles statistiques sont élaborés en fonction des données disponibles. La durée d'insolation a été la première donnée exploitée car elle facilite sa disponibilité.

Beaucoup de modèles pour estimer le rayonnement solaire global, diffus et direct à partir de la durée d'insolation des valeurs moyennes mensuelles, des valeurs moyennes journalières ou horaires d'irradiation moyennant plusieurs paramètres climatologiques. Les données satellitaires fournissent des informations sur la couverture nuageuse, le paramètre le plus important pour l'atmosphère.

À l'exception de l'état où le ciel est clair, la composante diffuse est toujours dominante.

La difficulté d'estimation de cette dernière a contribué à l'élaboration de beaucoup de modèles statistiques. Ces modèles considèrent l'isotropie ou l'anisotropie du ciel.

Dans ce qui suit, une évaluation des modèles choisis sera effectuée afin de connaître la principale différence entre eux. L'étude se basera sur des méthodes graphiques et statistiques afin de déterminer les singularités de chaque modèle.

CHAPITRE 4 : RESULTATS ET PERFORMANCE DES MODELES

4.1 Introduction

L'objectif de ce travail est de comparer les valeurs du rayonnement solaire global mesurées avec celles qui sont prévues par des modèles statistiques. Pour l'estimation du rayonnement global on a choisi cinq modèles pour le rayonnement diffus parmi les modèles cités dans le chapitre précédent. Le premier modèle est un modèle de première génération c'est le modèle Isotropique ; deux modèles de la deuxième génération c'est le modèle Hay et le modèle de Reindl et deux modèles aussi de la troisième génération c'est le modèle de Gueymard et celui de Perez. .

Le rayonnement global calculé est la somme des rayonnements direct, diffus (calculé selon un des cinq modèles proposés) et réfléchi (en utilisant un albédo constant).

Les données sont des mesures du rayonnement solaire direct et du rayonnement global et diffus sur plan horizontal et de la mesure du rayonnement Global sur plan incliné à la latitude du lieu. Ce dernier permet de maximiser l'énergie annuellement reçue par le capteur [17].[37]

Lieu: Bouzareah (Alger)

Latitude	Longitude	Altitude
36.789°	3.03° E	345 (m)

4.2 Mesures

Les mesures sont collectées par

Une station radiométrique (Installée sur le site du CDER de Bouzareah. Celle-ci comporte deux parties : (fig17)

- ✓ une partie mobile un sun tracker muni d'une boule pare soleil pour la mesure de l'éclairement diffus et d'un pyrhéliomètre pour le rayonnement direct
- ✓ la partie fixe est un pyranomètre destiné à la mesure du rayonnement diffus sur plan horizontal

Deux autres pyranomètres :

- ✓ Le premier pour la mesure du rayonnement global sur plan horizontal.(fig18)
- ✓ Le deuxième mesure le rayonnement global sur plan incliné à la latitude du lieu (fig19)

Tous les systèmes décrits ci-dessus sont reliés à une acquisition de marque CAMPBELL SCIENTIFIC CR1000X. Celle-ci est reliée par interface RS232, à un ordinateur dans lequel on a installé un logiciel d'exploitation de données (datalogger). Ces données sont ainsi collectées quotidiennement 24 h sur 24 et avec un pas de cinq minutes.

La précision des pyranomètres est de $\pm 3\%$



Figure 17 .Station radiométrique du CDER de Bouzareah pour la mesure du rayonnement direct et le rayonnement diffus sur plan horizontal



Figure 18 .Pyranomètre qui mesure du rayonnement global sur plan horizontal

CDER de Bouzareah



Figure 19. Pyranomètre pou la mesure du rayonnement global sur plan incliné. CDER de Bouzareah

4.3 Etude des modèles

Les données brutes collectées pendant sept mois, du mois mars au mois de septembre de l'année deux mille onze (2011). Elles sont exploitées à l'aide d'un programme écrit en langage awk ⁽¹⁾ qui permet de réarranger les données d'éliminer les périodes d'essai et les défaillances du système de mesures.

Un programme en langage Fortran (voir annexe1) a été élaboré pour calculer le rayonnement global en se basant sur les équations des différents modèles. Le programme lit les données sur le lieu géographique, le temps (minutes, heures, jour, mois et année). et les mesures du rayonnement global horizontal, diffus horizontal et le direct.

La date est convertie en nombre de jours et calcul le rayonnement extraterrestre I_{ex} [eq 5] avec ($I_0 = 1367(W/m^2)$) la déclinaison δ [eq 12], équation du temps Δt [eq 10].

Du temps local (TL) on obtient le temps solaire vrai (TSV) [eq 7] et calcul l'angle horaire (ω ou AH) [eq 13], la hauteur solaire (h) [eq 14] et l'azimut solaire (a) [eq 15], masse atmosphérique (m) [eq 16]

Le programme lit les données géographiques (la latitude et la longitude); l'angle d'inclinaison de la surface réceptrice et son azimut et détermine l'angle d'incidence θ_i [eq 20]

⁽¹⁾ Awk est un langage de programmation dans le monde Unix. Il tire son nom des trois programmeurs qui l'ont développé : Alfred V. Aho, Peter J. Weinberger et Brian W. Kernighan..

C'est une commande qui lit les lignes d'un fichier une à une sans modifier le fichier source et applique le traitement souhaité. Il peut être utilisé aussi pour des opérations de calculs complexes et la mise en forme de données brutes pour faire des tableaux statistique

Le programme lit les données du rayonnement global horizontal (I_G) diffus horizontal (I_d) et rayonnement direct (I_b) et calcul :

- Le rayonnement direct sur plan incline ($I_b(\beta)$) [eq 21]
- Le rayonnement réfléchi sur plan incliné ($I_r(\beta)$) [eq 42] avec $\rho = 0.2$.
- Le rayonnement diffus sur plan incline $I_d(\beta)$ selon chaque modèle :
 - ✓ Modèle isotrope [eq 24]
 - ✓ Modèle de Hay [eq 30]
 - ✓ Modèle de Reindl [eq 31]
 - ✓ Modèle de Gueymard [eq 32]
 - ✓ Modèle de Perez [42]
- Le rayonnement Global : $I_G(\beta) = I_b(\beta) + I_d(\beta) + I_r(\beta)$ [eq 19]

L'algorithme du programme est donc simple.[25][26] Une évaluation de la procédure de calcul de la position du soleil est effectuée en comparant l'angle zénithal du soleil et l'angle azimut avec les angles mesurés par la station radiométrique. Les écarts ne dépassent pas le demi-degré décimal. Ce qui constitue une très bonne précision.

La comparaison des valeurs mesurées et calculées par le calcul des écarts absolus et relatifs pour chacun des modèles utilisés.

Un programme fortran a été élaboré pour les calculs d'erreurs (voir annexe 2)

4.4 Exploitation et comparaison des résultats pour les différents modèles :

Il est intéressant de s'intéresser à la fréquence des données enregistrées. La courbe de la figure 20 montre la répartition du nombre d'échantillons du rayonnement diffus en fonction de ce dernier. Une décroissance est observée, il dépasse rarement les 450 w/m² pour le site de bouzaréah.

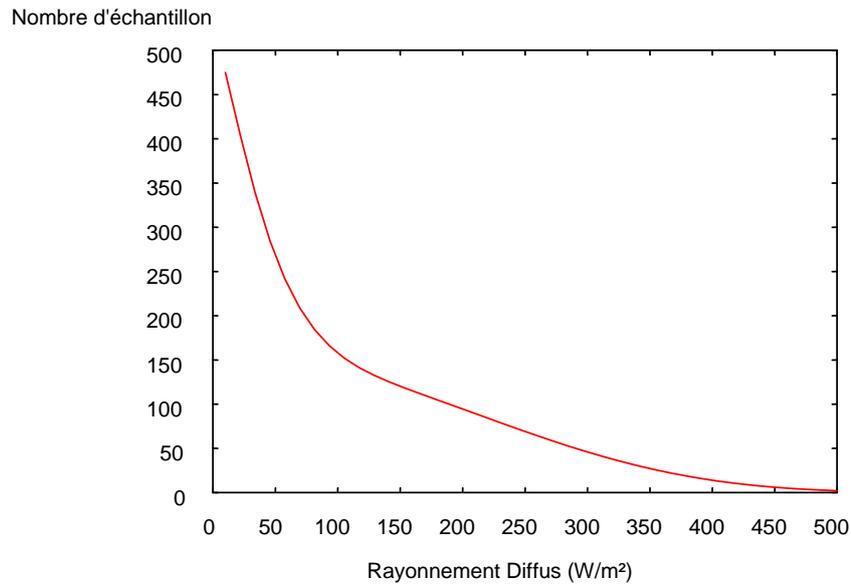


Figure 20. Fréquence du rayonnement diffus

4.4.1 Comparaison du Rayonnement diffus estimé selon les modèles avec le rayonnement diffus mesuré

Etude graphique

Les points des échantillons du rayonnement diffus calculé par les différents modèles en fonction du rayonnement mesuré se concentrent près de la droite unitaire (figures 21-25). Montrant ainsi une bonne approximation des modèles.

En effet le calcul des écarts absolus moyens pour chacun des modèles choisis donne les valeurs :

- ✓ 6.9%, pour le modèle Isotropique (Fig 21)
- ✓ 6.6%, pour le modèle de Hay (Fig 22)
- ✓ 6.7%, pour le modèle de Reindel (Fig 23)
- ✓ 5.5%, pour le modèle de Gueymard (Fig 24)
- ✓ 4.8% pour le modèle de Perez (Fig 25)

Le modèle de Perez donne l'écart le plus faible comparativement aux autres modèles, c'est le modèle le plus utilisé dans la littérature.

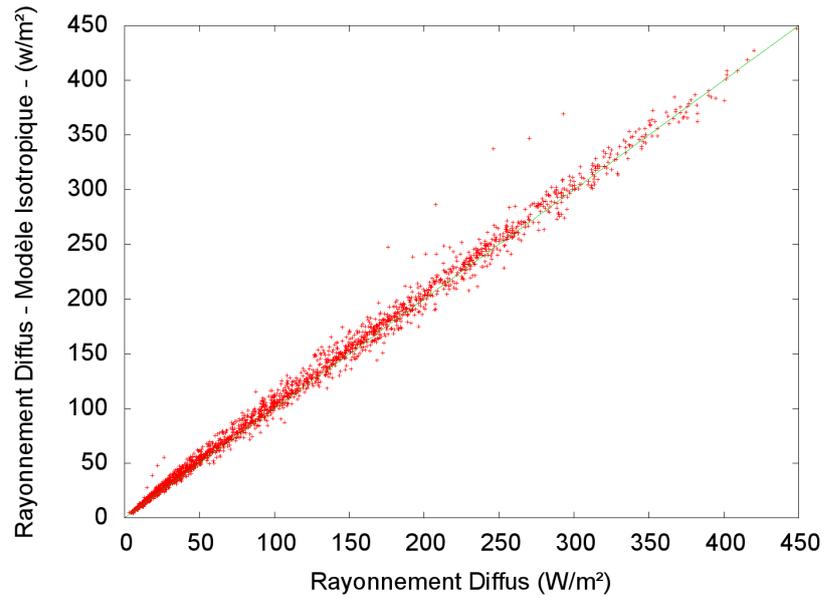


Figure 21. Rayonnement diffus selon le modèle Isotropique en fonction du rayonnement diffus mesuré

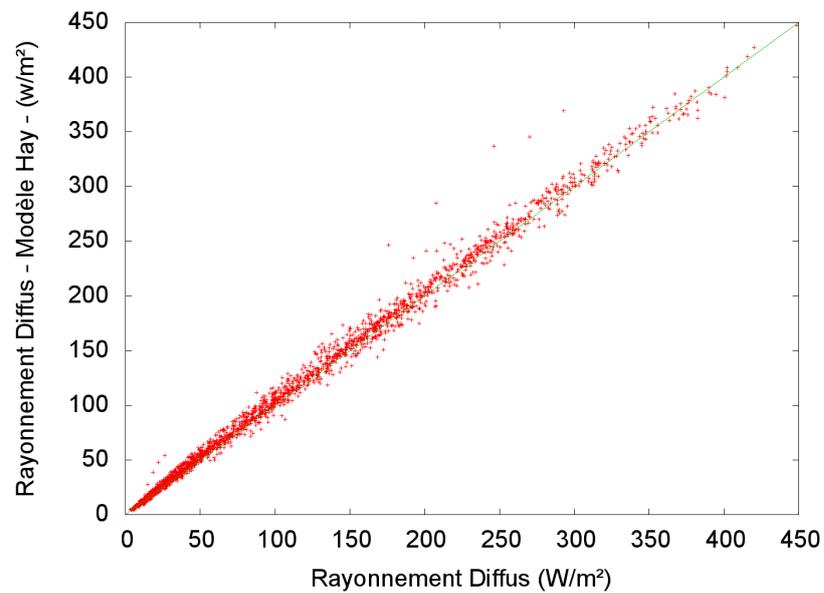


Figure 22. Rayonnement diffus selon le modèle de Hay en fonction du rayonnement diffus mesuré

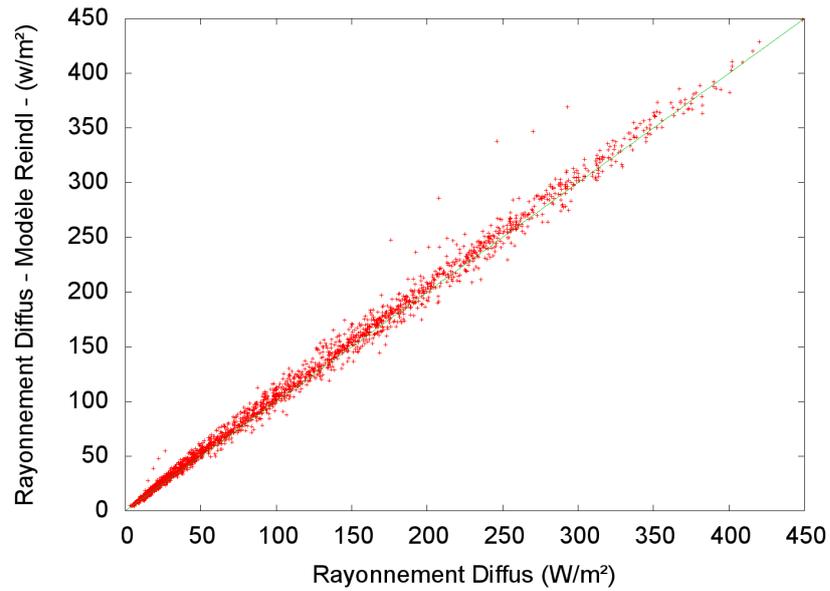


Figure 23 . Rayonnement diffus selon le modèle de Reindl en fonction du rayonnement diffus mesuré

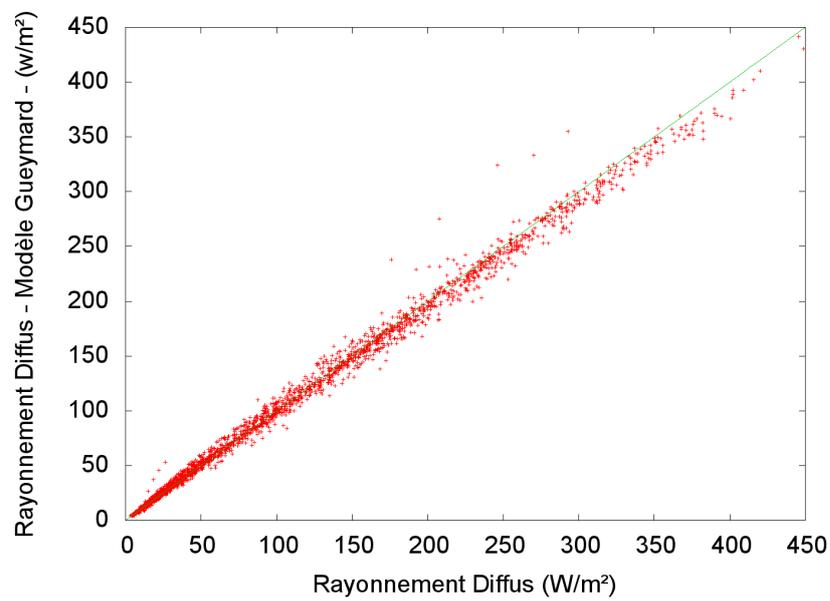


Figure 24. Rayonnement diffus selon le modèle de Gueymard en fonction du rayonnement diffus mesuré

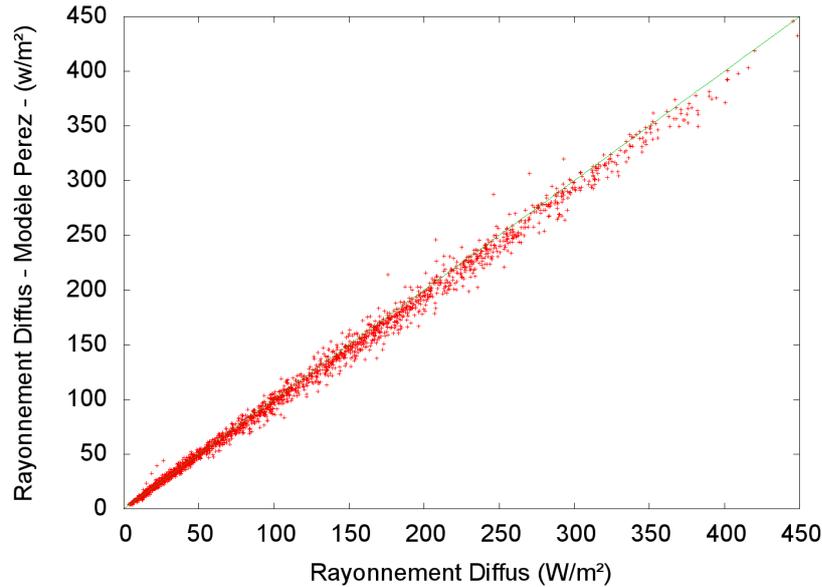


Figure 25. Rayonnement diffus selon le modèle de Perez en fonction du rayonnement diffus mesuré

Les graphes nous renseignent peu sur les modèles. Une étude plus approfondie est nécessaire afin de juger du comportement des modèles et de connaître leur points forts et leurs lacunes.

Étude statistique

L'étude statistique est basée sur les calculs des écarts absolus et relatifs.

✓ L'écart absolu est donné par le calcul suivant :

$$\text{Ecart}_{\text{absolu}} = \left| \text{valeur}_{\text{calculée}} - \text{valeur}_{\text{mesurée}} \right|$$

✓ On définit l'écart absolu moyen (%) sur une plage limitée de mesure. Dans cette étude on a pris 10W

$$\text{Ecart}_{\text{absolu}} \% = 100 \times \frac{1}{n} \sum \left| \frac{\text{valeur}_{\text{calculée}} - \text{valeur}_{\text{mesurée}}}{\text{valeur}_{\text{mesurée}}} \right|$$

Le rayonnement correspondant est la moyenne sur la plage considérée.

On s'intéressera à la distribution des écarts en fonction du rayonnement diffus.

La figure 26 montre la distribution de l'écart absolu en fonction du rayonnement diffus.

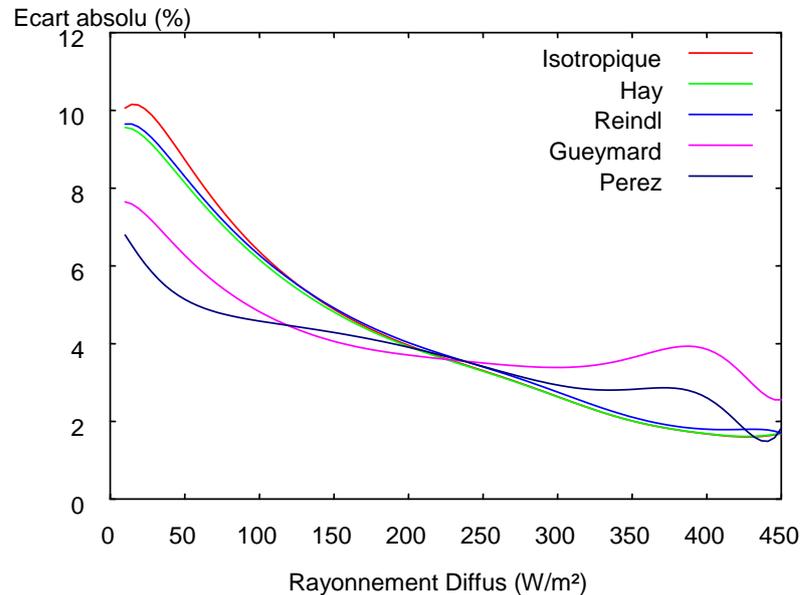


Figure 26. Distribution de l'écart absolu pour les différents modèles en fonction du rayonnement diffus incliné mesuré

- Il apparaît clairement que les modèles de première et seconde génération donnent pratiquement les mêmes courbes s'écartant énormément aux faibles rayonnements mais s'approchent plus des mesures au rayonnement plus importants
- Une explication plausible est que ces modèles ne tenant pas compte du rayonnement de l'horizon ont tendance à s'écarter de la mesure réelle lorsque celui-ci est prédomine.
- ✓ L'écart relatif est donné par le calcul suivant :

$$Ecart_{relatif} = \left(\frac{valeur_{calculée} - valeur_{mesurée}}{valeur_{mesurée}} \right) \times 100$$

On définit l'écart relatif moyen(%) sur une plage limitée de mesures égales à 10W

$$Ecart_{relatif} \% = 100 \times \frac{1}{n} \sum \left(\frac{valeur_{calculée} - valeur_{mesurée}}{valeur_{mesurée}} \right)$$

Cette équation permet de savoir si les modèles sous-estiment ou surestiment les mesures dans la plage considéré.

Les écarts relatifs moyens pour chacun des modèles sont :

- ✓ -5.4% pour le modèle Isotropique,
- ✓ -4.8%, pour le modèle Hay
- ✓ -5.1%, pour le modèle Reindl,
- ✓ -1.0%, pour le modèle Gueymard
- ✓ 1.6% pour le modèle Perez

- Il est remarqué que les modèles de première et seconde génération sous-estiment le rayonnement diffus. Le modèle de Perez a tendance à une légère surestimation du rayonnement.
- Une combinaison des différents modèles permettrait certainement une meilleure approximation de la grandeur réelle.

La figure 27 montre l'écart relatif,

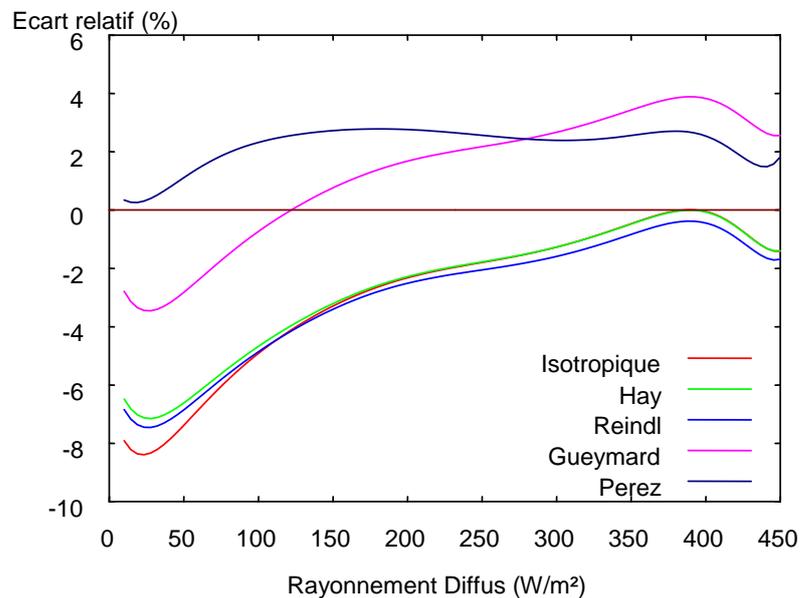


Figure 27. Distribution de l'écart relatif sur le calcul du rayonnement diffus en fonction du rayonnement diffus mesuré

4.4.2 Comparaison du Rayonnement global estimé avec le rayonnement global mesuré

En calculant le rayonnement global reçu sur plan incliné, il est possible d'estimer l'influence de l'erreur des modèles sur ce dernier.

Le rayonnement diffus contribue dans une certaine proportion dans le calcul du rayonnement global.

La figure 28 montre la fréquence du rayonnement global incliné en fonction de ce dernier.

La courbe comporte plusieurs différences avec la courbe de fréquence du rayonnement diffus. Il est à noter l'existence d'une singularité près des 900w/m² montrant une plus grande quantité de données dans cette région par rapport aux autres régions en négligeant les faibles rayonnements.

Il est à noter également que ce rayonnement dépasse rarement les 1100w/m².

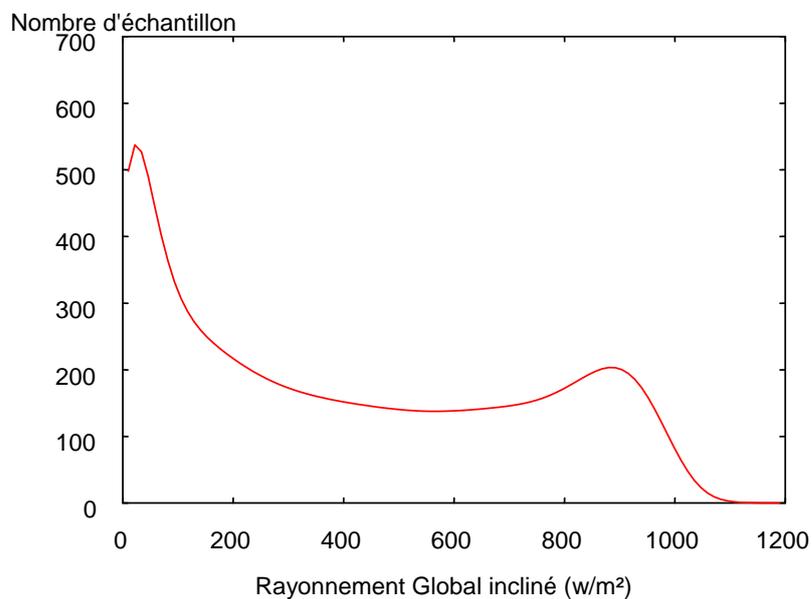


Figure 28. Fréquence du rayonnement global incliné mesuré en fonction de celui-ci

Etude graphique

Les figures 29 à 33 montrent le rayonnement global calculé en utilisant les différents modèles de diffus en fonction du rayonnement global mesuré.

Les points se rassemblent autour de la droite unitaire ce qui démontre une bonne approximation des données expérimentales avec les calculs.

Les écarts absolus moyens sont :

- ✓ 4.8%, pour le modèle Isotropique
- ✓ 5.2%, pour le modèle de Hay,
- ✓ 5.1%, pour le modèle de Reindl,
- ✓ 3.9%, pour le modèle de Gueymard
- ✓ 3.6% pour le modèle de Perez

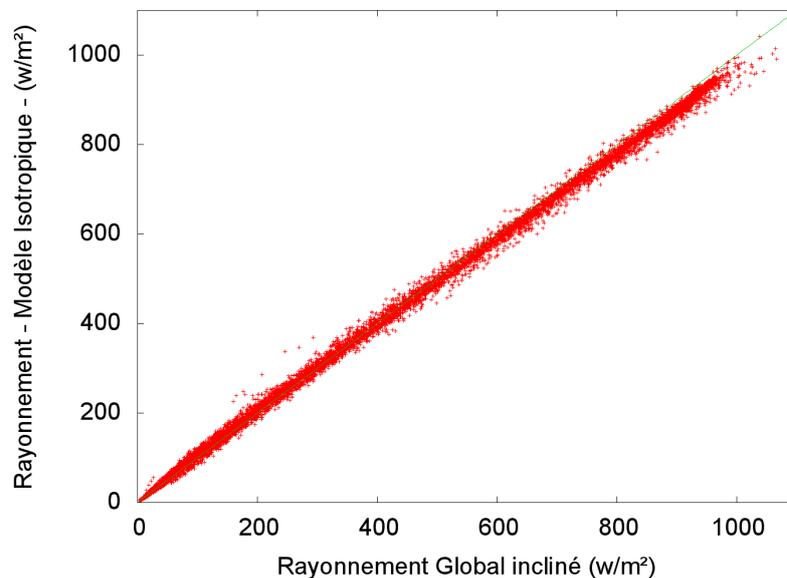


Figure 29. Rayonnement global incliné calculé selon le modèle Isotropique en fonction de celui mesuré

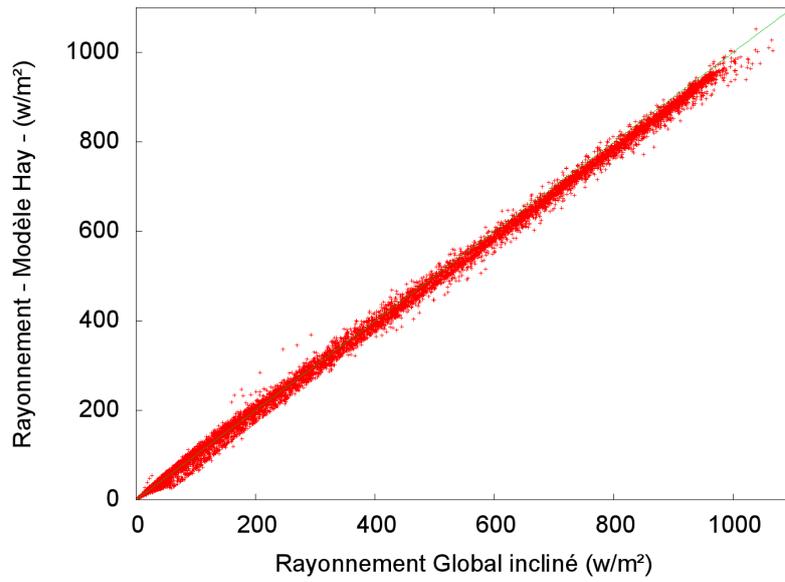


Figure 30 Rayonnement global incliné calculé selon le modèle de Hay en fonction de celui mesuré

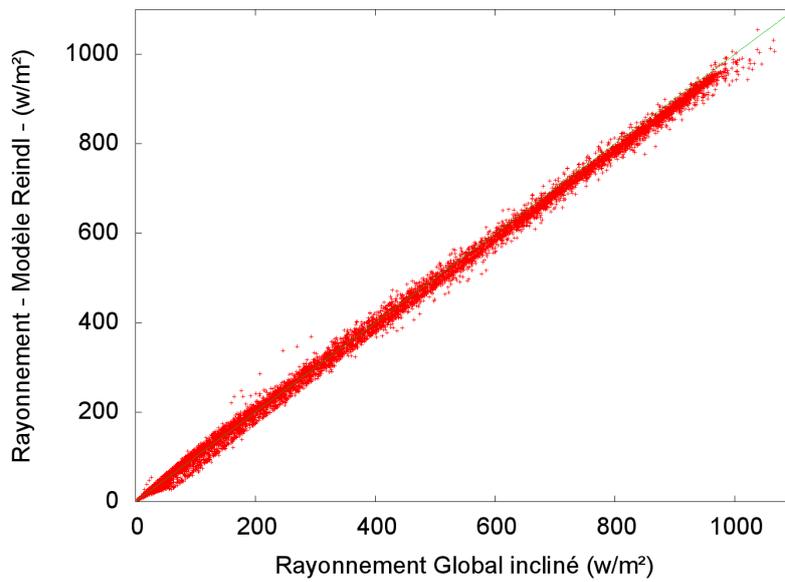


Figure 31 .Rayonnement global incliné calculé selon le modèle de Reindl en fonction de celui mesuré

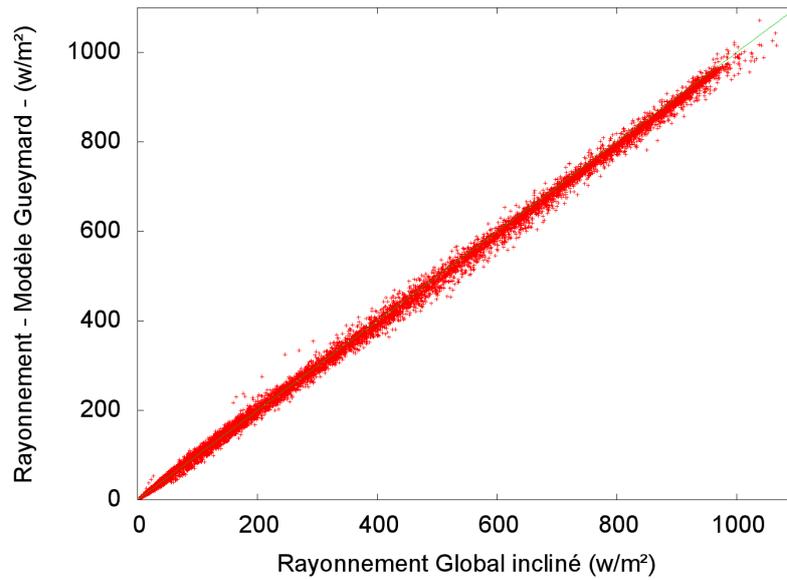


Figure 32 .Rayonnement global incliné calculé selon le modèle de Gueymard en fonction de celui mesuré

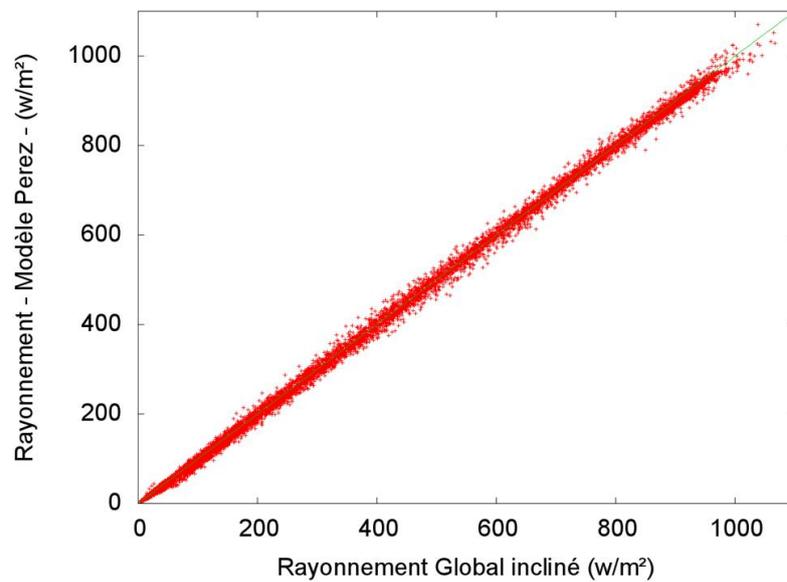


Figure 33. Rayonnement global incliné calculé selon le modèle de Perez en fonction de celui mesuré

Etude statistique

La figure 34 montre la distribution de l'écart absolu en fonction du rayonnement global incliné mesuré.

Il est à noter que le modèle de Perez donne la meilleure approximation puisque c'est le modèle qui approche le mieux les données du rayonnement diffus.

Toutefois il est à remarquer que les écarts sont plus importants que ceux estimés lors du calcul du rayonnement diffus. Cet accroissement peut être expliqué par l'addition de l'erreur sur l'évaluation du rayonnement direct.

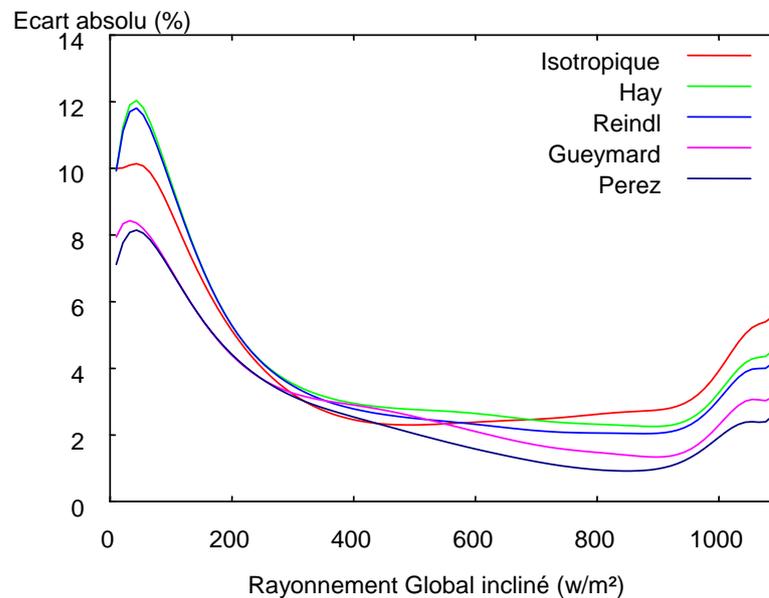


Figure 34. Distribution de l'écart en fonction de l'intensité du rayonnement Global

La figure 35 est intéressante puisque qu'elle montre l'écart relatif sur l'estimation du rayonnement Global

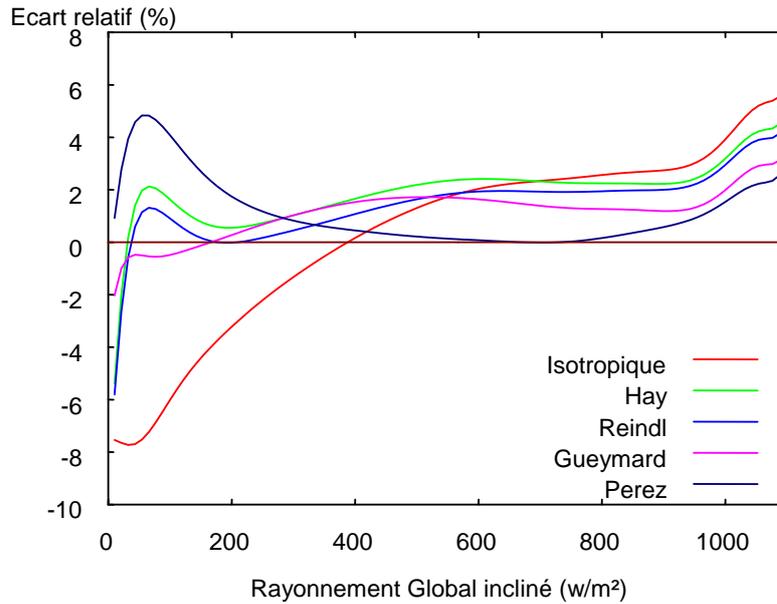


Figure 35 . Distribution de l'écart relatif en fonction de l'intensité du rayonnement Global mesuré

Les écarts relatifs moyens pour chacun des modèles sont :

- ✓ -1.42 % pour le modèle Isotropique,
- ✓ 1.54 %, pour le modèle Hay
- ✓ 1.02 %, pour le modèle Reindl,
- ✓ 0.69 %, pour le modèle Gueymard
- ✓ 1.58 % pour le modèle Perez

- Il est remarqué que le modèle de Perez approxime le mieux le rayonnement global, puisque sa courbe approche le plus de l'axe des abscisses.
- Les autres modèles ont tendance à surestimer spécialement dans la région supérieure à 300W/m². L'accroissement de l'écart étant attribué à l'estimation du rayonnement direct dans la formule du global. Sa distribution est montrée dans la figure 36.

4.4.3 Comparaison du rayonnement Direct et Diffus en fonction du rayonnement Global incliné

Il est remarqué aussi que le rayonnement direct contribue de façon significative dans la région où le rayonnement global est important. En dessous des 500W/m² le rayonnement diffus contribue plus que le rayonnement direct, leur proportion est partagée aux environs des 500W/m²

Rayonnement Direct,

Diffus mesurés (W/m²)

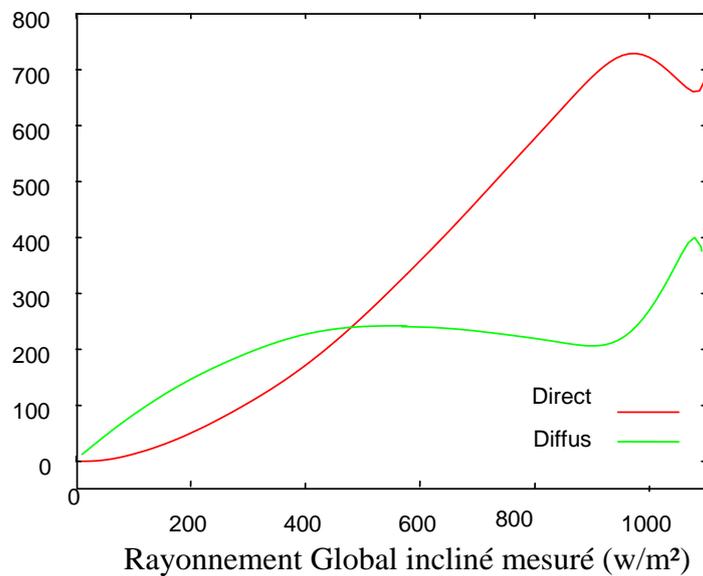


Figure 36. Rayonnement direct et diffus en fonction du global incliné

4.4.4 Comparaison du rayonnement direct estimé et mesure

La figure 37 montre l'écart entre l'estimation du rayonnement direct par les formules géométriques et les données mesurés par la station en fonction du global incliné mesuré.

Cette figure aide à identifier les zones de contribution des erreurs.

Ecart rayonnement direct (%)

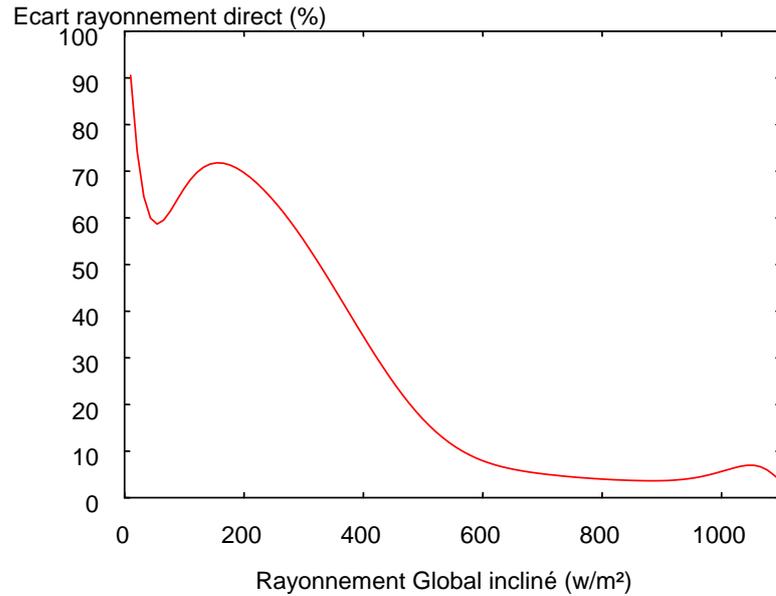


Figure 37. Écart du calcul du rayonnement direct calculé et mesuré en fonction de l'intensité du global incliné

- Un écart assez important est observé pour les faibles valeurs du rayonnement Global
- Les valeurs calculées et mesurées du rayonnement direct se rapprochent pour les valeurs importantes supérieures à 600 (W/m²) du rayonnement Global

Une étude plus approfondie du rayonnement direct est nécessaire essentiellement dans la plage des valeurs inférieures du rayonnement Global

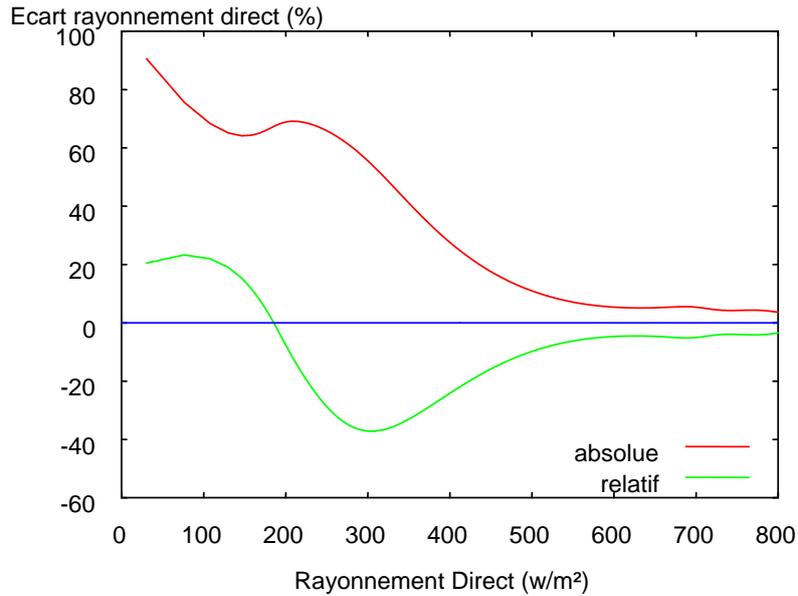


Figure 38 . Écart de calcul du rayonnement direct calculé et mesuré en fonction de son intensité

- Les valeurs du rayonnement direct sont surestimées pour les valeurs inférieures à 200 (W/m²) ; sou estimées pour les supérieures a 200 (W/m²) et se rapprochent pour les valeurs supérieures à 500(W/m²) .(Figure 38)

La figure 39 montre la fréquence du rayonnement direct.

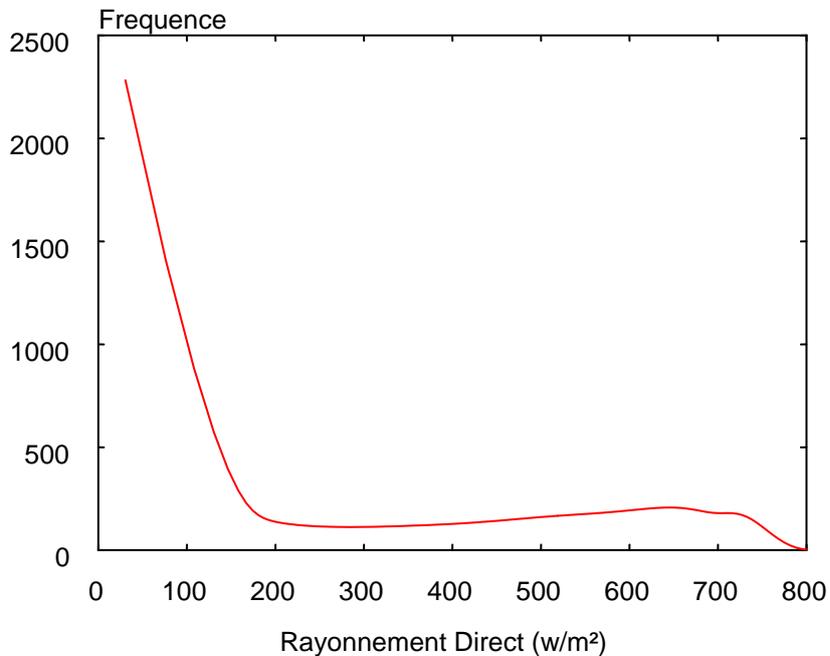


Figure 39. Fréquence du rayonnement direct en fonction de son intensité

- Il est remarqué que ce dernier a une fréquence élevée à des faibles valeurs où sa prédiction contient énormément d'écarts. Sa distribution devient quasi uniforme au-dessus de 200(W/m²).

4.5 Conclusion

Les mesures du rayonnement global coïncident avec les valeurs calculées par les différents modèles.

L'évaluation des modèles choisis sur une base graphique et statistique montre que les meilleurs résultats sont donnés par le modèle de Perez.

Néanmoins des données recueillies sur une durée plus longue aurait pu nous aider à expliquer certaines lacunes essentiellement pour le rayonnement direct.

C'est un facteur très important particulièrement dans les dispositifs de concentration

CONCLUSION GENERALE

Les données collectées des irradiations solaires sur le site de Bouzaréah durant une période de sept mois nous ont révélé la fréquence des mesures pour les rayonnement solaires reçus.

- Le nombre de mesures est très important pour les faibles valeurs du rayonnement diffus et nettement inférieures ailleurs ; il faut noter aussi que le rayonnement diffus dépasse rarement la valeur de $450 \text{ (W/m}^2\text{)}$
- Pour le rayonnement global la fréquence des mesures est quasi constante dans la plage $200\text{-}800\text{(W/m}^2\text{)}$; et la valeur maximale du rayonnement global est de $1000\text{(W/m}^2\text{)}$.
- La fréquence des mesures du rayonnement direct est très importante pour les valeurs inférieures à $200\text{(W/m}^2\text{)}$; ailleurs elle est quasiment constante et faible.

Pour le calcul du rayonnement diffus Nous avons choisi

- le modèle Isotropique de première génération
- les modèles de Hay et de Reindl de la seconde génération qui tiennent compte de la présence de nuages dans le ciel et de leur effet sur la diffusion du rayonnement
- Le modèle de troisième génération de Gueymard et de Perez, qui tiennent compte de tout l'aspect de la diffusion du rayonnement.

Les écarts absolus obtenus entre les valeurs expérimentales et les valeurs prédites par les différents modèles de calcul du rayonnement diffus et pour le rayonnement global témoignent de la bonne approximation des données expérimentales avec les calculs.

L'écart absolu du rayonnement direct calculé et mesuré est très important essentiellement pour les valeurs inférieures à $500\text{(W/m}^2\text{)}$; ailleurs il est quasiment constant.

On remarque aussi que le rayonnement direct mesuré contribue de façon significative dans la région où le rayonnement global est important. En dessous des 500W/m^2 le rayonnement diffus mesuré contribue plus que le rayonnement direct, et leur proportion est partagée aux environs des 500W/m^2

L'étude des écarts relatifs obtenus pour les différents rayonnements est intéressante puisque qu'elle montre les modèles qui surestiment ou sous estiment rayonnement Global

- les modèles de première et seconde génération sous-estiment le rayonnement diffus.
Le modèle de Perez a tendance à une légère surestimation du rayonnement.
- Le modèle de Perez approxime le mieux le rayonnement global, Les autres modèles ont tendance à surestimer spécialement dans la région supérieure à 300W/m^2 .
- Le rayonnement direct calculé est surestimé pour les valeurs inférieures à $200(\text{W/m}^2)$ et sous estimé largement dans la plage $200\text{-}500(\text{W/m}^2)$; ailleurs il est sous estimé mais faiblement.

Le modèle de Perez contient une procédure qui permet de compenser l'erreur sur le calcul du rayonnement direct tout en approchant au mieux le rayonnement diffus. C'est l'unique modèle à surestimer de façon globale le rayonnement diffus, alors que la méthode géométrique sous estime le rayonnement direct. Ce qui crée un effet de compensation global.

La majorité des travaux pour le calcul du rayonnement incliné concernent l'estimation du rayonnement diffus. Dans cette étude, on remarque que l'élément qui introduit énormément d'erreur dans les calculs est l'estimation du rayonnement direct sur le plan incliné. Cette grandeur est assez difficile à mesurer expérimentalement, elle ne peut qu'être calculée indirectement.

Perspectives

Il est intéressant d'approfondir les recherches sur l'estimation du rayonnement direct.

Une connaissance plus approfondie de l'influence de ce paramètre est nécessaire. Il faut approfondir les expérimentations avec plus de données et imaginer d'autres dispositifs expérimentaux permettant d'obtenir le rayonnement direct incident sur une surface.

Pour le moment les recherches sur le rayonnement direct sont quasi inexistantes. Les formules utilisées sont issues de la simple géométrie

REFERENCES

- [1] M. Iqbal .Une introduction au rayonnement solaire, Academic Press, New York (1983)
- [2] J.A. Duffie and W.A. Beckman, ‘Solar Engineering of Thermal Processes’, 3rd Ed. JohnWiley and Sons, 2006.
- [3] T.Muneer. Solar Radiation and Daylight Models. Elsevier Butterworth-Hermann Edition 2004 (chapitre 1)
- [4] T.Muneer. Solar Radiation and Daylight Models . Elsevier Butterworth-Hermann Edition 2004 (chapitre 4.)
- [5] B.Y.H. Liu et R.C.Jordan. L’enseillement quotidien sur des surfaces inclinées vers l’équateur, *Trans ASHRAE* 67 (1962), p. 529.
- [6] Chanchal Kumar Pandey , A.K. Katiyar . A note on diffuse solar radiation on a tilted surface .Solar Energy 2009; volume 34 issue 11; pages 1764-1769.
- [7] T.M. Klucher,. Evaluation of models to predict insolation on tilted surfaces
Solar Energy (1979), volume 23; issue 2, pages. 111-114.
- [8] John E. Hay. Calculation of monthly mean solar radiation for horizontal and inclined surfaces .
Department of Geography, The University of British Columbia, Vancouver, B.C., Canada
Solar Energy 1979;volume 23 issue 4;pages 301-307.
- [9] Hay JE, Davies JA. Calculation of the solar radiation incident on an inclined surface. First Canadian Solar Radiation Data Workshop 1980.
- [10] Ralph C. Temps, K.L. Coulson .Solar radiation incident upon slopes of different orientations.
Solar Energy 1977.19(2):179-184.
- [11] Perez R, Ineichen P, Seals R, Michalsky J, Stewart R. Modeling daylight availability and irradiance components from direct and global irradiance.
Solar Energy 1990;44(5):pages 271-289.

- [12] Parishwad GV, Bhardwaj RK, Nema VK. Estimation of hourly solar radiation for india.
Renewable Energy 1997;12(3):303-313.
- [13] Gh. A. Kamali, I. Moradi and A. Khalili Estimating .Solar radiation on tilted surfaces with various orientations: a study case in Karaj (Iran).
Theor Appl climatologie 84 (2006), pp. 235-241.
- [14] Siala FMF. Stochastic design of solar energy systems.
Applied Energy 1995;52(2-3):141-152.
- [15] Yorukoglu M, Celik AN. A critical review on the estimation of daily global solar radiation from sunshine duration.
Energy Conversion and Management 2006;47(15-16):2441-2450.
- [16] Al-Riahi M, Al-Hamdani N, Tahir K. An empirical method for estimation of hourly diffuse fraction of global radiation.
Renewable Energy 1992;2(4-5):451-456.
- [17] Nijegorodov N, Devan KRS, Jain PK, Carleson S. Atmospheric transmittance models and an analytical method to predict the optimum slope of an absorber plate, variously oriented at any latitude.
Renewable Energy 1994;4(5):529-543.
- [18] Tiris M, Tiris C. Optimum collector slope and model evaluation: case study for gebze, turkey.
Energy Conversion and Management 1998;39(3-4):167-172.
- [19] J. Bilbao, A. De Miguel, A. Ayuso, et J.A. Franco, "Iso-radiation maps for tilted surfaces in the Castile and Leon region, Spain .
Energy Conversion and Management, vol. 44, Juin. 2003, p. 1575-1588.
- [20] Christian A. Gueymard and Daryl R. Myers .Chapter 20 Validation and Ranking Methodologies for Solar Radiation Models.
Modeling Solar Radiation at the Earth's Surface Viorel Badescu (Ed.).
- [21] D.T. Reindl, W.A. Beckman and J.A. Duffie, Evaluation of hourly tilted surface radiation models.
Sol Energy, 45 (1990), p. 9–17.
- [22] .A.A. El-Sebaili, F.S. Al-Hazmi, A.A. Al-Ghamdi and S.J. Yaghmour, Global, direct and diffuse solar radiation on horizontal and tilted surfaces in Jeddah, Saudi Arabia.
Appl Energy, 87 (2010), pp. 568–576.

- [23] Chanchal Kumar Pandey , A.K. Katiyar .A comparative study of solar irradiation models on various inclined surfaces for India .
Energy Volume, April 2011, Pages 1455-1459.
- [24] Indira Karakoti Bimal Pande, Kavita Pandey .Evaluation of different diffuse radiation models for Indian stations and predicting the best fit model . Renewable and Sustainable Energy Reviews. Volume 15, Issue 5, June 2011, Pages 2378-2384
- [25] Roberto Grena An algorithm for the computation of the solar position.
Solar Energy Volume 82, Issue 5, May 2008, Pages 462-470.
- [26] Manuel Blanco-Muriel' Diego C. Alarcón-Padilla' , Teodoro López-Moratalla' , Martín Lara-Coira .Computing the solar vector .
Solar Energy Volume 70, Issue 5, 2001, Pages 431-441.
- [27] A.M. Muzathik' , M.Z. Ibrahim K.B. Samo, W.B. Wan Nik. Estimation of global solar irradiation on horizontal and inclined surfaces based on the horizontal measurements.
Energy Volume 36, Issue 2, February 2011, Pages 812-818.
- [28] Kadir Bakirci . Correlations for estimation of daily global solar radiation with hours of bright sunshine in Turkey.
Energy Volume 34, Issue 4, April 2009, Pages 485-501.
- [29] A.H. Maghrabi .Parameterization of a simple model to estimate monthly global solar radiation based on meteorological variables, and evaluation of existing solar radiation models for Tabouk, Saudi Arabia .
Energy Conversion and Management Volume 50, Issue 11, November 2009, Pages 2754-2760.
- [30] Efim G. Evseev, Avraham I. Kudish . The assessment of different models to predict the global solar radiation on a surface tilted to the south.
Solar Energy, March 2009, Pages 377-388.
- [31] Efim G. Evseev, Avraham I. Kudish An assessment of a revised Olmo et al model to predict solar global radiation on a tilted surface at Beer Sheava, .
Solar Energy, January 2009, Pages 112-119.
- [32] Andrea Padovan, Davide Del Col Measurement and modeling of solar irradiance components on horizontal and tilted planes.
Energy Volume 84, Issue 12, December 2010, Pages 2068-2084.
- [33] Christian A. Gueymard Direct and indirect uncertainties in the prediction of tilted irradiance for solar engineering applications .
Solar Energy Volume 83, Issue 3, March 2009, Pages 432-444.

REFERENCES

- [34] R. Posadillo R. López Luque Evaluation of the performance of three diffuse hourly irradiation models on tilted surfaces according to the utilizability concept. Energy Conversion and Management Volume 50, Issue 9, September 2009, Pages 2324-2330.
- [35] D.H.W. Li T.N.T. Lam, V.W.C. Chu Relationship between the total solar radiation on tilted surfaces and the sunshine hours in Hong Kong. Solar Energy Volume 82, Issue 12, December 2008, Pages 1220-1228.
- [36] Jonathan K. Yohanna Isaac N. Itodo Victor I. Umogbai . A model for determining the global solar radiation for Makurdi, Nigeria. Renewable Energy Volume 36, Issue 7, July 2011, Pages 1989-1992.
- [37] Tian Pau Chang . The Sun's apparent position and the optimal tilt angle of a solar collector in the northern hemisphere. Solar Energy Volume 83, Issue 8, August 2009, Pages 1274-1284.
- [38] Ali Mohammad Noorian Isaac Moradi , Gholam Ali Kamali . Evaluation of 12 models to estimate hourly diffuse irradiation on inclined surfaces . Renewable Energy Volume 33, June 2008, Pages 1406-1412.
- [39] Kadir Bakirci . Models of solar radiation with hours of bright sunshine: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews Volume 13, Issue 9, December 2009, Pages 2580-2588.
- [40] Yingni Jiang . Estimation of monthly mean daily diffuse radiation in China. Energy Volume, September 2009, Pages 1458-1464.
- [41] <http://www.ines-solaire.com/solpv/photo/photo1.gif> (22 / 10 /2011 à 18h)
- [42] http://sciencesphysiques.acdijon.fr/astonomie/lexique/lexique_astro/c/images/coord_horaires.gif (22/10/2011)
- [43] Gisement solaire – Alain Ricaud – Septembre 2009 .
- [44] http://herve.silve.pagesperso-orange.fr/images/reperage_point_local.gif (22/10/2011)
- [45] <http://fr.wikipedia.org/wiki/Fichier:WorldMapLongLat-eq-circles-tropics-non.png>
- [46] http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/0/02/Profil_temperature_atmosphere.png (23/10/2001 à 14h30)
- [47] W. Palz, Solar (Electricity, UNESCO, Butterworths, 1978).
- [48] http://www.tahiti-agenda.com/images/descriptionimages/image_5520.jpg
- [49] <http://www.intervent.fr/intersolaire/images/rayonnement.png>

Annexe1 - Programme de calcul du rayonnement incliné

```
PROGRAM SLOPE IRRADIANCE
implicit double precision (A-H,O-Z)
C Programme de calcul du rayonnement incliné selon cinq modèles
Character*1 Anum
& format(A1)
DOUBLE PRECISION EPSBINS(7)
DOUBLE PRECISION F11R(8), F12R(8), F13R(8)
DOUBLE PRECISION F21R(8), F22R(8), F23R(8)
DOUBLE PRECISION B2
DOUBLE PRECISION Z,ZH

PI=4*DATAN(1.d0)
DTOR=PI/180.d0

YLAT=36.798d0
YLONG=-3.03d0
YRLONG=-15d0

c Donner l'azimuth et l'inclinaison de la surface
c AZIMUTH - NORD=0, EST=90, SUD=180, OUEST=270
c Inclinaison de la surface - VERTICALE = 90
AZI=180
TLT=YLAT

c 'ALBEDO'
RHO=0.2
```

```
OPEN(12,file='annees.dat')
OPEN(13,file='outdata.dat')
DO j=1,500000

read(12,*,END=12) IYR,IMT,IDY,IHR,IME,GRAD,DRAD,Sincline,direc
& ,Angazth,AngZen,temperature,Humid,VitVent,Pression
if (DRAD.ge.GRAD) DRAD=GRAD

C  correction des minutes
IME=IME+3

C  ignore les donnees inf à 1w/m²
if ((GRAD.le.1.).or.(AngZen.eq.90)) cycle

C  Calcul GHA360, DEC
XLCT=(1.0*IHR)+(1.0*IME/60.0)
UT=XLCT+(YRLONG/15.0)
IF (IMT.GT.2) THEN
IYR1=IYR
IMT1=IMT-3
ELSE
IYR1=IYR-1
IMT1=IMT+9
ENDIF
INTT1=INT(30.6*IMT1+0.5)
INTT2=INT(365.25*(IYR1-1976))
SMLT=((UT/24.0)+IDY+INTT1+INTT2-8707.5)/36525.0
EPSILN=23.4393-0.013*SMLT
CAPG=357.528+35999.050*SMLT
IF(CAPG.GT.360.0) THEN
G360=CAPG-INT(CAPG/360.0)*360.0
```

ELSE

G360=CAPG

ENDIF

CAPC=1.915*SIN(G360*DTOR)+0.020*SIN(2*G360*DTOR)

CAPL=280.460+36000.770*SMLT+CAPC

IF(CAPL.GT.360.0) THEN

XL360=CAPL-INT(CAPL/360.0)*360.0

ELSE

XL360=CAPL

ENDIF

ALPHA=XL360-2.466*SIN(2*XL360*DTOR)+0.053*SIN(4*XL360*DTOR)

GHA=15.0*UT-180.0-CAPC+XL360-ALPHA

IF(GHA.GT.360.0) THEN

GHA360=GHA-INT(GHA/360.0)*360.0

ELSE

GHA360=GHA

ENDIF

DEC=ATAN(TAN(EPSILN*DTOR)*SIN(ALPHA*DTOR))/DTOR

C Calcul de l'angle horaire

SHA=GHA360-(YLONG)

C Calcul du temps solaire

AST=12.0+(SHA/15.0)

C Calcul de la hauteur du soleil

TRM111=SIN(YLAT*DTOR)*SIN(DEC*DTOR)

TRM112=COS(YLAT*DTOR)*COS(DEC*DTOR)*COS((SHA+180.0)*DTOR)

TRM11=TRM111-TRM112

SOLALT=ASIN(TRM11)/DTOR

C Ignore les cas où la hauteur du soleil est inférieure à 1 degré
if (SOLALT.lt.1) cycle

C Calcul de l'azimut du soleil

```
TRM121=COS(YLAT*DTOR)*TAN(DEC*DTOR)
TRM122=SIN(YLAT*DTOR)*COS((SHA+180.0)*DTOR)
TRM12=TRM121+TRM122
TRM14=TRM12*COS(DEC*DTOR)/COS(SOLALT*DTOR)
SOLAZM=ACOS(TRM14)/DTOR
IF(SHA.GT.0.0) THEN
SOLAZM=360.0-SOLAZM
ENDIF
```

C Calcul de l'angle d'incidence

```
TRM15=COS(TLT*DTOR)*SIN(SOLALT*DTOR)+SIN(TLT*DTOR)*COS(SOLALT
&*DTOR)*COS((SOLAZM-AZI)*DTOR)
SOLINC=ACOS(TRM15)/DTOR
```

C Calcul du nombre de jour

```
DN1=(IDY+INTT1+INTT2)
IMTX=1
IYR1=IYR-1
IMT1=IMTX+9
INTT1=INT(30.6*IMT1+0.5)
INTT2=INT(365.25*(IYR1-1976))
DN2=(INTT1+INTT2)
DN=DN1-DN2
```

C Calcul du rayonnement horizontal extraterrestre & kt

```
ERAD=1367.0*(1.+0.033*COS(0.0172024*DN))*SIN(SOLALT*DTOR)
```

TKT=GRAD/ERAD

C Rayonnement Direct

IF(SOLINC.LT.90.0) THEN

BSRAD=(GRAD-DRAD)*COS(SOLINC*DTOR)/SIN(SOLALT*DTOR)

ELSE

BSRAD=0.0

ENDIF

C Rayonnement Réfléchi

RSRAD=RHO*GRAD*SIN(TLT*DTOR/2.0)**2.

C Diffu modèle ISOTROPIQUE

TLTISO=(COS(TLT*DTOR/2.))**2.)

SISO=TLTISO*DRAD

C Diffu modèle de HAY

CLRFRA=(GRAD-DRAD)/ERAD

TLTFAC=(1.0-CLRFRA)*(COS(TLT*DTOR/2.))**2.)

IF(SOLINC.LT.90.0) THEN

TLTFAC=(CLRFRA*TRM15/TRM11)+TLTFAC

ENDIF

SHAY=TLTFAC*DRAD

C Diffu modèle de REINDL

CLRFRA=(GRAD-DRAD)/ERAD

REINDF=SQRT((GRAD-DRAD)/GRAD)

TLTFAC=(1.0-CLRFRA)*(COS(TLT*DTOR/2.))**2.)*

&(1.+REINDF*SIN(TLT*DTOR/2)**3)

IF(SOLINC.LT.90.0) THEN

TLTFAC=(CLRFRA*TRM15/TRM11)+TLTFAC

ENDIF

SREIND=TLTFAC*DRAD

C Diffu modèle de GUEYMARD

H01=SOLALT*0.01

GA0=-0.897-3.364*H01+(3.96*H01**2.)-1.909*H01**3

GA1=4.448-12.962*H01+(34.601*H01**2)-48.784*H01**3+(27.511*H01**4)

GA2=-2.77+9.164*H01-(18.876*H01**2.)+23.776*H01**3-(13.014*H01**4)

GA3=0.312-0.217*H01-(0.805*H01**2.)+0.318*H01**3

CFS=(1.0-(0.2249*SIN(TLT*DTOR)**2)+(0.1231*SIN(2.0*TLT*DTOR))

&-0.0342*SIN(4.0*TLT*DTOR))/(1.0-0.2249)

CGH=0.408-0.323*H01+(0.384*H01**2.)-0.17*H01**3

CRD0=EXP(GA0+GA1*TRM15+(GA2*TRM15**2.)+GA3*TRM15**3.)

CRD0=CRD0+CFS*CGH

IF((DRAD/GRAD).LE.0.227) THEN

CAPY=6.6667*(DRAD/GRAD)-1.4167

ELSE

CAPY=1.2121*(DRAD/GRAD)-0.1758

ENDIF

CNPT=MAX(MIN(CAPY,1.0),0.0)

SMLB=0.5+CNPT

CAPBG=2.*SMLB/(PI*(3.+2.*SMLB))

CRD1=(COS(TLT*DTOR/2.)**2)+CAPBG*(SIN(TLT*DTOR)-(TLT*DTOR)

&*COS(TLT*DTOR)-PI*SIN(TLT*DTOR/2.):**2)
SGUEYM=DRAD*((1.0-CNPT)*CRD0+CNPT*CRD1)

C Diffu modèle de PEREZ

DATA F11R / -0.0083117, 0.1299457, 0.3296958, 0.5682053,
&0.8730280, 1.1326077, 1.0601591, 0.6777470 /
DATA F12R / 0.5877285, 0.6825954, 0.4868735, 0.1874525,
&-0.3920403, -1.2367284, -1.5999137, -0.3272588 /
DATA F13R / -0.0620636, -0.1513752, -0.2210958, -0.2951290,
&-0.3616149, -0.4118494, -0.3589221, -0.2504286 /
DATA F21R / -0.0596012, -0.0189325, 0.0554140, 0.1088631,
&0.2255647, 0.2877813, 0.2642124, 0.1561313 /
DATA F22R / 0.0721249, 0.0659650, -0.0639588, -0.1519229,
&-0.4620442, -0.8230357, -1.1272340, -1.3765031 /
DATA F23R / -0.0220216, -0.0288748, -0.0260542, -0.0139754,
&0.0012448, 0.0558651, 0.1310694, 0.2506212 /
DATA EPSBINS / 1.065, 1.23, 1.5, 1.95, 2.8, 4.5, 6.2 /
B2 = 5.534D-6
G=GRAD
B=(GRAD-DRAD)/TRM11
Z=(90.0-SOLALT)*DTOR
SLOPE=TLT*DTOR
XPINC=SOLINC*DTOR
ZENITH =Z/DTOR
ZH = MAX(TRM11, 0.0871557)
AIRMASS = 1.0 / (TRM11 + 0.15 * (93.9 - ZENITH)** (-1.253))
DELTA = DRAD * AIRMASS / 1367.0
T = ZENITH**3.0
EPS = (B + DRAD) / DRAD
EPS = (EPS + T * B2) / (1.0 + T * B2)

DO 70001 I = 1,8

IF ((I.EQ. 8) .OR. (EPS .LE. EPSBINS(I))) GOTO 70002

70001 CONTINUE

70002 F1 = MAX(0.0d0, F11R(I) + F12R(I) * DELTA + F13R(I) * Z)

F2 = F21R(I) + F22R(I) * DELTA + F23R(I) * Z

A = (1.0-F1)*(1.0 + COS(SLOPE)) / 2.0

B1 = F1*MAX(TRM15,0.0)/ZH

C=F2*SIN(SLOPE)

SPER = DRAD*(A+B1+C)

C Impression des résultats

C Tout les rayonnements sont en W/m²

Write (13,'(18F10.2,I8,4I5)') ERAD ! Rayonnement extraterrestre

&,BSRAD ! Rayonnement Direct sur plan incliné

&,RSRAD ! Rayonnement Réfléchi sur plan incliné

&,SISO+BSRAD+RSRAD ! Global incliné modèle Isotropique

&,SHAY+BSRAD+RSRAD ! Global incliné modèle Hay

&,SREIND+BSRAD+RSRAD ! Global incliné modèle Reindl

&,SGUEYM+BSRAD+RSRAD ! Global incliné modèle Gueymard

&,SPER+BSRAD+RSRAD ! Global incliné modèle Perez

&,Sincline ! Global incliné mesuré

&,(GRAD-DRAD)/SIN(SOLALT*DTOR) ! Direct calculé

&,DIREC ! Direct mesuré

&,DRAD ! Diffus horizontal

&,GRAD ! Global Horizontal

&,SOLAZM-180.d0 ! Azimuth du soleil calculé

&,Angazth ! Angle azimuth station de mesure

&,ZENITH ! Angle Zenithal calculé

```
&,AngZen          ! Angle Zenithal station de mesure
&,SOLINC          ! Angle d'incidence du soleil sur la surface
&,IYR,IMT,IDY,IHR,IME-3    ! Annee mois jour heure minute
ENDDO
12 close(12)
close(13)
END
```

Annexe 2 : Programme pour le calcul d'erreurs

Program calcul_erreur

implicit none

Real*8 ERAD, BSRAD, RSRAD, SISO, SHAY, SREIND, SGUEYM, SPER, SRAD,
BRAD,

&DIREC,DRAD, SOLAZM,Angazth,ZENITH,AngZen,GRAD,SOLINC,PI,DTOR

Integer IYR, IMT, IDY, IHR, IME

Real*8 ecart1(120),ecart2(120),ecart3(120),ecart4(120),ecart5(120)

&,ecart6(120),dir(120),dif(120),dir2(120)

Real*8 ecar1(120),ecar2(120),ecar3(120),ecar4(120),ecar5(120)

&,ecar6(120)

Integer i,j,k,N(120),Nb(120)

PI=4*DATAN(1.d0)

DTOR=PI/180.d0

ecart1=0

ecart2=0

ecart3=0

ecart4=0

ecart5=0

ecart6=0

N=0

Nb=0

C K est le pas de l'intervalle minimum 10 maximum 1200

K=20

OPEN(12,file='outdata.dat')

DO j=1,500000

```
read(12,*,END=12)
&,ERAD      ! Rayonnement extraterestre (1)
&,BSRAD     ! Rayonnement Direct sur plan incline (2)
&,RSRAD     ! Rayonnement Reflechi sur plan incline (3)
&,SISO      ! Global incline modele Isotropique (4)
&,SHAY      ! Global incline modele Hay (5)
&,SREIND    ! Global incline modele Reindl (6)
&,SGUEYM    ! Global incline modele Gueymard (7)
&,SPER      ! Global incline modele Perez (8)
&,SRAD      ! Global incline mesure (9)
&,BRAD      ! Direct calcule (10)
&,DIREC     ! Direct mesure (11)
&,DRAD      ! Diffus horizontal (12)
&,GRAD      ! Global Horizontal (13)
&,SOLAZM    ! Azimuth du soleil calcule (14)
&,Angazth   ! Angle azimuth station de mesure (15)
&,ZENITH    ! Angle Zenithal calcule (16)
&,AngZen    ! Angle Zenithal station de mesure (17)
&,SOLINC    ! Angle d'incidence du soleil sur la surface
&,IYR,IMT,IDY,IHR,IME! Annee mois jour heure minute
```

```
C Selection des donnees oÃ l'Ãcart entre le diffus et global est inf a 15w
C on compare le diffus calculÃ, le global inclinÃ est principalement consituÃ de diffus
C if (abs(GRAD-DRAD).gt.10) cycle
C print *,SRAD,SISO,SHAY,SREIND,SGUEYM,SPER,BRAD,DIREC
C Selection des donnees
```

```
DO i=1,(1200/k)
if ((SRAD.ge.(i-1)*k).and.(SRAD.lt.i*k)) THEN
ecart1(i)=ecart1(i)+abs(SRAD-SISO)/SRAD
```

```
ecart2(i)=ecart2(i)+abs(SRAD-SHAY)/SRAD
ecart3(i)=ecart3(i)+abs(SRAD-SREIND)/SRAD
ecart4(i)=ecart4(i)+abs(SRAD-SGUEYM)/SRAD
ecart5(i)=ecart5(i)+abs(SRAD-SPER)/SRAD
if ((abs(DIREC-BRAD)/DIREC).lt.10)
&ecart6(i)=ecart6(i)+abs(DIREC-BRAD)/DIREC
ecar1(i)=ecar1(i)+(SRAD-SISO)/SRAD
ecar2(i)=ecar2(i)+(SRAD-SHAY)/SRAD
ecar3(i)=ecar3(i)+(SRAD-SREIND)/SRAD
ecar4(i)=ecar4(i)+(SRAD-SGUEYM)/SRAD
ecar5(i)=ecar5(i)+(SRAD-SPER)/SRAD
if ((abs(DIREC-BRAD)/DIREC).lt.10)
&ecar6(i)=ecar6(i)+(DIREC-BRAD)/DIREC
dir(i)=dir(i)+DIREC
if (SOLINC.gt.90.d0) SOLINC=90.d0
dif(i)=dif(i)+(SPER-BRAD*COS(SOLINC*DTOR))
dir2(i)=dir2(i)+BRAD*COS(SOLINC*DTOR)
N(i)=N(i)+1
EndIf
ENDDO
DO i=1,(1200/k)
if ((DIREC.ge.(i-1)*k).and.(DIREC.lt.i*k)) Nb(i)=Nb(i)+1
ENDDO
ENDDO
12 close(12)
ecart1=ecart1/N*100
ecart2=ecart2/N*100
ecart3=ecart3/N*100
ecart4=ecart4/N*100
ecart5=ecart5/N*100
```

```
ecart6=ecart6/N*100
ecar1=ecar1/N*100
ecar2=ecar2/N*100
ecar3=ecar3/N*100
ecar4=ecar4/N*100
ecar5=ecar5/N*100
ecar6=ecar6/N*100
dir=dir/N
dif=dif/N
dir2=dir2/N
open(12,file='out1.dat')
open(13,file='out2.dat')
Do i=1,(1200/k)
write(12,'(I8,5G12.4,I8,4G12.4,I8)') i*k-k/2,ecart1(i),ecart2(i)
&,ecart3(i),ecart4(i),ecart5(i),N(i),dir(i),ecart6(i),dif(i)
&,dir2(i),Nb(i)
write(13,'(I8,5G12.4,I8,2G12.4)') i*k-k/2,ecar1(i),ecar2(i)
&,ecar3(i),ecar4(i),ecar5(i),N(i),dir(i),ecar6(i)
EndDo
close(12)
close(13)
END
```