

## Etude statistique du rayonnement solaire à Alger

A. M'Raoui<sup>1\*</sup>, S. Mouhous<sup>1</sup>, A. Malek<sup>1†</sup> et B. Benyoucef<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Division Energie Solaire Photovoltaïque,  
Centre de Développement des énergies renouvelables  
B.P. 62, Route de l'Observatoire, Bouzaréah, Alger, Algérie

<sup>2</sup> Unité de Recherche en Matériaux et Energies Renouvelables, Faculté des Sciences,  
Université Abou Bakr Belkaïd, B.P. 199, Tlemcen, Algérie

(reçu le 10 Novembre 2011 – accepté le 29 Décembre 2011)

**Résumé** - *Quantifier le rayonnement solaire sur un lieu donné est nécessaire pour l'ingénieur. Tout dimensionnement nécessite cette donnée sous forme horaire, mensuelle ou annuelle. Différents modèles permettant de calculer le rayonnement sur plan incliné à partir des mesures standards à l'horizontale ont été élaborés. Dans ce travail, une évaluation de cinq modèles a été effectuée, il en ressort que le modèle de Perez approche le mieux les mesures expérimentales. C'est le modèle le plus complexe qui approche aussi bien le rayonnement diffus que le rayonnement global sur plan incliné. Il ressort de cette étude que l'estimation géométrique du rayonnement direct sur plan incliné introduit le plus d'erreurs sur le calcul du rayonnement global incliné. Il est nécessaire d'approfondir les recherches sur les formules de calculs.*

**Abstract** - *Quantify the solar radiation on a given place is necessary for the engineer. Any design need this data in hourly, monthly or annual form. Various models making it possible to calculate the radiation on inclined surface starting from standards measurements at horizontal were elaborated. In this work an evaluation of 5 models was carried out, this reveals that the model of Perez has the lowest error. It is the most complex model which approaches as well the diffuse radiation and the total radiation on tilted level. It comes out from this study that the geometrical estimate of the direct radiation on tilted level introduces the most errors on calculation of the tilted total radiation. It is necessary to look further into research on the formulas of computations.*

**Mots clés:** Rayonnement global – Diffus – Direct - Modèles

### 1. INTRODUCTION

Avec l'émergence d'une conscience collective voulant limiter les dégâts des énergies fossiles sur l'environnement et freiner le réchauffement climatique, un intérêt pour les énergies renouvelables se développe de plus en plus. Ces sources d'énergie ont un impact minimal sur l'environnement et contribuent à un développement durable.

Les applications basées sur l'énergie solaire sont plus coûteuses que leurs équivalents utilisant les énergies fossiles. Un dimensionnement optimum réduisant le coût global est recommandé afin d'éviter tout surdimensionnement inutile [1].

Pour dimensionner un système basé sur l'énergie solaire, aussi bien photovoltaïque que thermique, il est nécessaire de connaître la quantité d'énergie que reçoit le système de conversion [1]. C'est à partir de cette donnée et de la demande en énergie que la taille de chaque élément du système puisse être optimisée.

---

\* mraoui@cder.dz

† amalek@cder.dz

Des mesures expérimentales sont effectuées sur site pour quantifier l'énergie solaire reçue sur un plan horizontal et incliné à la latitude du lieu. Parfois uniquement, la donnée horizontale est disponible ou peut être estimée avec une précision relative. Il est donc nécessaire de calculer l'énergie reçue sur le plan incliné.

Le calcul du rayonnement global sur plan incliné nécessite la connaissance du rayonnement diffus sur le même plan. Diverses corrélations ont été développées dans ce but.

On distingue le modèle de première génération, isotropique, qui suppose que le rayonnement se diffuse de manière uniforme dans le ciel.

Moon *et al.* [3] ont démontré le caractère anisotropique du rayonnement, basé sur leurs observations, et des modèles de seconde génération ont vu le jour. Le rayonnement diffus est divisé principalement en trois composantes, le diffus de l'horizon, le diffus du ciel et le diffus de la couronne solaire [4].

Les modèles sont plus élaborés et tiennent compte d'une répartition statistique, ils permettent de quantifier le rayonnement diffus incliné avec une plus grande précision.

Dans ce papier, une analyse de cinq modèles de prédiction du rayonnement diffus sur plan incliné sera effectuée. Ce travail a pour objectif de mieux comprendre le comportement des différents modèles pour le site d'étude. C'est un travail préliminaire qui permet de déterminer les points clés de chaque modèle pour ouvrir la voie à des recherches plus approfondies dans le domaine.

## 2. CALCUL DU RAYONNEMENT SUR PLAN INCLINE

Afin de calculer le rayonnement solaire sur une surface inclinée, il est nécessaire d'estimer ses différents composants direct, diffus et réfléchi sur cette surface. Les rayonnements direct et réfléchi sont obtenus par simple calcul géométrique. Le rayonnement direct sur une surface est calculé à partir de la position géométrique du vecteur soleil par rapport à la surface.

Le calcul du rayonnement réfléchi est basé sur visibilité de l'horizontal par rapport à la surface. L'estimation du rayonnement diffus est un peu plus compliqué selon le modèle à utiliser, vu le caractère anisotropique de ce dernier.

La procédure de calcul commence par l'estimation de la position du soleil dans l'espace et le calcul des angles azimut et élévation du soleil. Ces angles permettent par la suite de calculer les angles d'incidence sur la surface d'étude.

### 2.1 Calcul de la position du soleil

La connaissance de la position du soleil dans le ciel est indispensable pour une bonne conception des systèmes solaires. Les paramètres géométriques les plus importants sont la déclinaison ( $\delta$ ), la hauteur du soleil ( $\alpha$ ) et l'azimut solaire ( $a$ ).

La terre tourne autour d'elle-même, l'axe de rotation a une inclinaison de  $23.45^\circ$  par rapport au plan orbital terre-soleil. L'angle entre la ligne terre-soleil (à partir de leurs centres) et le plan équatorial est appelé déclinaison solaire.

La déclinaison solaire varie de  $-23.45^\circ$  le 21 Décembre à  $+23.45^\circ$  le 21 Juin. Afin d'estimer la déclinaison de la terre, l'équation la plus simple a été développée par Cooper [5]:

$$\delta = 23.45 \sin\left(360 \times \frac{284 + N}{365}\right) \quad (1)$$

Si une meilleure précision est requise, l'équation de Spencer [6] est utilisée:

$$\delta = \frac{180}{\pi} \times \left( 0.006918 - 0.399912 \cos \Gamma + 0.070257 \sin \Gamma - 0.006758 \cos 2\Gamma \right. \\ \left. + 0.000907 \sin 2\Gamma - 0.00269 \cos 3\Gamma - 0.00148 \sin 3\Gamma \right) \quad (2)$$

$$\text{avec, } \Gamma = \frac{360(n-1)}{365}$$

L'équation de Spencer estime la déclinaison avec un écart maximal de 0.0006 radian.

Pour calculer la hauteur du soleil et son azimut, l'équation du temps est nécessaire.

Le midi solaire est le moment où le soleil est à sa hauteur maximale. A ce moment-là, il se positionne dans la direction Sud ou Nord, selon qu'on se trouve dans l'hémisphère Nord ou Sud. Le midi solaire diffère du midi local. Cette différence est appelée équation du temps, et elle varie en fonction du jour et de la longitude.

$$E = 9.87 \sin\left(720 \times \frac{N-81}{365}\right) - 7.53 \cos\left(360 \times \frac{N-81}{365}\right) - 1.5 \sin\left(360 \times \frac{N-81}{365}\right) \quad (3)$$

Cette expression est utilisée pour convertir le temps standard local au temps solaire vrai TSV.

$$\text{TSV} = T_{\text{st}} + \frac{1}{60} \times E + \frac{1}{15} \times (L_{\text{st}} - L) \quad (4)$$

$T_{\text{st}}$  représente le temps standard ou officiel, duquel on retranche une heure, si l'heure avancée d'été est en vigueur.  $L$  est la longitude du lieu.

La longitude méridienne standard  $L_{\text{st}}$  peut être calculée par l'équation.

$$L_{\text{st}} = 15 \text{ FH}_{\text{loc}} \quad (5)$$

$\text{FH}_{\text{loc}}$  représente le fuseau horaire du lieu considéré.

L'angle horaire est mesuré à partir du midi solaire, positif s'il est avant-midi et négatif après-midi.

$$\omega = 15 (12 - \text{TSV}) \quad (6)$$

Spencer [6] donne une formule plus précise de l'équation du temps avec une erreur maximale de 0.0025 radian, soit l'équivalent de 35 secondes d'arc:

$$E = 229.18 \times \left( 0.000075 + 0.001868 \cos \Gamma - 0.032077 \sin \Gamma - 0.014615 \cos 2\Gamma \right. \\ \left. - 0.04089 \sin 2\Gamma \right) \quad (7)$$

La position du soleil est exprimée en fonction de l'angle azimut solaire  $a$ , angle que fait la projection de la direction du soleil avec la direction du sud; cet angle est mesuré positivement vers l'Ouest et l'angle de l'altitude solaire  $h$ , angle que fait la direction du

soleil avec sa projection. Le complément de  $h$  ou l'angle que fait la direction du soleil avec la verticale est appelé angle zénithal ( $\theta_z$ ).

Les formules, pour estimer les deux grandeurs en fonction du lieu et du temps sont les suivantes:

$$\sin h = \sin \lambda \times \sin \delta + \cos \lambda \times \cos \delta \times \cos \omega \quad (8)$$

$\lambda$  est la latitude locale.

L'azimut est calculé par les relations suivantes:

$$\begin{aligned} a &= \sin^{-1} \times \left( \frac{\cos \delta \times \sin \omega}{\cos h} \right) && \text{si } \cos h \geq \tan \delta / \tan L \\ a &= 180 - \sin^{-1} \times \left( \frac{\cos \delta \times \sin \omega}{\cos h} \right) && \text{si } \cos h < \tan \delta / \tan L \end{aligned} \quad (9)$$

A midi solaire,  $\omega = 0$  donc  $\cos h < \tan \delta / \tan L$  et  $a = 0$ .

Les équations de Spencer [6] effectuent une erreur maximale dans la prédiction de la position du soleil de l'ordre de  $0.25^\circ$ . L'algorithme de Michalsky [7] a effectué une erreur maximale de  $0.011^\circ$  sur la période 1950 à 2015.

Quant à l'algorithme de Blanco-Muriel [8], l'erreur est de  $0.008^\circ$ , mais sur la période 1995 à 2015.

L'algorithme développé par Reda [9, 10] réalise donc une erreur de  $0.0003^\circ$  sur une période de temps beaucoup plus large (-2000 à 6000 ans), mais il nécessite un temps de calcul plus important que les autres algorithmes, il convient parfaitement au calibrage des instruments de mesure.

## 2.2 Estimation du rayonnement sur plan incliné

Le rayonnement solaire sur une surface arbitraire ayant une inclinaison  $S$  par rapport à l'horizontale et un angle azimutal  $a$  (supposé positif vers le Sud-Ouest) est la somme des composants direct, diffus et le réfléchi par le sol:

$$I_{T,S} = I_{b,S} + I_{d,S} + I_{gr,S} \quad (10)$$

Si  $\theta_i$  est l'angle d'incidence, du rayonnement direct sur une surface inclinée (angle entre la normale à la surface et le rayon du soleil) est:

$$\cos \theta_i = \cos(90 - h) \times \cos S + \sin S \times \sin(90 - h) \times \cos(a - \gamma) \quad (11)$$

Le rayonnement diffus sur surface inclinée  $I_{d,S}$  peut être obtenu en multipliant le rayonnement diffus sur surface horizontale par un facteur de visibilité entre la surface et le ciel (modèle isotropique):

$$I_{d,S} = I_d \left( \frac{1 + \cos S}{2} \right) \quad (12)$$

Le rayonnement réfléchi est à prendre en compte uniquement en dehors du cas d'une surface horizontale. Il est directement proportionnel au rayonnement global.

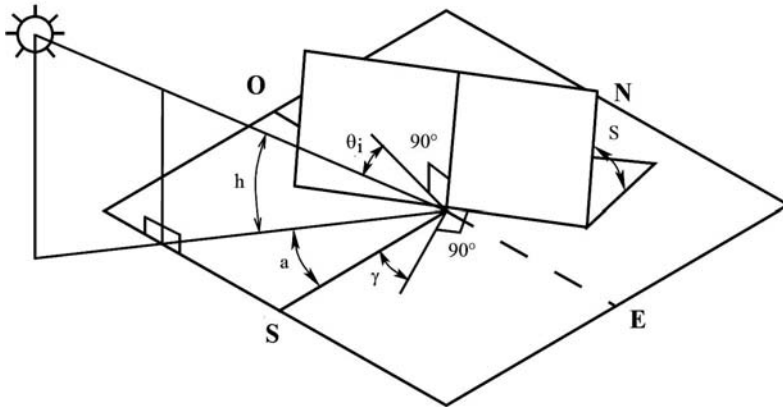


Fig. 1: Rayonnement reçu sur plan incliné

De même pour le rayonnement réfléchi par le sol, il peut être obtenu en multipliant le rayonnement total sur surface horizontale par le facteur de réflexion du sol appelé albédo du sol et par le facteur de visibilité entre la surface et le sol:

$$I_{gr,S} = I_{T,H} \left( \frac{1 - \cos S}{2} \right) \times \rho \quad (13)$$

Le sol réfléchit une partie de l'éclairement qu'il reçoit en fonction de sa nature. Le sol cultivé réfléchit 10 à 25 % de l'éclairement reçu, le sable de 30 à 40 % et la neige 60 à 90 %.

### 2.3 Modèles d'estimation du rayonnement diffus sur plan incliné

Le modèle isotropique de diffusion est simple et permet de calculer rapidement le rayonnement diffus sur plan incliné en utilisant le facteur de visibilité surface-ciel, mais il a tendance à sous-estimer le rayonnement global reçu sur la surface. Des modèles plus élaborés ont été développés qui prennent en considération le diffus de l'horizon et le diffus issu de la circonférence du soleil (Fig. 2).

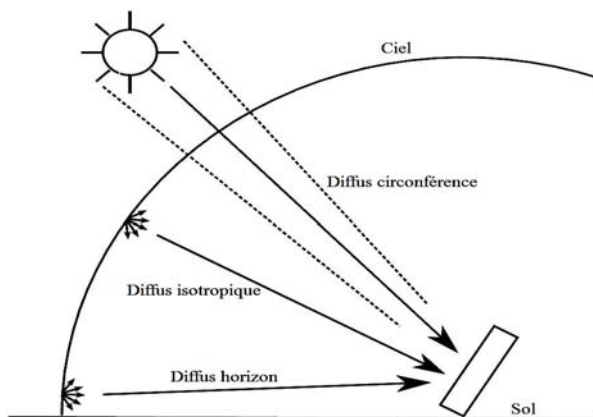


Fig. 2: Schéma des trois composants du rayonnement diffus

Le modèle de Hay *et al.* [11] néglige le diffus de l'horizon, et donc il peut être exprimé par deux termes suivants: isotropique et circonférence. Son expression mathématique est la suivante:

$$I_{d,S} = I_d \times \left( (1 - A_i) \times \left( \frac{1 + \cos S}{2} \right) + A_i \times \frac{\cos \theta_i}{\sin h} \right) \quad (14)$$

$A_i$  est l'index d'anisotropie, qui est fonction de la transmittance de l'atmosphère du rayonnement direct.

$$A_i = \frac{I_b}{I_{ex}} \quad (15)$$

Cet index d'anisotropie détermine la portion du diffus qui doit être traité comme isotropique. Si le ciel est clair, donc  $A_i$  est grand, le terme isotropique est faible et le contraire dans le cas où le ciel est nuageux.

Cette méthode est un peu plus complexe que le modèle isotropique, mais donne une meilleure estimation du rayonnement global reçu sur plan incliné.

Reindl *et al.* [12] proposent une relation de la forme:

$$I_{d,S} = I_d \times \left( (1 - A_i) \times \cos^2 \left( \frac{S}{2} \right) \times \left( 1 + f \times \sin^3 \left( \frac{S}{2} \right) \right) + A_i \times \frac{\cos \theta_i}{\sin h} \right) \quad (16)$$

avec,  $f = \sqrt{\frac{I_b}{I_G}}$

Le modèle de Gueymard [13] admet que le rayonnement diffus est fonction de la distribution du rayonnement. Pour une surface inclinée, on peut écrire:

$$I_{d,S} = r_d \times I_d \quad (17)$$

Le modèle de Gueymard suppose que le rayonnement dans un ciel partiellement couvert est la somme pondérée du rayonnement dans un ciel clair et un ciel totalement couvert. Gueymard a introduit donc la notion du rayonnement pondéré normalisé qui peut être traduite par l'équation:

$$r_d = (1 - N_{pt}) \times r_{d0} + N_{pt} \times r_{d1} \quad (18)$$

Avec:

$$\begin{aligned} r_{d0} &= \exp( a_0 + a_1 \cos \theta_i + a_2 \cos^2 \theta_i + a_3 \cos^3 \theta_i ) + F(S) \times G(h) \\ a_0 &= -0.897 - 3.364 \times h' + 3.960 \times h'^2 - 1.909 \times h'^3 \\ a_1 &= 4.448 - 12.962 \times h' + 34.601 \times h'^2 - 48.784 \times h'^3 + 27.511 \times h'^4 \\ a_2 &= -2.770 + 9.164 \times h' - 18.876 \times h'^2 + 23.776 \times h'^3 - 13.014 \times h'^4 \\ a_3 &= 0.312 - 0.217 \times h' - 0.805 \times h'^2 + 0.318 \times h'^3 \\ F(S) &= \frac{1 + b_0 \sin^2(S) + b_1 \sin(2S) + b_2 \sin(4S)}{1 + b_0} \end{aligned} \quad (19)$$

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

$$h' = 0.01 \times h ; b_0 = -0.2249 ; b_1 = 0.1231 ; b_2 = -0.0342$$

$r_{d1}$  est obtenu à partir de l'équation de Steven-Unsworth:

$$r_{d1} = \cos^2(S/2) + \frac{2b}{\pi(3 + 2b)} \times (\sin S - S \times \cos S - \pi \sin^2(S/2)) \quad (20)$$

Gueymard propose  $b = 1.5$

Le modèle de Perez *et al.* [14] est basé sur une analyse plus détaillée des trois composants du rayonnement diffus. L'expression mathématique du diffus est:

$$I_{d,S} = I_d \times \left( (1 - F_1) \times \frac{(1 + \cos S)}{2} + F_1 \left( \frac{a_1}{a_2} \right) + F_2 \sin S \right) \quad (21)$$

$F_1$  et  $F_2$  sont les coefficients de luminosité de la circonférence et de l'horizon.  $a_1$  et  $a_2$  sont les termes qui prennent en compte l'angle d'incidence du cône de la circonférence du soleil.

$$a_1 = \max[0, \cos \theta] ; a_2 = \max[\cos 85, \sin h] \quad (22)$$

Les coefficients  $F_1$  et  $F_2$  sont fonctions de trois paramètres qui décrivent les conditions du ciel, la hauteur du soleil  $h$ , l'indice de clarté  $\varepsilon$  et la luminosité  $\Delta$ .

L'expression de l'indice de clarté  $\varepsilon$  est fonction du diffus et du direct.

$$\varepsilon = \frac{\frac{I_d + I_b}{I_d} + 5.535 \times 10^{-6} \times (90 - h)^3}{1 + 5.535 \times 10^{-6} \times (90 - h)^3} \quad (23)$$

La hauteur du soleil  $h$  est exprimée en degré.

$$\Delta = m \times \frac{I_d}{I_{ex} \times \cos \theta_i} \quad (24)$$

$m$  est l'index de masse de l'air,  $m = 1 / \sin h$ .

$$F_1 = \max \left[ 0, \left( f_{11} + f_{12} \Delta + f_{13} \frac{\pi(90 - h)}{180} \right) \right] \quad (25)$$

$$F_2 = \left( f_{21} + f_{22} \Delta + f_{23} \frac{\pi(90 - h)}{180} \right) \quad (26)$$

Les coefficients  $f_{ij}$  dépendent de  $\varepsilon$ , leurs valeurs sont données dans le **Tableau 1**.

**Tableau 1:** Coefficients  $f_{ij}$

Coefficients	$f_{11}$	$f_{12}$	$f_{13}$	$f_{21}$	$f_{22}$	$f_{23}$
1 - 1.065	-0.0083	0.5877	-0.0621	-0.0596	0.0721	-0.0220
1.065 - 1.230	0.1299	0.6826	-0.1514	-0.0189	0.0660	-0.0289
1.230 - 1.500	0.3297	0.4869	-0.2211	0.0554	-0.0640	-0.0261
1.500 - 1.950	0.5682	0.1875	-0.2951	0.1089	-0.1519	-0.0140
1.950 - 2.800	0.8730	-0.3920	-0.3616	0.2256	-0.4620	0.0012
2.800 - 4.500	1.1326	-1.2367	-0.4118	0.2878	-0.8230	0.0559

4.500 – 6.200	0.0602	-1.5999	-0.3589	0.2642	-1.8230	0.1311
6.200 - ∞	0.6677	-0.3273	-0.2504	0.1561	-1.3765	0.2506

Cet ensemble d'équations permet de calculer les trois composants du rayonnement diffus sur une surface inclinée.

Il reste à rajouter le rayonnement direct et réfléchi afin d'obtenir le rayonnement global sur plan incliné.

### 3. ETUDE DES MODELES DE CALCUL DU RAYONNEMENT

Différentes données radiométriques sont enregistrées par la station de mesure du Centre de Développement des Energies Renouvelables. On s'intéresse principalement au rayonnement global horizontal, diffus horizontal, direct et le global incliné à la latitude du lieu. Ce dernier permet de maximiser l'énergie annuellement reçue par le capteur [15].

Un programme en fortran a été élaboré afin de calculer le rayonnement diffus sur plan incliné selon les différents modèles cités précédemment. Une procédure, pour formater les données brutes afin de les exploiter, a été écrite en langage awk. Elle permet d'organiser les données, éliminer les périodes d'essai et les défaillances du système de mesure.

Les données sont lues par le programme. Puis la position du soleil (hauteur et azimut du soleil) selon la date et l'heure considéré est calculée par l'algorithme de Reda *et al.* [9]. L'angle d'incidence sur la surface inclinée est alors évalué.

Le rayonnement diffus est alors calculé selon les modèles choisis (équations 14 à 26) en utilisant le rayonnement global et le rayonnement diffus sur plan horizontal mesurés par la station de mesure.

En premier, le rayonnement diffus est étudié en comparant les mesures expérimentales et les modèles de calcul. Cette étape permet d'évaluer les erreurs des différents modèles sur le site d'étude.

On trace le rayonnement diffus calculé selon le modèle isotropique en fonction du rayonnement diffus mesuré (Fig. 3).

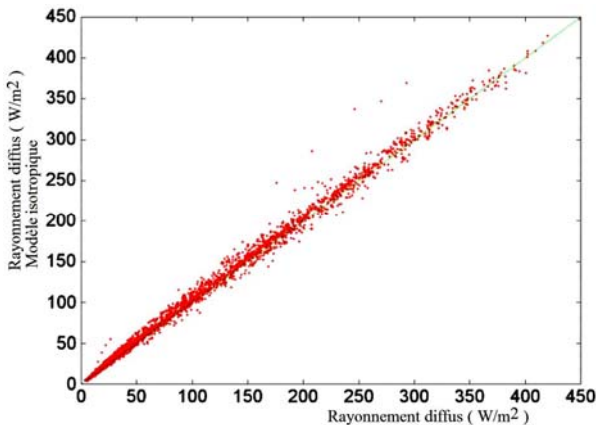


Fig. 3: Rayonnement diffus selon le modèle isotropique vs rayonnement diffus mesuré



Les points des échantillons se concentrent près de la droite unitaire. Montrant ainsi une bonne approximation des modèles. En effet les écarts sont respectivement de 6.9 %, 6.6 %, 6.7 %, 5.5 %, 4.8 % pour les modèles isotropique, Hay, Reindl, Gueymard et Perez. Le modèle de Perez donne l'écart le plus faible comparativement aux autres modèles, c'est le modèle le plus utilisé dans la littérature.

Une évaluation globale renseigne peu sur les modèles. Une étude plus approfondie est nécessaire afin de juger du comportement des modèles et connaître leurs points forts et lacunes. Deux grandeurs sont alors calculées, l'écart absolu et l'écart relatif.

$$\text{Ecart}_{\text{absolu}} (\%) = 100 \times \frac{1}{n} \sum \left| \frac{y_{\text{modèle}} - y_{\text{expérimental}}}{y_{\text{expérimental}}} \right| \quad (27)$$

$$\text{Ecart}_{\text{relatif}} (\%) = 100 \times \frac{1}{n} \sum \frac{y_{\text{modèle}} - y_{\text{expérimental}}}{y_{\text{expérimental}}} \quad (28)$$

Les écarts absolus et relatifs peuvent être calculés sur une plage limitée de données. Le rayonnement correspondant est la moyenne sur la plage considérée. On s'intéressera à leur distribution en fonction du rayonnement diffus.

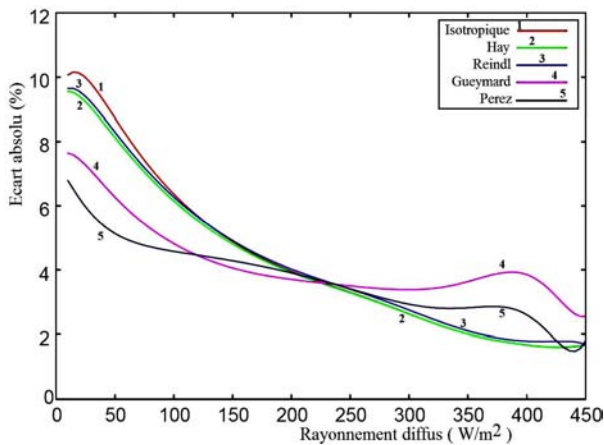


Fig. 4: Distribution de l'écart absolu sur le calcul du rayonnement diffus

L'écart absolu est toujours positif. Il représente la somme des erreurs du modèle, et c'est une grandeur qui renseigne sur la précision globale du modèle.

Représenter la distribution de l'écart absolu en fonction du rayonnement permet de visualiser les zones où cette grandeur est importante et où le modèle s'approche bien de la réalité (Fig. 4).

Les modèles les plus stables ont un écart quasi constant. Pour la qualité du modèle, il est important que le modèle ne s'écarte pas trop de la réalité dans la zone d'intérêt.

Dans la majorité des applications solaires, un rayonnement supérieur à 100 W/m<sup>2</sup> est nécessaire pour faire fonctionner les divers équipements et appareils électrique.

Le modèle de Perez a une bonne distribution dans cette zone. L'erreur est presque uniforme et ne dépasse pas les 5 %.

Le modèle de Gueymard oscille un peu lorsque le rayonnement augmente, ce qui donne une légère instabilité dans les calculs.

L'écart relatif est positif si le modèle surestime et il est négatif si le modèle sous-estime. Il est de -5.4 %, -4.8 %, -5.1 %, -1.0 %, 1.6 % pour les modèles isotropique, Hay, Reindl, Gueymard et Perez respectivement. Il est remarqué que le modèle de Perez surestime le rayonnement diffus.

Observer l'évolution de l'erreur relative en fonction du rayonnement diffus donne plus d'informations (Fig. 5).

Le modèle de Perez a beaucoup d'avantages par rapport aux autres modèles. L'écart est quasi constant et toujours positif. C'est un modèle qui a un comportement stable.

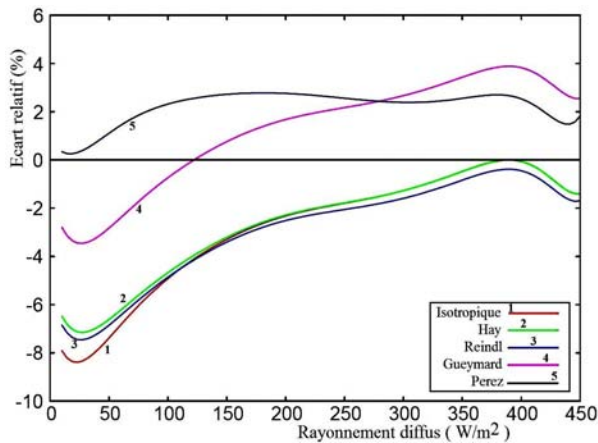


Fig. 5: Distribution de l'écart relatif sur le calcul du rayonnement diffus

La grandeur qui intéresse l'ingénieur est le rayonnement global incliné à la latitude du lieu. L'écart absolu entre les modèles cités précédemment et les mesures a été calculé. Il est de 4.8 %, 5.2 %, 5.1 %, 3.9 %, 3.6 % pour les modèles isotropique, Hay, Reindl, Gueymard et Perez respectivement.

Ces valeurs sont plus faibles que les écarts du rayonnement diffus, mais vu la contribution du diffus dans le global, des valeurs moins importantes étaient attendues.

La distribution de l'écart en fonction du rayonnement global montre que l'erreur n'est pas constante. Elle diminue puis augmente dans les rayonnements élevés (Fig. 6).

Toutefois, l'écart ne dépasse pas les 6 % pour un rayonnement global supérieur à 100 W/m<sup>2</sup>. Cette déviation ne peut être expliquée par l'erreur due aux modèles de prédiction du rayonnement diffus, mais aux formules d'estimation du rayonnement direct.

Suite à ces observations, une courbe montrant l'erreur entre le rayonnement direct calculé par simple géométrie et celui mesuré par le pyrhéliomètre a été tracée (Fig. 7) pour analyser la source de la déviation des modèles.

Il est remarqué une surestimation du rayonnement aux faibles valeurs et une sous-estimation aux valeurs dépassant les 180 W/m<sup>2</sup>. Ce n'est qu'à partir de 500 W/m<sup>2</sup> que l'erreur devient acceptable et elle peut être de moins de 10 %.

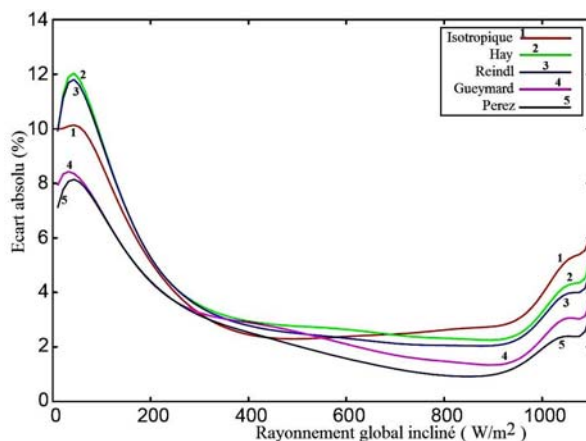


Fig. 6: Distribution de l'écart en fonction du rayonnement global

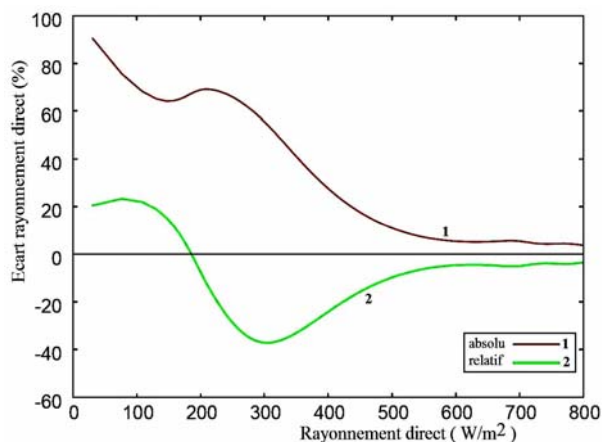


Fig. 7: Ecart de calcul du rayonnement direct en fonction de son intensité

#### 4. CONCLUSION

Une revue de différents modèles de calcul du rayonnement diffus a été effectuée. Nous distinguons le modèle de première génération (isotropique), les modèles de seconde génération (Hay, Reindl,.) qui tiennent en compte de la présence de nuages dans le ciel et leur effet sur la diffusion du rayonnement et les modèles de troisième génération (Perez, Gueymard,.) qui tiennent en compte de tous les aspects de la diffusion du rayonnement.

Dans cette étude, il a été remarqué que le paramètre qui introduit énormément d'erreurs dans les calculs est l'estimation du rayonnement direct sur le plan incliné. Le modèle de Perez 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 sur-estimer de façon globale le rayonnement diffus, alors que la méthode géométrique sous-estime le rayonnement direct. Ce qui crée un effet de compensation global.

Il est nécessaire d'approfondir les recherches sur l'estimation du rayonnement direct par les formules géométriques. 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.

## REFERENCES

- [1] J.D. Mondol, Y.G. Yohanis and B. Norton, '*Solar Radiation Modelling for the Simulation of Photovoltaic Systems*', Renewable Energy, Vol. 33, N°5, pp. 1109 - 1120, 2008.
- [2] S. Silvestre, '*Review of System Design and Sizing Tools*', in Practical Handbook of Photovoltaics, Amsterdam: Elsevier Science, pp. 543 - 561, 2003.
- [3] P. Moon and D.E. Spencer, '*Illumination from a Non-uniform Sky*', Journal of the Illuminating Engineering Society, Vol. 37, pp. 707 - 712, 1942.
- [4] J.A. Duffie and W.A. Beckman, '*Solar Engineering of Thermal Processes*', 3<sup>rd</sup> Ed. John Wiley and Sons, 2006.
- [5] P.I. Cooper, '*The Absorption of Radiation in Solar Stills*', Solar Energy, Vol. 12, N°3, pp. 333 - 345, 1969.
- [6] J.W. Spencer, '*Fourier Series Representation of the Position of the Sun*', Search, Vol. 2, N°5, p. 172, 1971.
- [7] J.J. Michalsky, '*The Astronomical Almanac's Algorithm for Approximate Solar Position (1950-2050)*', Solar Energy, Vol. 40, N°3, pp. 227 - 235, 1988.
- [8] M. Blanco-Muriel, D.C. Alarcón-Padilla, T. López-Moratalla and M. Lara-Coira, '*Computing the Solar Vector*', Solar Energy, Vol. 70, N°5, pp. 431 - 441, 2001.
- [9] I. Reda and A. Andreas, '*Solar Position Algorithm for Solar Radiation Applications*', Solar Energy, Vol. 76, N°5, pp. 577 - 589, 2004.
- [10] I. Reda and A. Andreas, '*Corrigendum to 'Solar Position Algorithm for Solar Radiation Applications' [Solar Energy 76 (2004) 577-589]*', Solar Energy, Vol. 81, N°6, p. 838, 2007.
- [11] J.E. Hay and J.A. Davies, '*Calculation of the Solar Radiation Incident on an Inclined Surface*', in Proceedings, First Canadian Solar Radiation Data Workshop, J.E. Hay and T.K. Won, Eds, Toronto, Ontario, Canada, 1978.
- [12] D.T. Reindl, W.A. Beckman and J.A. Duffie, '*Evaluation of Hourly Tilted Surface Radiation Models*', Solar Energy, Vol. 45, N°1, pp. 9 - 17, 1990.
- [13] C. Gueymard, '*Critical Analysis and Performance Assessment of Clear Sky Solar Irradiance Models Using Theoretical and Measured Data*', Solar Energy, Vol. 51, N°2, pp. 121 - 138, 1993.
- [14] R. Perez, P. Ineichen, R. Seals, J. Michalsky and R. Stewart, '*Modeling Daylight Availability and Irradiance Components from Direct and Global Irradiance*', Solar Energy, Vol. 44, N°5, pp. 271 - 289, 1990.
- [15] H.R. Ghosh, N.C. Bhowmik and M. Hussain, '*Determining Seasonal Optimum Tilt Angles, Solar Radiations on Variously Oriented, Single and Double Axis Tracking Surfaces at Dhaka*', Renewable Energy, Vol. 35, N°6, pp. 1292 - 1297, 2010.