

## Etablissement d'un Modèle Mathématique pour la Fraction Diffuse de l'Irradiation Solaire en Algérie

M. Chikh<sup>1</sup>, A. Maafi<sup>2</sup> & A. Malek<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire Photovoltaïque, Centre de Développement des Energies Renouvelables  
B.P 62, Route de l'Observatoire, Bouzaréah, Alger

<sup>2</sup> Laboratoire des Systèmes rayonnants, Institut d'Electronique, U.S.T.H.B., Alger

**Résumé** - Cet article présente une analyse du rayonnement solaire horaire diffusé sur une surface horizontale et recommande une équation pour déterminer le taux horaire du rayonnement diffus / global reçu sur une surface horizontale pour trois sites algériens, à savoir : Alger, Bechar et Tamanrasset. Les corrélations établies pour les sites cités ci-dessus ont été comparées à des corrélations établies par Liu-Jordan (1960), Orgill and Hollands (1977), Erbs et al. (1982) et DT Reindl (1990). La validation du modèle établie dans cette récente étude repose sur le calcul des indicateurs statistiques de validation (CRSS) et (MAB) erreurs, mettant en évidence l'amélioration apportée par cette nouvelle corrélation de la fraction diffuse vis-à-vis du type Liu-Jordan.

**Mots clés:** Fraction diffuse - Rayonnement solaire global - Indice de clarté - Corrélation.

### 1. INTRODUCTION

La connaissance de la fraction diffuse de l'irradiation solaire sur un site particulier est très importante pour la conception des systèmes énergétiques solaires. D'actuelles mesures de l'irradiation solaire horaire sont souhaitables (comme variable d'entrée) pour la gestion optimale et le dimensionnement des systèmes solaires, mais probablement ne sont pas disponibles sur chaque site sous des orientations bien définies.

Cependant, l'irradiation globale sur une surface horizontale est l'une des variables le plus souvent mesurée ajoutée à d'autres variables climatiques (température ambiante, les points de rosée ... etc.).

Si seulement l'irradiation globale horizontale est mesurée, deux problèmes peuvent apparaître :

- Le premier, comment déterminer la fraction du global qui est le diffus (ou le direct),
- Le second problème consiste en l'estimation de ces composantes : le diffus, le direct et l'albedo sur une surface inclinée pour différentes orientations.

Le premier travail accompli par Liu-Jordan [01] donnait une relation entre l'irradiation diffuse journalière et l'irradiation globale journalière sur une surface horizontale. Considérant que cette corrélation est une originalité dans ce domaine et développée pour le calcul de la fraction diffuse horaire en fonction de l'indice de clarté  $K_t$ , tandis que d'autres auteurs ont développé des corrélations de la fraction diffuse spécialement pour des intervalles horaires.

Orgill and Hollands [02], Erbs et al. [03] corrôlaient la fraction diffuse avec l'indice de clarté où l'irradiation solaire sous ciel clair remplace l'irradiation extraterrestre dans la définition de  $K_t$ . En se basant sur le travail effectué par Bugler [04] et Iqbal [05], nous avons développé une corrélation (sans donner de relations mathématiques) à travers laquelle nous avons mis en évidence que l'irradiation diffuse (sous la forme de  $I_d/I_0$ ) est non seulement fonction de l'indice de clarté, mais aussi de la hauteur du soleil [06].

L'inconvénient d'utiliser les modèles de Liu-Jordan est que l'erreur standard associée à l'estimation de la fraction diffuse horaire est considérable.

Dans la figure (1), la dispersion des données du site de Bechar, illustre graphiquement, le problème d'estimation de la fraction diffuse comme fonction uniquement de l'indice de clarté. Par exemple, pour  $K_t = 0.5$ , les valeurs mesurées de la fraction diffuse ne s'orientent pas autour d'un seul point mais sur une plage d'environ de 0.2 à l'approximité de l'unité, il est donc clair que la fraction diffuse horaire n'est nullement fonction de  $K_t$  seulement.

## 2. BASE DE DONNEES

Des données issues des trois sites à étudier (avec un minimum d'une année de données pour chaque site) ont été utilisées pour l'examen de l'influence de l'indice de clarté sur la fraction diffuse. Le tableau 01 résume ou donne les sites utilisés, munis de leurs données.

**Tableau 1:** Base de données

Site	Alger	Béchar	Tamanrasset
Latitude	36.43°	31.6°	22.8°
Période de données (de)	01/01/1992	01/08/1990	01/01/1990
Période de données (à)	31/12/1992	31/12/1992	31/08/1992

Ces données proviennent de l'Office National de la Météorologie (O.N.M.). La probité et la validité des corrélations empiriques établies sont liées à la quantité et la qualité des données utilisées dans le développement de la modélisation. En présumant que la quantité suffisante des données existe, mais cela n'empêche pas, et même exige, que la qualité de ces données soit bien analysée.

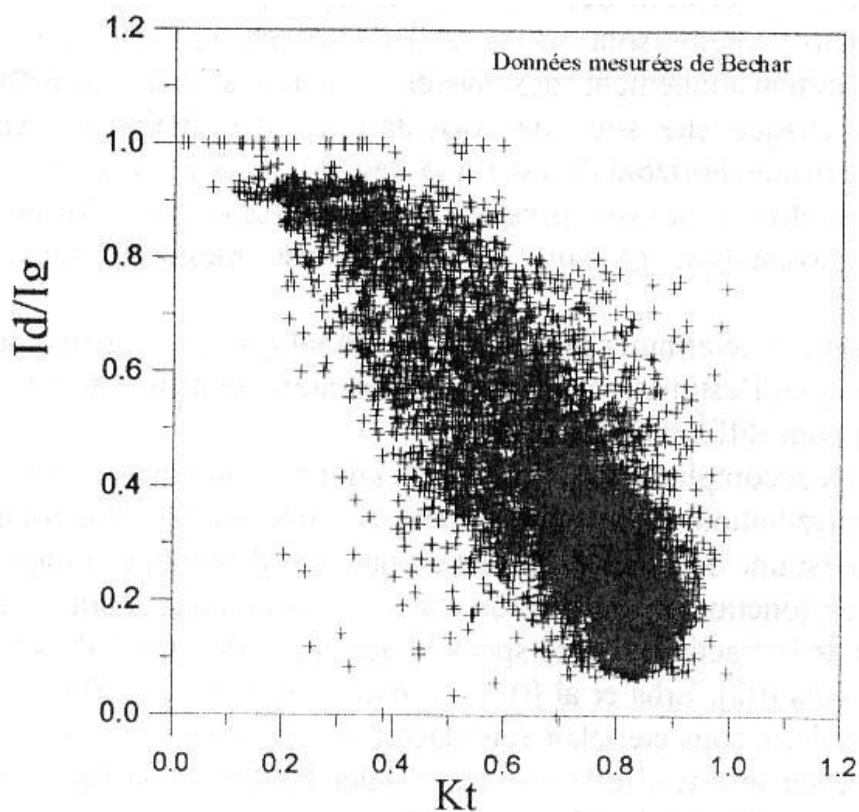


Fig. 1: Données mesurées de la fraction diffuse Vs l'indice de clarté du site de Bechar

### 3. DEVELOPPEMENT DE NOUVEAUX MODELES DE LA FRACTION DIFFUSE

La motivation derrière l'examen des corrélations de la fraction diffuse horaire est de déterminer en incorporant des variables de prédiction réduira significativement l'erreur standard des modèles type Liu-Jordan. Le but est de chercher un modèle de la fraction diffuse horaire qui est plus exact que ceux établis par Liu-Jordan.

Les variables de prédiction sont des variables indépendantes qui peuvent affecter la réponse. Il est clair que la réponse, la fraction diffuse, est influencée par l'indice de clarté  $K_t$ .

Les prédictors utilisés dans cette étude sont limités à l'indice de clarté  $K_t$  et la hauteur du soleil  $\sin(x)$ . Les paramètres tels que la température, l'humidité et l'albédo ne feront pas partie de cette étude analytique à raison de la non disponibilité de données.

Avec l'ensemble des prédictors cités ci-dessus, une forme du modèle devrait être établie, à savoir, modèle linéaire, non linéaire, premier ordre, second ordre, etc. Les modèles du type Liu-Jordan sont tous linéaires. Liu-Jordan, Orgill and Hollands et Erbs utilisaient des modèles polynomiaux avec une variation de l'ordre du degré. Pour cette étude, nous utiliserons la forme du modèle adopté par DT Reindl, Beckman and Duffie [07] et celui établi aussi par Chendo et al. [08]. La forme du modèle linéaire qui sera utilisé est la suivante

$$y = a_0 + a_1 \cdot x_1 + a_2 \cdot x_2 + \dots + a_j \cdot x_j + \varepsilon$$

où  $y$  est la réponse optimale;

$a_j$  est le  $j^{\text{ième}}$  paramètre du modèle;

$x_j$  est le  $j^{\text{ième}}$  prédictor (variable indépendante);

$\varepsilon$  est l'erreur de la modélisation.

Dans un effort de bien comprendre l'association de la fraction diffuse avec chaque variable climatique, une analyse a été établie sur un intervalle de  $K_t$  allant de 0.175 à 0.87.

La régression a été exécutée à base de l'année pour chaque site.

L'indice de clarté  $K_t$  est une variable très importante dans la partie inférieure et centrale de l'intervalle, mais à la partie supérieure de l'intervalle la signification de  $K_t$  décroît dramatiquement. L'effet de la hauteur du soleil n'est pas important sous ciel couvert ( $K_t$  faible), mais sous ciel clair ( $K_{t\text{sup}}$ ) la hauteur du soleil commence à devenir une variable dominante, la fraction diffuse augmente avec la décroissance de la hauteur du soleil. Ces résultats se conforment bien avec ceux trouvés par Skartveit et Olseth [09].

La version finale de l'ensemble des corrélations est donnée ci-dessous :

**Tableau 2**

Nom du site	$0 \leq K_t \leq 0.175$	$0.175 \leq K_t \leq 0.87$	$K_t \geq 0.87$
	$I_d / I_g \leq 1$	$I_d / I_g \leq 0.97$ et $I_d / I_g \geq 0.1$	$I_d / I_g \geq 0.1$
<b>Alger1</b>	$I_d / I_g = 1 - 0.14 k_t - 0.037 \sin(\alpha)$	$1 - 0.43 k_t + 0.0237 \sin(\alpha)$	$0.23 k_t - 0.74 \sin(\alpha)$
<b>Bechar1</b>	$I_d / I_g = 1 - 0.39 k_t - 0.07 \sin(\alpha)$	$1.2 - 1.23 k_t + 0.104 \sin(\alpha)$	$0.54 k_t - 0.34 \sin(\alpha)$
<b>Tam1</b>	$I_d / I_g = 1 - 0.353 k_t - 0.1 \sin(\alpha)$	$1 - 0.91 k_t - 0.038 \sin(\alpha)$	$0.4 k_t - 0.24 \sin(\alpha)$

Il est possible que les corrélations précédentes puissent produire des valeurs insensées de la fraction diffuse (par exemple  $> 1$ ) ; par conséquent, une série de conditions (contraintes) sont placées sur les corrélations dans chaque intervalle pour assurer des valeurs estimées raisonnables.

La corrélation qui est uniquement fonction de l'indice de clarté est aussi développée. Cette corrélation (identifiée comme  $K_{\text{tcorr}}$ ) admettra une comparaison directe (graphiquement) avec les corrélations du type Liu-Jordan.

La corrélation  $K_{\text{tcorr}}$  est donnée :

**Tableau 3**

Nom du Site	$0 \leq K_t \leq 0.175$	$0.175 \leq K_t \leq 0.87$	$K_t \geq 0.87$	
Alger2	$I_d/I_g = 1 - 0.232k_t$	$1.17 - 1.23k_t$	0.203	(2a)
Béchar2	$I_d/I_g = 1 - 0.3k_t$	$1.137 - 1.077k_t$	0.2043	(2b)
Tam	$I_d/I_g = 1 - 0.64k_t$	$1.137 - 1.077k_t$	0.24	(2c)

Les corrélations tirées fonction de  $K_t$  sont similaires à celles données par Orgill and Hollands, Erbs et DT Reindl, comme cela est présenté en figure 2. Chacune de ces corrélations établies est basée sur des données météorologiques entièrement indépendantes.

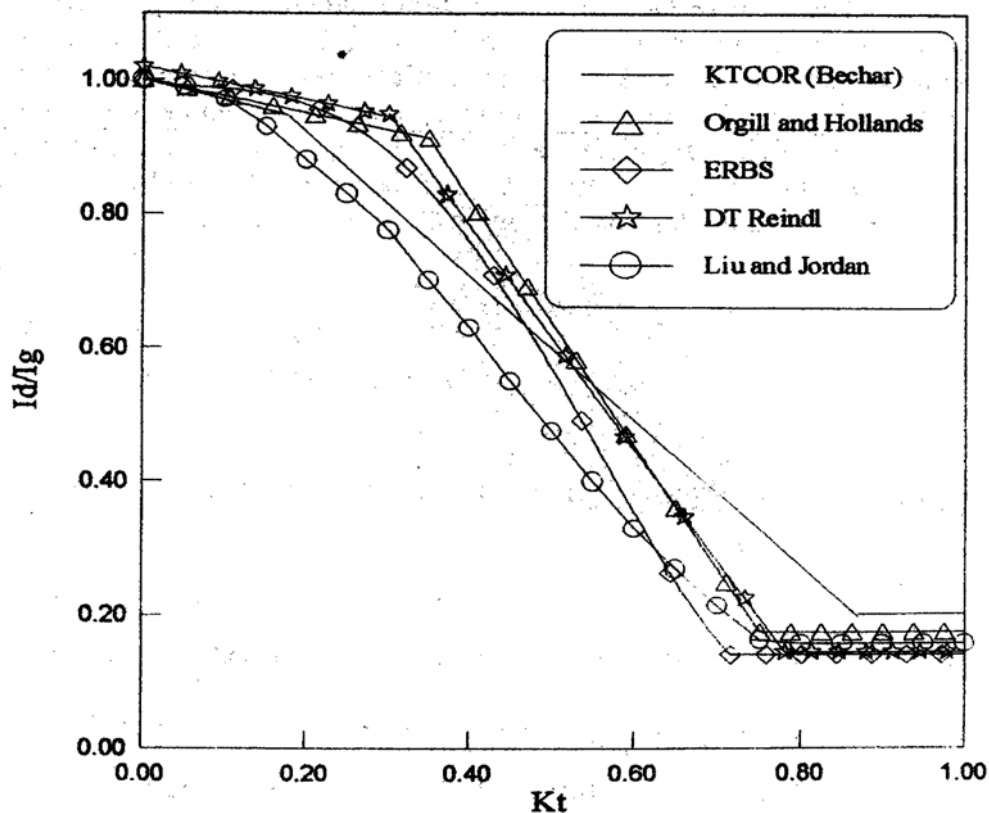


Fig. 2: Corrélation de la fraction diffuse incluant  $K_{\text{tcorr}}$

### 3. VALIDATION DU MODELE

Les performances des modèles établis pour l'Algérie, ont été examinées en effectuant des tests statistiques sur les valeurs de la fraction diffuse estimée du rayonnement solaire.

Le premier test est une comparaison simplifiée des résidus composites des sommes quadratiques (**CRSS** : Composite Residual Sum of Squares), défini dans l'expression suivante:

$$CRSS = \sum \left[ \left( I_d / I_g \right)_{est} - \left( I_d / I_g \right)_{mes} \right]^2$$

Quant au deuxième test, il consiste au calcul de l'erreur moyenne absolue (**MAB** : Mean ABSolute error) donnée par la relation suivante :

$$MAB = \sum \left\{ Abs \left[ \left( I_d / I_g \right)_{est} - \left( I_d / I_g \right)_{mes} \right] \right\} / N$$

En appliquant ces deux relations sur les données complètes, le tableau 4 présente les résultats des tests statistiques appliqués à la nouvelle corrélation.

**Tableau 4:** Résultats des tests statistiques appliqués sur la nouvelle corrélation et un groupe de modèles existants dans la littérature avec une différence de pourcentage utilisant le modèle (Béchar 1 et 2) comme référence

Modèle	CRSS	MAB
Bechar1	106.99	0.09015
Tamanrasset1	123.04	0.1048
Alger1	200.09	0.3809
Bechar2	120.432	0.0962
Tamanrasset2	128.993	0.1045
Alger2	154.837	0.1077
DT R1	216.165	0.137
DT R2	241.305	0.1454
OH	301.726	0.1663
ERBS	305.426	0.1622
Liu-Jordan	229.342	0.1331

A une vue globale, la nouvelle corrélation de la fraction diffuse (équations du tableau 1 "bechar1 ") apporte une amélioration de 11.16 % sur la valeur de **CRSS** comparée à celle de "bechar2". Un écart significatif (13.04 %) de la valeur de **CRSS** comparé à celle de Tamanrasset.

En comparant le modèle (bechar2) aux modèles établis par d'autres auteurs, on trouve pour celui établie par Orgill and Hollands, une performance de 60 % et pour celui de DT Reindl2, une performance de 50.09 %.

Pour le modèle de (Bechar1), une performance de 50.5 % comparée à celle apportée par DT Reindl1.

#### 4. CONCLUSION

Le but de ce travail est de réduire l'erreur standard des corrélations du type Liu-Jordan en incluant la 2<sup>ème</sup> variable climatique, qui est la hauteur du soleil, dans le modèle.

La version finale de la corrélation de la fraction diffuse est donnée le tableau 1 pour les trois sites algériens (Alger, Bechar et Tamanrasset), fonction de l'indice de clarté horaire et la hauteur du soleil.

La nouvelle corrélation réduit la valeur de CRSS d'un taux de 11.16 % en la comparant au modèle référencié  $K_{tcorr}$ . En comparant cette nouvelle corrélation à celle développée par DT Reindl, on y trouve une performance de 50.5 %. Ce qui conclut la nécessité d'avoir des modèles de rayonnement solaire spécifiques à l'Algérie.

#### NOMENCLATURE

<b>CRSS</b>	: Composite Residual Sum Square
<b>MAB</b>	: Mean Absolute error
<b><math>I_d</math></b>	: Rayonnement diffus horaire ( $J/cm^2$ )
<b><math>I_g</math></b>	: Rayonnement global horaire ( $J/cm^2$ )
<b><math>K_t</math></b>	: Indice de clarté horaire
<b>Sin (<math>\alpha</math>)</b>	: Hauteur du soleil

#### REFERENCES

- [1] B.Y.H. Liu and R.C. Jordan, 'The Interrelationship and Characteristic Distribution of Direct, Diffuse, and Total Solar Radiation', Solar Energy, Vol 4, pp. 1-19, 1960.
- [2] J.F. Orgill and K.G.T. Hollands, 'Correlation Equation for Hourly Diffuse Radiation on Horizontal Surface', Solar Energy, Vol 19, N°4, pp. 357-359, 1977.
- [3] D.G. Erbs, S.A. Klein and J.A. Duffie, 'Estimation of the Diffuse Radiation Fraction for Hourly, Daily and Monthly-Average Global Radiation', Solar Energy, Vol 28, N°4, pp. 293-302, 1982.
- [4] J.M. Bugler, 'The Détermination of Hourly Insolation on an Inclined Plane Using a Diffuse Irradiation Model Based on Hourly Measured Global Horizontal Insolation', Solar Energy, 19, pp. 477-491, 1977.
- [5] M. Iqbal, 'Prédiction of Hourly Diffuse Solar Radiation from Measured Hourly Global Radiation on Horizontal Surface', Solar Energy, 24, pp. 491-503, 1980.
- [6] M. Chikh and A. Malek, 'A Study of Diffuse Fraction of Hourly Global Horizontal Radiation at Three Sites in Algeria', W.R.E.C, Denver, U.S.A., 1996.
- [7] DT Reindl, W.A Beckman and J.A. Duffie, 'Diffuse Fraction Correlation', Solar Energy, Vol. 45, N°1, pp. 1-7, 1990.
- [8] M.A.C. Chendo and A.A.L. Maduekwe, 'Hourly Global and Diffuse Radiation of Lagos, Nigeria – Correlation with Some Atmospheric Parameters', Solar Energy, Vol. 52, N°3, pp. 247-251, 1994.
- [9] A. Skartveit and J.A. Olseth, 'A Model for the Diffuse Fraction of Hourly Global Radiation', Solar Energy, 38, pp. 271-274, 1987.

- [10] R. Astier, C. Duhamel et C. Bernard, '*Modèles de Précision et de Simulation de l'Irradiation Solaire au Pas de Temps de l'Heure*', Revue Physique Appliquée, N°18, pp. 29-38, 1983.
- [11] R.J. Stone, '*Improved Statistical Procedure for the Evaluation of Solar Radiation Estimation Models*', Solar Energy, Vol. 51, pp. 289-291, 1993.
- [12] C.P. Jacovidies, L. Hadjiannou, S. Pashiardis and L. Stefanou, '*On the Diffuse Fraction of Daily and Monthly Global Radiation for the Island of Cyprus*', Solar Energy, Vol. 56, N°6, pp. 565-572, 1996.