

## Modélisation du rayonnement solaire pour la production d'énergie électrique photovoltaïque

Bouabdallah, Ahmed  
ahmed.bouabdallah@univ-nantes.fr

### Résumé :

L'objectif de cet article est la modélisation du rayonnement solaire, dans le but d'évaluer le gisement solaire dans n'importe quel point sur terre. Ce travail fait partie d'une étude d'un système de production d'énergie électrique multi-sources alliant des sources intermittentes notamment des panneaux photovoltaïques, des dispositifs de stockage et une charge dont le profil caractérise la consommation d'un habitat. Pour la partie photovoltaïque, vu le manque de données dans la littérature, nous avons décidé de modéliser nous-mêmes le rayonnement solaire pour pouvoir extraire les données sur la puissance photovoltaïque. Pour cela, en se basant sur des mesures réalisées sur des plans horizontaux et un modèle simplifié du rayonnement extraterrestre, nous déduisons la couverture nuageuse présente lors des mesures. Celle-ci associée à un modèle analytique approprié nous permet de reconstruire le rayonnement reçu, et par la suite la puissance photovoltaïque produite par des panneaux inclinés.

**Mots clés :** Energie photovoltaïque, gisement solaire, rayonnement diffusé, rayonnement direct, rayonnement réfléchi, rayonnement solaire.

## 1. Introduction

Le rayonnement solaire (ou l'ensoleillement) reçu par un panneau déposé horizontalement est la somme des deux composantes : directe et diffusée, tandis pour un plan incliné, le panneau reçoit de plus, une nouvelle composante « réfléchi » par le sol ou par des objets tout autour du site de l'installation des panneaux photovoltaïques (figure 1) [1], [2].

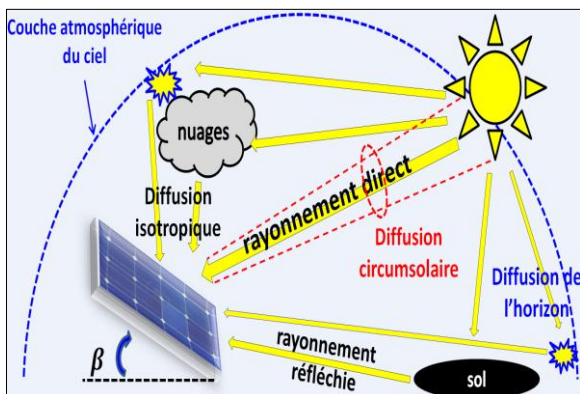


Figure 1 : Les composantes du rayonnement solaire reçues par un panneau photovoltaïque

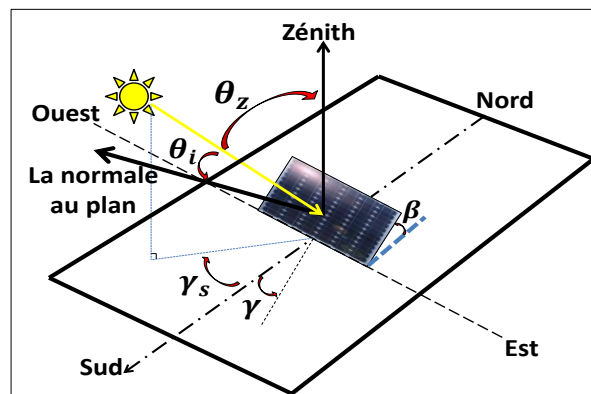


Figure 2 : Angles solaire illustrés avec un panneau photovoltaïque [1]

## 2. Modélisation du rayonnement solaire

Généralement les données disponibles sur le rayonnement solaire, sont issues de mesures réalisées sur des plans horizontaux. Pour pouvoir déterminer le rayonnement total reçu sur un plan incliné nous allons traiter deux cas de figure : ciel isotrope et ciel anisotrope.

### 2.1. Ciel isotrope

Le modèle le plus répandu et utilisé par la suite est celui cité par Duffie et Beckman [1]. Le ciel étant isotrope le rayonnement total  $G_{tot}$  reçu par le panneau photovoltaïque est la somme des trois composantes : directe, diffusée isotrope et réfléchi (figure 1) :

$$G_{tot} = G_{dir} + G_{dif} + G_r \quad (1)$$

La détermination des valeurs de ces différentes composantes du rayonnement, nécessite la connaissance des angles d'incidence  $\theta_i$  et de zénith  $\theta_z$  illustrés sur la figure 2, et qui dépendent de l'endroit géographique du site en question.

L'expression générale du rayonnement est donnée par l'expression suivante :

$$G_{tot} = G_{dir-h} \frac{\cos \theta_i}{\cos \theta_z} + G_{dif-h} \left( \frac{1+\cos \beta}{2} \right) + \rho G_h \left( \frac{1-\cos \beta}{2} \right) \quad (2)$$

$G_{dir-h}$  et  $G_{dif-h}$  représentent respectivement le rayonnement direct et le rayonnement diffusé reçus par un plan horizontal et  $G_h$  est le rayonnement mesuré avec :

$$G_h = G_{dir-h} + G_{dif-h} \quad (3)$$

Des modèles sont établis [3],[4],[5] pour la détermination de  $G_{dif-h}$  et par la suite  $G_{dir-h}$ , à partir à la fois des mesures ( $G_h$ ) et du coefficient  $k_t$  (avec  $k_t = \frac{G_h}{G_0}$ ).

Nous avons comparés cinq modèles : Erbs, Orgill-Hollands, Miguel, Mondol, Reindl (figure 3).

À titre d'exemple le modèle de Erbs est donnée par la fonction suivante :

$$\left( \frac{G_{dif-h}}{G_h} \right)_{Erbs} = f(k_t)$$

$$\begin{cases} 1 - 0,09 * k_t & k_t \leq 0,22 \\ 0,9511 - 0,1604 * k_t + \\ 4,388 * k_t^2 - 16,638 * k_t^3 + \\ 12,336 * k_t^4 & 0,22 < k_t \leq 0,80 \\ 0,165 & k_t > 0,80 \end{cases}$$

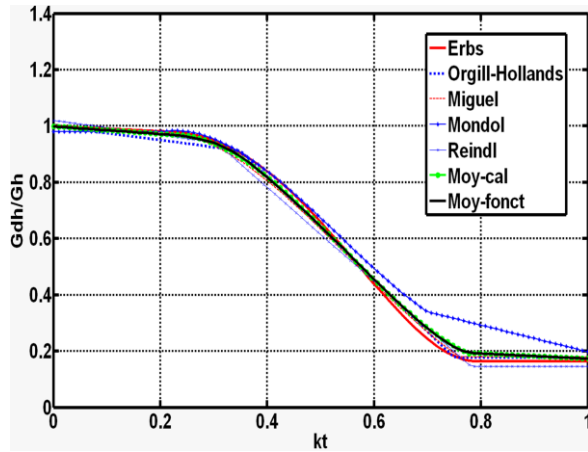


Figure 3 : Le rapport  $\frac{G_{dif-h}}{G_h}$  en fonction de  $k_t$

Le rayonnement total prend alors la forme suivante :

$$G_{tot} = G_h (1 - f(k_t)) \frac{\cos \theta_i}{\cos \theta_z} + G_h f(k_t) \left( \frac{1+\cos \beta}{2} \right) + \rho G_h \left( \frac{1-\cos \beta}{2} \right) \quad (4)$$

## 2.2. Ciel anisotrope

En plus des trois composantes reçues par le plan incliné pour le cas d'un ciel isotrope, le plan va recevoir deux composantes de plus : une composante diffusée circumsolaire qui arrive de la même direction que le rayonnement direct caractérisée par le coefficient  $A_i$ , et une composante diffusée par l'horizon caractérisée par le coefficient  $f$  (figure-1). Ce modèle est développé successivement par Hay, Davies, Klucher et Reindl [1], [6]. L'expression du rayonnement global est donnée par la formule suivante :

$$G_{tot} = (G_{dir-h} + G_{dif-h} A_i) \frac{\cos \theta_i}{\cos \theta_z} + G_{dif-h} (1 - A_i) \left( \frac{1+\cos \beta}{2} \right) \left[ 1 + f \sin^3 \left( \frac{\beta}{2} \right) \right] + \rho G_h \left( \frac{1-\cos \beta}{2} \right) \quad (5)$$

$$\text{Avec } A_i = \frac{G_{dir-h}}{G_0} \text{ et } f = \sqrt{\frac{G_{dir-h}}{G_h}}$$

De la même façon que dans le cas du ciel isotrope, la détermination de  $G_{dir-h}$  et de  $G_{dif-h}$  est obtenue à l'aide du modèle de Erbs.

## 3. Production de l'énergie photovoltaïque

La puissance d'un panneau photovoltaïque peut être exprimée comme suit :

$$P_{pv} = \eta_{pv} \times A \times G_{tot} \quad (6)$$

Cette puissance dépend du rendement de la chaîne photovoltaïque  $\eta_{pv}$ , de la surface du panneau  $A$  (ou du champ), et du rayonnement solaire  $G_{tot}$  calculé dans le paragraphe 2. Le rendement  $\eta_{pv}$  est en fonction de la température des cellules photovoltaïque  $T_c$  [7],[8],[9],[10] :

$$\eta_{pv} = \eta_{const} \times \eta_{ch} \times [1 - \beta_t (T_c - T_{NOCT})] \quad (7)$$

$$T_c = T_a + [T_{NOCT} - (273 + 20)] \times \frac{G_{tot}}{G_{NOCT}} \quad (8)$$

$\eta_{const}$  : Rendement du panneau fourni par le constructeur,  $\eta_{ch}$  : Rendement de la chaîne de conversion photovoltaïque.

$\beta_t$  : Coefficient de température,  $T_{NOCT}$  : Température des cellules dans les conditions NOCT (NOCT : Normal Operating Cell Temperature :  $G_{NOCT} = 800 \text{ W/m}^2$ ,  $(T_a)_{NOCT} = 20^\circ\text{C}$ ,  $AM = 1.5$ ),  $T_a$  : Température ambiante.

## 4. Résultats de simulation

Dans ce qui va suivre, les mesures prises en compte pour le rayonnement solaire (figure 4) et la température, correspondent au site de Saint Martin en Haut (France), situé à une longitude égale à  $4.55^\circ$  Est, une latitude de  $45.66^\circ$  Nord et une Altitude de 730 mètres. Pour pouvoir comparer les différents modèles (Erbs, Orgill-Hollands, Miguel, Mondol, Reindl et Moy-mod-5) nous avons calculé le bilan énergétique annuel pour chaque modèle (figure 3), avec :  $E_{modèle} = \sum_{t=1}^T P(t) * \Delta t$

Avec :  $\Delta t = 1 \text{ heure}$ , et  $T = 8760$ .

L'inclinaison et l'orientation des panneaux sont optimisées en maximisant l'énergie annuelle pour chaque modèle, ça correspond au cas des panneaux inclinés orientés fixes l'algorithme fait varier  $\beta$  de  $0^\circ$  à  $90^\circ$  et  $\gamma$  de  $-90^\circ$  (Est) à  $+90^\circ$  (Ouest).

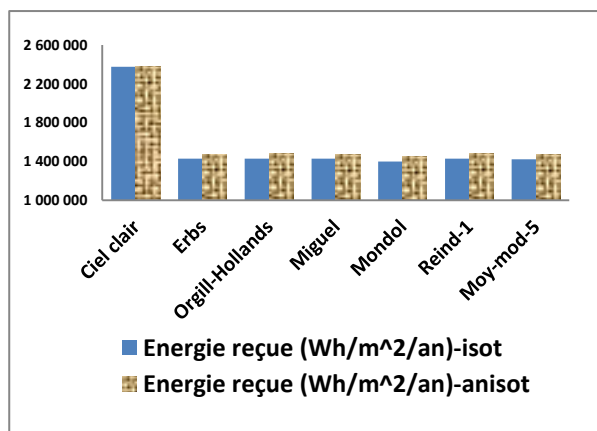


Figure 3 : Bilan énergétique annuelle dans les deux cas de figure : isotrope et anisotrope (W/m²/an)

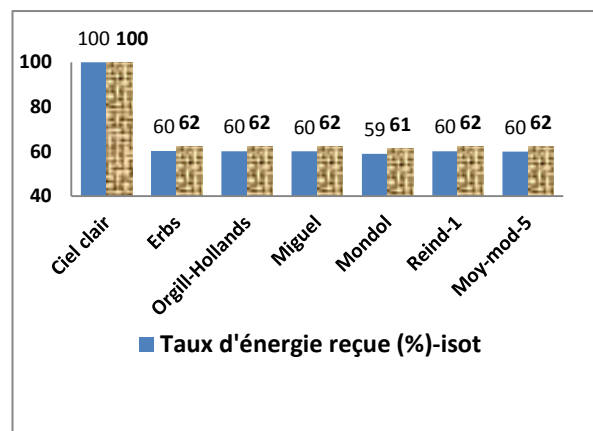


Figure 4 : Taux du bilan énergétique annuel dans les deux cas de figure : isotrope et anisotrope

La différence entre le ciel clair et les différents modèles ( $\approx 40\%$ ) définit les pertes sur site introduites généralement par la couverture nuageuse (figure 4). Nous avons constaté une légère différence entre le cas isotrope et anisotrope ; des taux qui ne dépassent pas les 4% en prenant le cas isotrope comme référence pour chaque modèle. L'inclinaison optimale varie entre  $30^\circ$  Nord pour le modèle de Mondol dans le cas isotrope et  $40^\circ$  Nord pour le cas d'un ciel clair (figure 5). Sachant que la latitude du site  $\varphi$  est égale à  $45.66^\circ$ , les rapports : angles optimaux  $\beta_{opt}/\varphi$  est donné par le tableau 1.

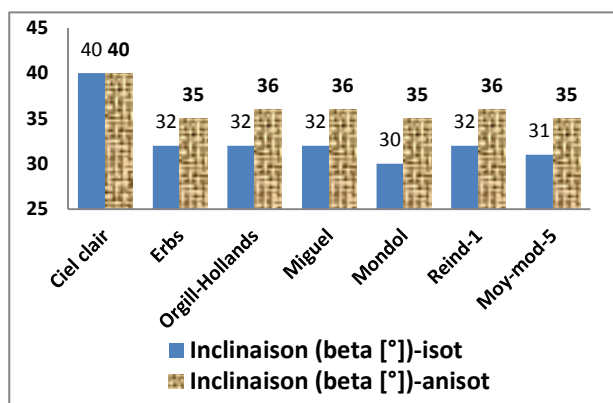


Figure 5 : Inclinaison optimale pour le cas des panneaux fixes ( $^\circ$ )

Modèle		$\beta_{opt}(^\circ)$	$\beta_{opt}/\varphi$
Ciel clair	/	40	0,88
	/	40	0,88
Erbs	isotrope	32	0,70
	anisotrope	35	0,77
Orgill-Hollands	isotrope	32	0,70
	isotrope	36	0,79
Miguel	anisotrope	32	0,70
	anisotrope	36	0,79
Mondol	isotrope	30	0,66
	anisotrope	35	0,77
Reindl	isotrope	32	0,70
	anisotrope	36	0,79
Moy-mod-5	isotrope	31	0,68
	anisotrope	35	0,77

Tableau 1 : Rapports des angles d'inclinaison optimaux sur la latitude du site

Pour ce qui concerne l'orientation des panneaux par rapport au sud (- : Est, + : Ouest), l'optimisation de ces angles confirme que l'orientation optimale choisie dans l'hémisphère Nord est bien au voisinage de zéro, c'est à dire orientés vers le sud (figure 6).

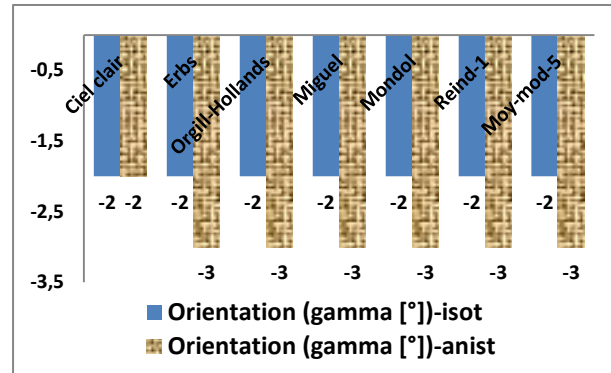


Figure 6 : Orientation optimale pour le cas des panneaux fixes ( ° )

## 5. Conclusion

Les modèles étudiés dans cet article nous ont permis non seulement de calculer le gisement solaire pour des plans inclinés en se basant sur des mesures réalisées sur un plan horizontal, mais aussi d'optimiser l'angle d'inclinaison  $\beta$  et d'orientation  $\gamma$  du panneau. La comparaison entre le cas d'un ciel isotrope et anisotrope du point de vue énergétique à montrer une légère différence ( $\approx 4\%$ ), ce qui nous permis de prendre le cas anisotrope comme cas d'étude complet. Pour une perspective de ce travail, la puissance obtenue par la chaîne photovoltaïque nous servira à dimensionner les panneaux en vue de les intégrer dans le système multi-sources.

## Références

- [1] J. A. Duffie and W. A. Beckman, *Solar Engineering of Thermal Processes*. John Wiley & Sons, 2006.
- [2] R. P. Vengatesh and S. E. Rajan, "Investigation of cloudless solar radiation with PV module employing Matlab-Simulink," *Solar Energy*, vol. 85, no. 9, pp. 1727–1734, Sep. 2011.
- [3] L. T. Wong and W. K. Chow, "Solar radiation model," *Applied Energy*, vol. 69, no. 3, pp. 191–224, Jul. 2001.
- [4] a. de Miguel, J. Bilbao, R. Aguiar, H. Kambezidis, and E. Negro, "Diffuse solar irradiation model evaluation in the North Mediterranean Belt area," *Solar Energy*, vol. 70, no. 2, pp. 143–153, Jan. 2001.
- [5] J. D. Mondol, Y. G. Yohanis, and B. Norton, "Solar radiation modelling for the simulation of photovoltaic systems," *Renewable Energy*, vol. 33, no. 5, pp. 1109–1120, May 2008.
- [6] P. G. Loutzenhiser, H. Manz, C. Felsmann, P. a. Strachan, T. Frank, and G. M. Maxwell, "Empirical validation of models to compute solar irradiance on inclined surfaces for building energy simulation," *Solar Energy*, vol. 81, no. 2, pp. 254–267, Feb. 2007.
- [7] G. M. Masters, *Renewable and Efficient Electric Power Systems*. John Wiley & Sons, 2004.
- [8] H. Tian, F. Mancilla-David, K. Ellis, E. Muljadi, and P. Jenkins, "A cell-to-module-to-array detailed model for photovoltaic panels," *Solar Energy*, vol. 86, no. 9, pp. 2695–2706, Sep. 2012.
- [9] M. K. Deshmukh and S. S. Deshmukh, "Modeling of hybrid renewable energy systems," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 12, no. 1, pp. 235–249, Jan. 2008.
- [10] a. Benatallah, R. Mostefaoui, M. Boubekri, and N. Boubekri, "A simulation model for sizing PV installations," *Desalination*, vol. 209, no. 1–3, pp. 97–101, Apr. 2007.