

Analyse Critique du Modèle de l'Atlas Solaire de l'Algérie

Abderrachid Mefti , Yacine Bouroubi et Abdallah Khellaf

Centre de Développement des Energies Renouvelables
B.P. 62, Route de l'Observatoire, Bouzaréah, Alger, Algérie

(Accepté le 26.09.99)

Résumé - Le présent article comporte une analyse critique de l'Atlas Solaire de l'Algérie réalisé par Capderou en 1987. L'auteur utilise un modèle de l'atmosphère basé fondamentalement sur la connaissance du trouble atmosphérique pour la détermination des différentes composantes du rayonnement solaire d'un site. Par ciel clair, le modèle donne une bonne estimation de la composante directe mais surestime la composante diffuse. Par ciel moyen, des fonctions de distribution permettent de générer le gisement solaire d'un site connaissant uniquement la moyenne mensuelle de l'insolation. Ces fonctions de distribution ont tendance à surestimer considérablement l'irradiation horaire moyenne. De nouveaux modèles sont proposés pour l'estimation de l'irradiation. Les résultats de ces modèles sont mieux corroborés par les données expérimentales et de ce fait, la précision est nettement améliorée.

Abstract - The actual paper presents an analysis of the Solar Atlas of Algeria as elaborated by Capderou. The author uses an atmospheric model fundamentally based on the knowledge of the atmospheric turbidity for the determination of the solar radiation different components at a given site. By clear sky, the model gives a good estimation of the direct component but overestimates the diffuse component. By average sky, distribution functions permit the determination of the solar resources at given site knowing only the monthly mean value of the insolation. These distribution functions have a tendency to considerably overestimate the mean hourly irradiation. New models are proposed to estimate the irradiation. The results of these models are better corroborated by the experimental data and thus improving the results precision.

Mots clés: Irradiation solaire - Durée d'insolation - Trouble atmosphérique - Densité de probabilité - Modélisation - Atlas solaire.

1. INTRODUCTION

Le gisement solaire est un ensemble de données décrivant l'évolution du rayonnement solaire disponible au cours d'une période donnée. Il est utilisé dans des domaines aussi variés que l'agriculture, la météorologie, les applications énergétiques et la sécurité publique.

Dans les systèmes d'exploitation de l'énergie solaire, le besoin de données d'insolation est d'une importance capitale aussi bien dans la conception et le développement de ces systèmes que dans l'évaluation de leurs performances. L'existence d'une solide et fiable base de données est une nécessité pour au moins la survie économique des installations de collection et de conversion de l'énergie solaire.

Bien qu'il existe un réseau de stations d'évaluation du gisement solaire, le nombre de ces stations est très limité. En Algérie, seules sept stations assurent depuis 1970 la mesure de la composante globale et diffuse du rayonnement solaire. Le nombre de ces stations étant insuffisant et c'est pour cela que divers modèles ont été proposés pour estimer le gisement solaire à une échelle locale ou régionale. Ces modèles s'étendent des codes de calcul les plus complexes et les plus sophistiqués aux simples relations empiriques. Le choix du modèle est dicté par la nature des données et par la précision recherchée.

Le présent article comporte une analyse critique de l'Atlas Solaire de l'Algérie (A.S.A.). Cet atlas élaboré par Capderou [1] sert de référence aux concepteurs de systèmes énergétiques solaires. Les différentes composantes du rayonnement solaire sont déterminées sur

l'ensemble du territoire algérien et une représentation cartographique à grande échelle y est présentée. Toutefois, d'une part l'Atlas Solaire n'a fait jusqu'à présent l'objet d'aucune validation et d'autre part les modèles utilisés sont relativement complexes et leur utilisation est peu répandue.

Pour ce faire, nous avons procédé, d'une part à une validation expérimentale des modèles de cet atlas sur les mesures effectuées par la station radiométrique du Centre. D'autre part, nous avons utilisé des modèles plus simples et mieux adaptés pour l'estimation en particulier des différentes composantes du rayonnement solaire par ciel moyen.

2. BASE DE DONNEES UTILISEE

La base de données utilisée est constituée d'une année complète de mesures enregistrées sur le site de Bouzaréah au cours de l'année 1987 à l'échelle de l'heure. Elle est constituée des composantes suivantes :

- Irradiation directe à incidence normale
- Irradiation diffuse reçue sur plan horizontal
- Irradiation globale reçue sur plan horizontal
- Irradiation globale reçue par un plan vertical orienté Sud
- Irradiation globale reçue par un plan vertical orienté Est
- Irradiation globale reçue par un plan vertical orienté Ouest
- Albédo.

Une série de mesures d'insolation journalière enregistrée sur la station d'Alger entre 1952 et 1988, soit durant 37 années de mesures, a été utilisée pour l'ajustement du modèle utilisé pour l'estimation du rayonnement solaire par ciel moyen.

Des données de pression, de température et d'humidité relative enregistrées au cours de l'année 1987 ont été utilisées pour l'ajustement du modèle d'estimation du rayonnement solaire par ciel clair.

3. PRESENTATION DU MODELE UTILISE DANS L'A.S.A.

La méthodologie adoptée par Capderou est basée sur l'utilisation du trouble atmosphérique pour calculer les composantes directe et diffuse de l'irradiation reçue sur un plan d'inclinaison et d'orientation variable, à partir d'un modèle de l'atmosphère. Dans ce modèle, les irradiances directe et diffuse par ciel clair sont exprimées en fonction des facteurs de trouble correspondants aux constituants absorbants et diffusifs de l'atmosphère en l'occurrence, les gaz atmosphériques (O_2 , O_3 , CO_2), les aérosols et la vapeur d'eau.

Par ciel moyen, ces composantes sont estimées à l'aide du modèle probabiliste de Perrin de Brichambaut [1], basé sur la distribution de probabilité de l'insolation journalière en fonction de sa moyenne mensuelle, ainsi que de l'irradiation directe horaire en fonction de sa somme journalière. Cette procédure permet de simuler l'irradiation globale horaire moyenne reçue sur différents plans à partir uniquement de la moyenne mensuelle de l'insolation.

Une correction supplémentaire est introduite par l'auteur pour ajuster la surestimation systématique des irradiances globales moyennes estimées. Ce facteur de correction a été déduit à partir de corrélations établies à l'échelle du mois entre l'irradiation globale et l'insolation.

3.1 Irradiation globale reçue sur plan horizontal par ciel clair

La modélisation de l'irradiation par ciel clair est basée sur la connaissance du facteur de trouble atmosphérique, qui est le rapport entre l'extinction du rayonnement solaire direct traversant l'atmosphère sous une incidence donnée et celle du rayonnement solaire traversant une atmosphère de référence constituée uniquement d'air pur et sec sous la même incidence.

Plusieurs formulations mathématiques du trouble atmosphérique sont proposées par la littérature [2-9]. Dans cette étude, le facteur de trouble atmosphérique de Linke T_L^* par ciel clair est donné par :

$$T_L^* = T_0 + T_1 + T_2 \quad (3.1)$$

Les définitions et les expressions de ces facteurs partiels de trouble sont donnés en Annexe A.

- L'éclairement dû au rayonnement direct obtenu sur plan horizontal dépend uniquement du facteur de trouble de Linke. Il est donné par :

$$I_- = I_0 \sin(h) \exp \left\{ -T_L^* \left[0,9 + \frac{9,4}{(0,89)^Z} \sin(h) \right]^{-1} \right\} \quad (3.2)$$

où h est la hauteur du soleil et z représente l'altitude du lieu.

- L'éclairement dû au rayonnement diffus obtenu sur plan horizontal dépend également du facteur de trouble diffusif $T'_{LD} = T_1 + T_2 = T'_L - T_0$. Il est donné par :

$$\begin{cases} D_- = I_0 \exp(-1 + 1,06 \log(\sin(h)) + a - \sqrt{b^2 + a^2}) \\ b = \log(T'_L - T_0) - 2,80 + 1,02(1 - \sin(h))^2 \end{cases} \quad \text{et} \quad a = 1,1 \quad (3.3)$$

- L'éclairement global est, naturellement, la somme des éclairements direct et diffus.

$$G_- = I_- + D_- \quad (3.4)$$

3.2 Irradiation globale moyenne reçue sur plan horizontal

Le principe de l'estimation de l'irradiation moyenne est basé sur une approche probabiliste. Elle consiste à estimer la densité de probabilité d'une série de données en fonction de leur moyenne couplée à une corrélation entre la fraction d'insolation journalière et la fraction d'irradiation directe journalière. Ceci permettra de déterminer le trouble atmosphérique additif dû à la présence des nuages. L'estimation de l'irradiation s'obtient comme pour le cas du ciel clair à l'aide du trouble atmosphérique total.

$$T_L = T_L^* + \Delta T \quad (3.5)$$

Schématiquement, le déroulement de la procédure d'estimation de l'irradiation moyenne horaire est le suivant :

$$\bar{\sigma} \xrightarrow{M} \sigma \xrightarrow{F1} K_b \xrightarrow{Q} k_b \xrightarrow{F2} \Delta T$$

Les irradiances horaires moyennes directe et diffuse, fonctions du trouble atmosphérique, sont obtenues à partir de $\bar{\sigma}$ comme suit :

$$\bar{\sigma} \rightarrow (M \circ F1 \circ Q \circ F2) = P \rightarrow \Delta T(J)$$

Ces fonctions sont présentées en Annexe B.

$$\text{L'éclairement direct moyen : } \hat{I}_- = I_0 \sin(h) \sum_{J=1}^6 P(J) \exp \left(\frac{-T_L(J)}{0,9 + \frac{9,4}{(0,89)^Z} \sin(h)} \right) \quad (3.6)$$

$$\text{L'éclairement diffus moyen : } \hat{D}_- = \sum_{J=1}^6 P(J).d(J) \quad (3.7.a)$$

$$\text{où : } \begin{cases} d(J) = I_0 \exp(-1 + 1,06 \log(\sin(h)) + a - \sqrt{b^2 + a^2}) \\ b = \log(T_L(J) - T_0) - 2,80 + 1,02(1 - \sin(h))^2 \end{cases} \quad \text{et} \quad a = 1,1 \quad (3.7.b)$$

3.3 Irradiation globale (maximale et moyenne) sur plan incliné

Les irradiations directe et diffuse reçues sur plans variables (inclinaison et orientation) sont obtenues à l'aide des relations suivantes :

a) Composante directe sur plan incliné :

$$I_{\alpha} = I_n \cdot \cos(i) \quad \text{avec : } I_n = \frac{I}{\sin(h)}$$

où i est l'angle d'incidence des rayons solaires sur le plan considéré.

b) Composante diffuse sur plan incliné :

La composante diffuse reçu sur un plan incliné se décompose comme suit :

$$D_{\alpha} = D_{\alpha}^d + D_{\alpha}^i + D_{\alpha}^h + D_{\alpha}^a \quad (3.8)$$

$$\text{avec : } \begin{array}{ll} D_{\alpha}^d : \text{diffus directionnel (ou circumsolaire)} & D_{\alpha}^a : \text{diffus du sol} \\ D_{\alpha}^h : \text{diffus du cercle de l'horizon} & D_{\alpha}^l : \text{diffus isotrope du ciel} \end{array}$$

Les expressions de ces composantes de diffus sont données en Annexe C.

4. PRESENTATION DES MODIFICATIONS

Les modifications que nous avons apportées au modèle de l'A.S.A concernent la formulation du trouble atmosphérique (absorbant et diffusif), le choix des paramètres et du type de distribution de la densité de probabilité de la fraction d'insolation journalière en fonction de la moyenne mensuelle, ainsi que du choix de la densité de probabilité de la fraction d'irradiation directe horaires en fonction de la moyenne journalière.

Parmi les formulations mathématiques du trouble atmosphérique [2-9], nous avons recensé celles qui relient ce dernier aux composantes directe et diffuse de l'irradiation solaire. En outre, nous avons choisi la fonction de distribution de probabilité qui s'adapte au mieux aux mesures horaires et journalières [10-16]. La formulation mathématique de ces fonctions de distribution est donnée respectivement en 4.2 et 4.3. Le modèle modifié est appelé dans le texte *Modèle 'Cap. Ajusté'*.

4.1 Trouble atmosphérique par ciel clair

Le modèle d'estimation du trouble atmosphérique le plus récent est celui présenté par Kasten [7] en 1996. Il exprime le trouble de Linke T_L à partir de l'irradiation directe reçue sur plan normal par journée de ciel clair de la façon suivante :

$$T_L = \frac{1}{\delta_R m_a} \log \left(\frac{I_{n0}}{I_n} \right) \quad (4.1)$$

$$\text{avec } \delta_R = \left(6,6296 + 1,7513 m_a - 0,1202 m_a^2 + 0,0065 m_a^3 - 0,00013 m_a^4 \right)^{-1}$$

La figure 1 montre la comparaison entre le trouble de Linke modélisé par Capderou (A.2), celui calculé à partir de mesures à l'aide du modèle de Kasten (4.1) et celui calculé par l'expression théorique donnée par les équations (3.1) et (A.1) en fonction de la hauteur d'eau condensable. On remarque que les écarts entre les trois estimations ne sont pas très élevés. Toutefois, dans la plupart des cas, le modèle 'Cap.' présente plutôt une légère surestimation qui se répercutera sur l'estimation de l'irradiation directe par jour clair.

D'autre part, nous avons recalculé le trouble diffusif par ciel clair à partir de l'expression (3.3) où nous avons sélectionné, pour chaque mois, une séquence de données d'irradiation diffuse correspondant à une journée de ciel clair. Ce trouble diffusif calculé à partir des données sera utilisé comme trouble diffusif par ciel clair pour le modèle 'Cap. Ajusté'.

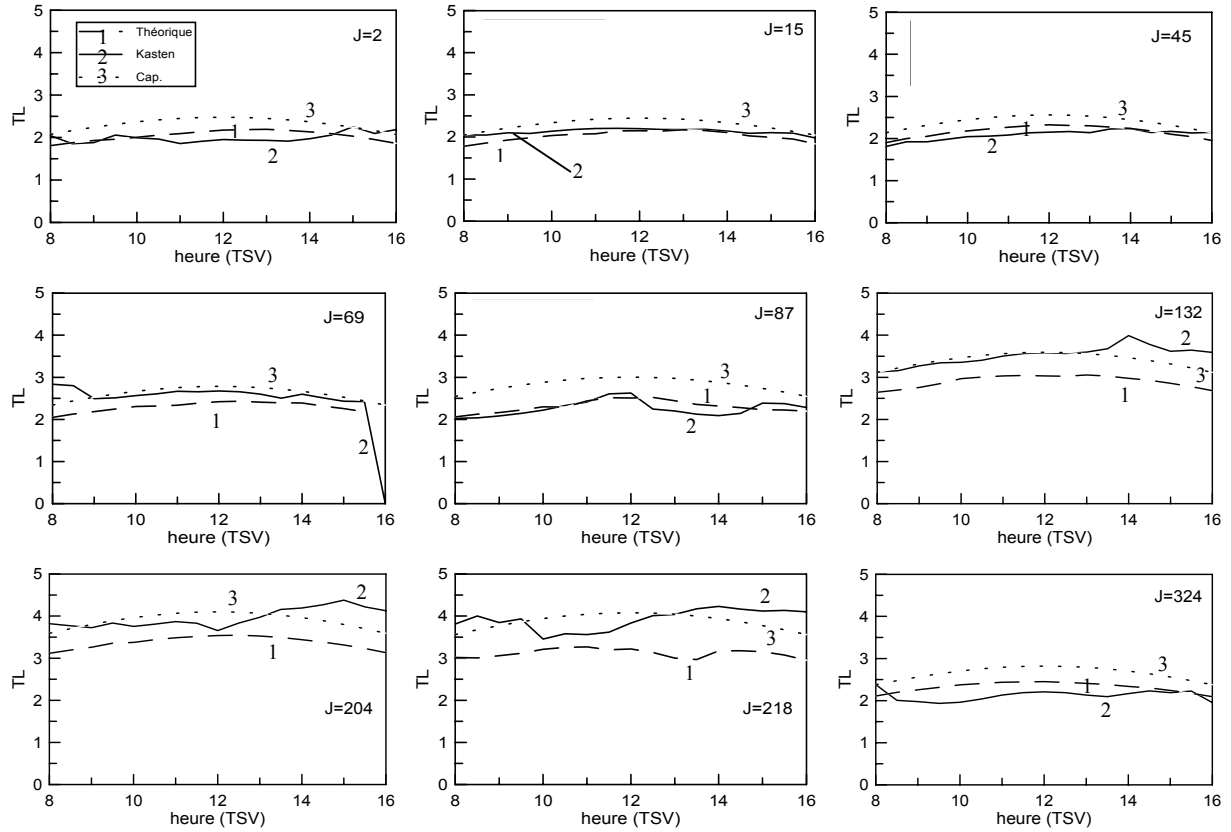


Fig. 1: Comparaison du trouble de Linke modélisé par Capderou, celui calculé l'aide du modèle de Kasten et celui calculé par le modèle théorique

4.2 Densité de probabilité de la fraction d'insolation journalière en fonction de la moyenne mensuelle

La détermination de la fonction de distribution de probabilité $p(\sigma, \bar{\sigma})$ nécessite la connaissance de la moyenne mensuelle $\bar{\sigma}$ et des valeurs extrêmes $\sigma_{\min}$ et $\sigma_{\max}$ pour le mois et le site en question. L'expression de la densité de probabilité est : [10]

$$p(\sigma) = C \exp(\alpha \sigma) \quad (4.2)$$

avec
$$C = \frac{\alpha}{\exp(\alpha \sigma_{\max}) - \exp(\alpha \sigma_{\min})} \quad (4.3)$$

et α doit vérifier :
$$\frac{1}{\sigma} = \frac{(\sigma_{\min} - \frac{1}{\alpha}) \exp(\alpha \sigma_{\min}) - (\sigma_{\max} - \frac{1}{\alpha}) \exp(\alpha \sigma_{\max})}{\exp(\alpha \sigma_{\min}) - \exp(\alpha \sigma_{\max})} \quad (4.4)$$

La vérification de la méthode consiste à comparer les fonctions de distribution de probabilité calculées par cette méthode avec celles obtenues à partir des données réelles.

Nous avons groupé ensemble les mois ayant la même moyenne $\bar{\sigma} \pm 0,025$ et nous avons calculé la densité de probabilité de σ mesurée pour chaque groupe de mois. Nous avons ensuite estimé la densité de probabilité exprimée par ce modèle pour les différentes classes de $\bar{\sigma}$ en prenant pour valeurs extrêmes $\sigma_{\min} = 0,05$ et $\sigma_{\max} = 0,95$. Les courbes représentées sur la figure 2 montrent que les fonctions $p(\sigma, \bar{\sigma})$ de données mesurées et simulées 'Cap. Ajusté' sont très proches pour tous les types de mois. On remarque, par contre, que la

fonction de distribution de probabilité utilisée par le modèle 'Cap.' sous-estime considérablement les faibles fractions d'insolation et surestime les fractions d'insolation moyennes.

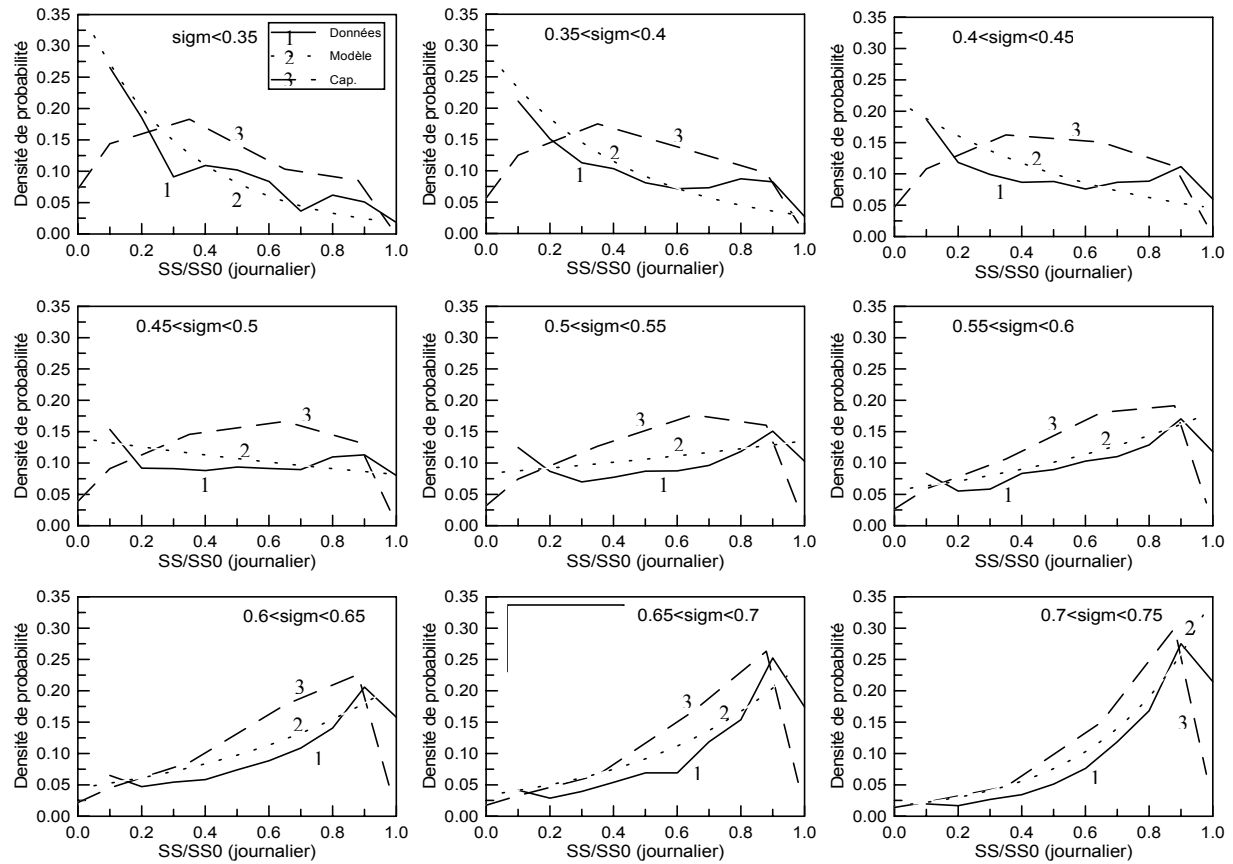


Fig. 2: Comparaison des densités de probabilité de la fraction d'insolation journalière mesurée et avec les densités de probabilité modélisées par Cap. et Cap. Ajusté.

4.3 Densité de probabilité de la fraction d'irradiation directe en fonction de sa moyenne journalière

Nous remarquons sur la figure 3 que la distribution de la fraction d'irradiation directe horaire est bimodale. Elle présente pour tous les types de journées un lobe principal et un lobe secondaire. Nous proposons donc, comme d'ailleurs plusieurs autres auteurs [12-15], une modélisation basée sur l'association de deux fonctions bêta : l'une correspondant au lobe principal et l'autre au lobe secondaire.

$$p(k_b, K_b) = \omega \beta(k_b, p_1, q_1) + (1 - \omega) \beta(k_b, p_2, q_2) \quad (4.5)$$

avec $\omega = 1,98 K_b^3 - 2,39 K_b^2 - 0,015 K_b + 1,014$

Nous avons ajusté les paramètres (p_1, q_1) et (p_2, q_2) des deux fonctions bêta en fonction de la moyenne journalière de la fraction d'irradiation directe K_b mesurée sur le site de Bouzaréah. Nous avons obtenu les expressions suivantes :

$$p_1 = \exp(10,34 K_b^3 - 13,36 K_b^2 + 8,48 K_b - 2,02)$$

$$q_1 = \exp(-7,17 K_b^3 + 15,16 K_b^2 - 9,35 K_b + 2,22)$$

$$p_2 = \exp(10,16 K_b^3 - 14,60 K_b^2 + 10,55 K_b - 1,44)$$

$$q_2 = \exp(-4,77 K_b^3 + 11,60 K_b^2 - 8,34 K_b + 2,55)$$

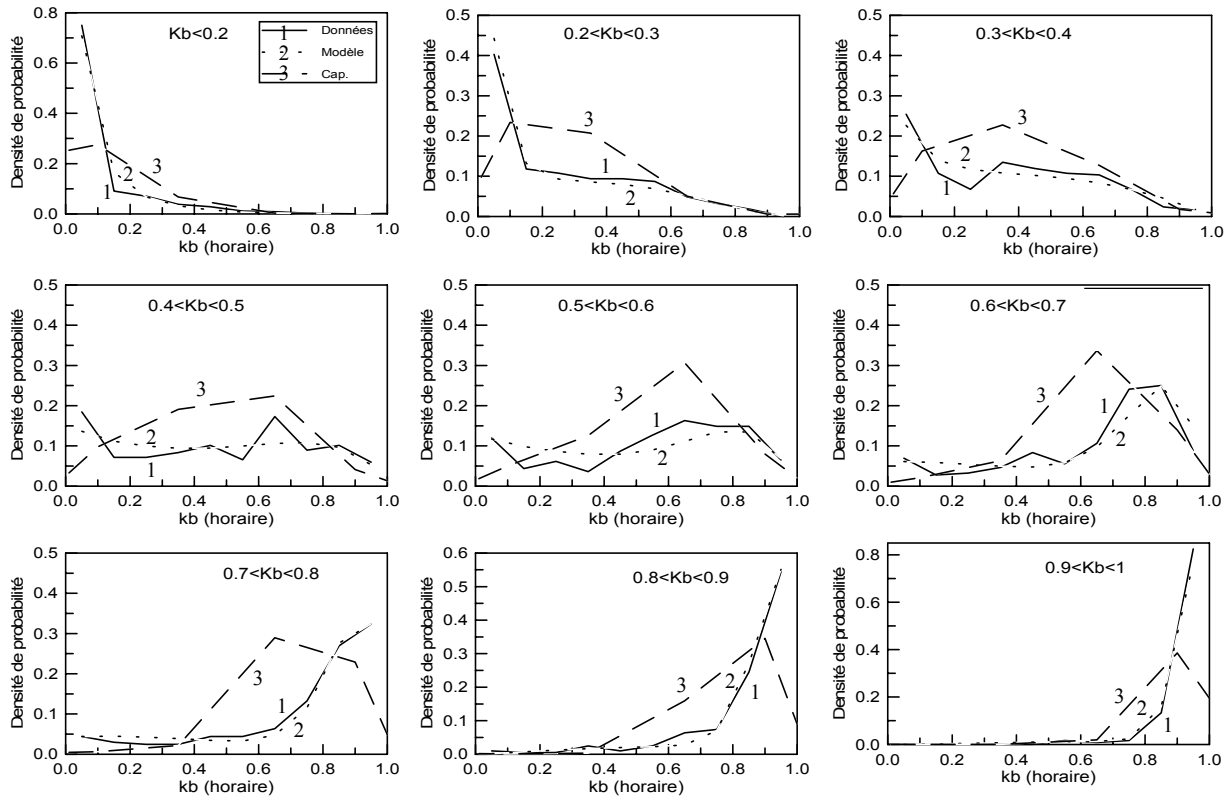


Fig. 3: Comparaison des densités de probabilité de la fraction d'irradiation directe horaire mesurée et avec les densités de probabilité modélisées par Cap. et Cap. Ajusté

5. RESULTATS ET DISCUSSIONS

Nous avons appliqué la méthodologie d'estimation de l'irradiation solaire horaire sur différents plans au site de Bouzaréah de la façon suivante : Ayant les moyenne mensuelles de l'insolation, on génère les données d'irradiation horaire par ciel clair et par ciel moyen pour les différents plans et par les deux modèles 'Cap.' et 'Cap. Ajusté'. On présente ici, à titre d'illustration, un mois pour chaque saison.

5.1 Irradiation horaire par ciel clair

Pour l'irradiation horaire par ciel clair, nous avons utilisé l'expression du trouble de Linke lissé par Capderou et celui donné par Kasten pour calculer les irradiances directe, diffuse et globale sur les plans - Horizontal, Est, Ouest, Sud -. Nous avons comparé les résultats obtenus avec les mesures.

Sur la figure 4, on constate que l'irradiation directe estimée par le modèle 'Cap.', en général, s'écarte peu de la mesure. Une légère sous-estimation est due à une surestimation du trouble de Linke illustrée sur la figure 1. Le modèle 'Cap. Ajusté' présente, une meilleure concordance entre les estimations et les mesures. Sur la figure 5, on constate, dans la plupart des cas, une surestimation importante de l'irradiation diffuse reçue par ciel clair par le modèle 'Cap.'. Cette surestimation peut atteindre jusqu'à 40 %. Elle est probablement due, d'une part à l'expression (3.3) donnant le diffus en fonction du trouble atmosphérique et d'autre part aux valeurs utilisées du coefficient de trouble d'Angström (A.4 et A.5) jugées représentatives de l'effet des aérosols dans la diffusion du rayonnement solaire.

Les figures 6, 7, 8 et 9 qui illustrent l'évolution des irradiances globales obtenues respectivement sur les plans - Horizontal, Est, Ouest, Sud -. On constate que les estimations sont assez correctes sauf pour les plans orientés Est et Ouest pendant la période de la journée où l'on enregistre uniquement le diffus.

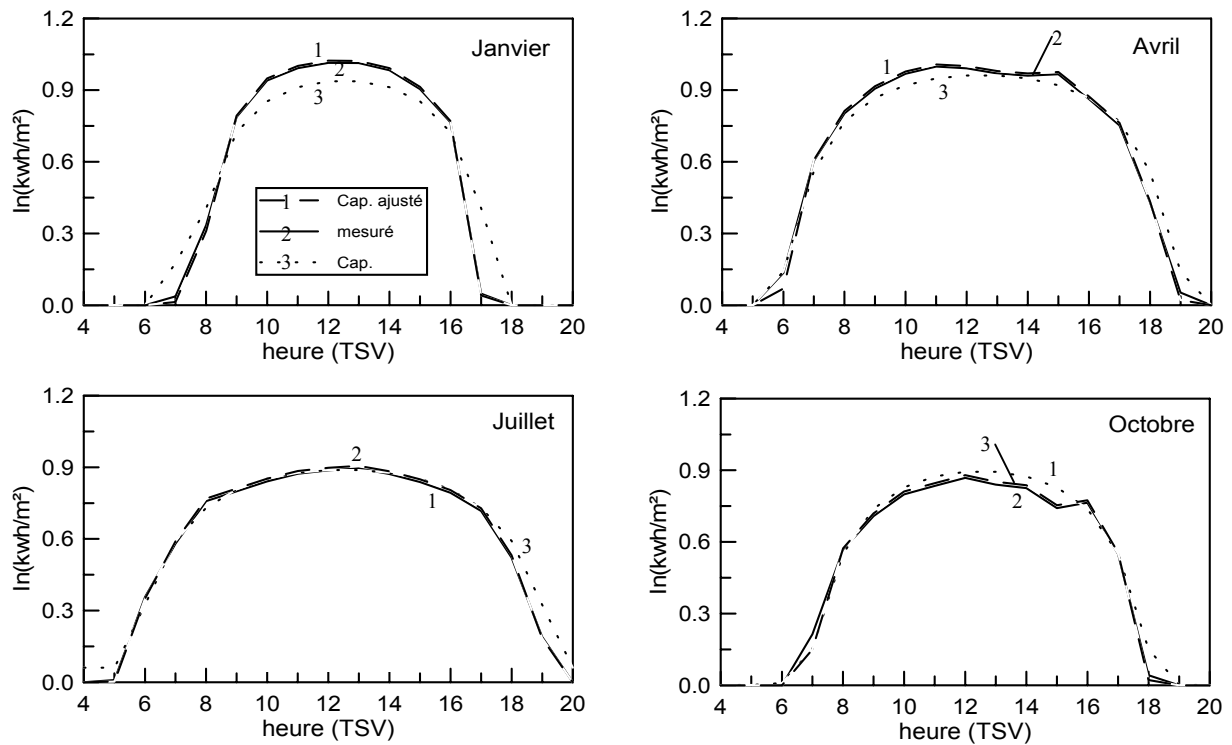


Fig. 4: Irradiation directe normale par ciel clair mesurée et simulée par les modèles Cap et Cap Ajusté

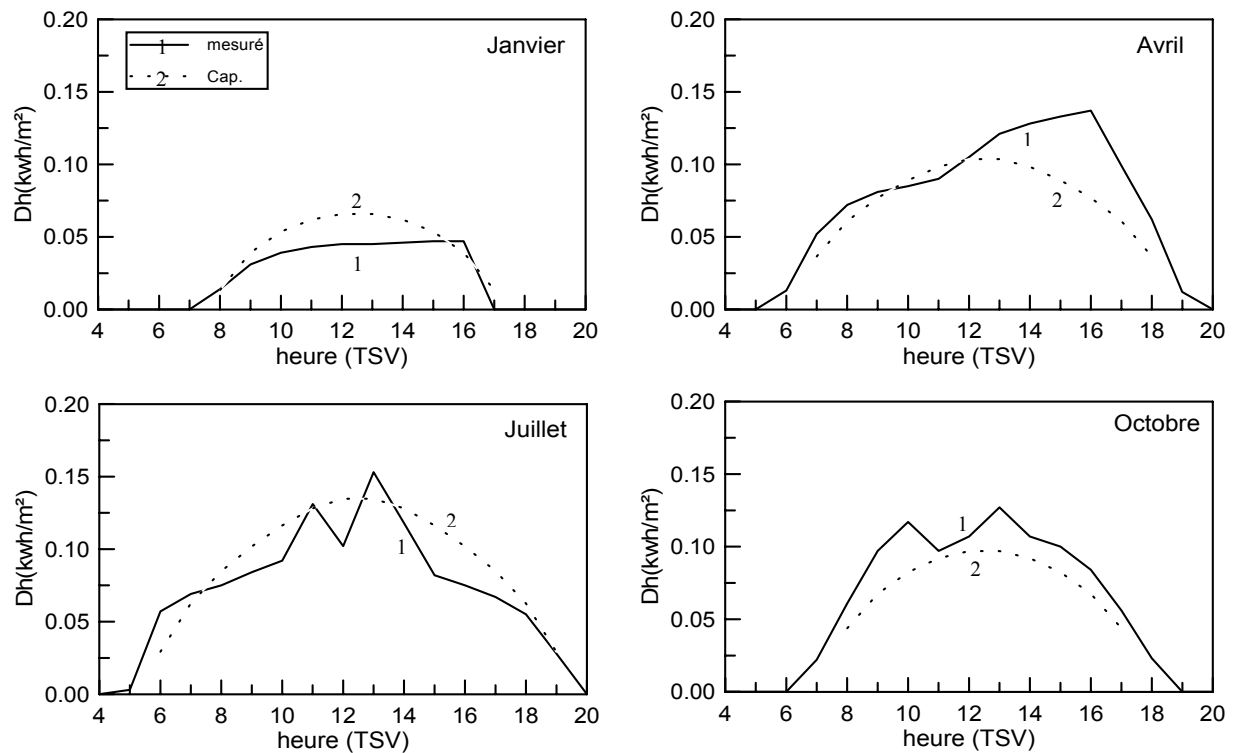


Fig. 5: Irradiation diffuse horizontale par ciel clair mesurée et simulée par les modèles Cap et Cap Ajusté

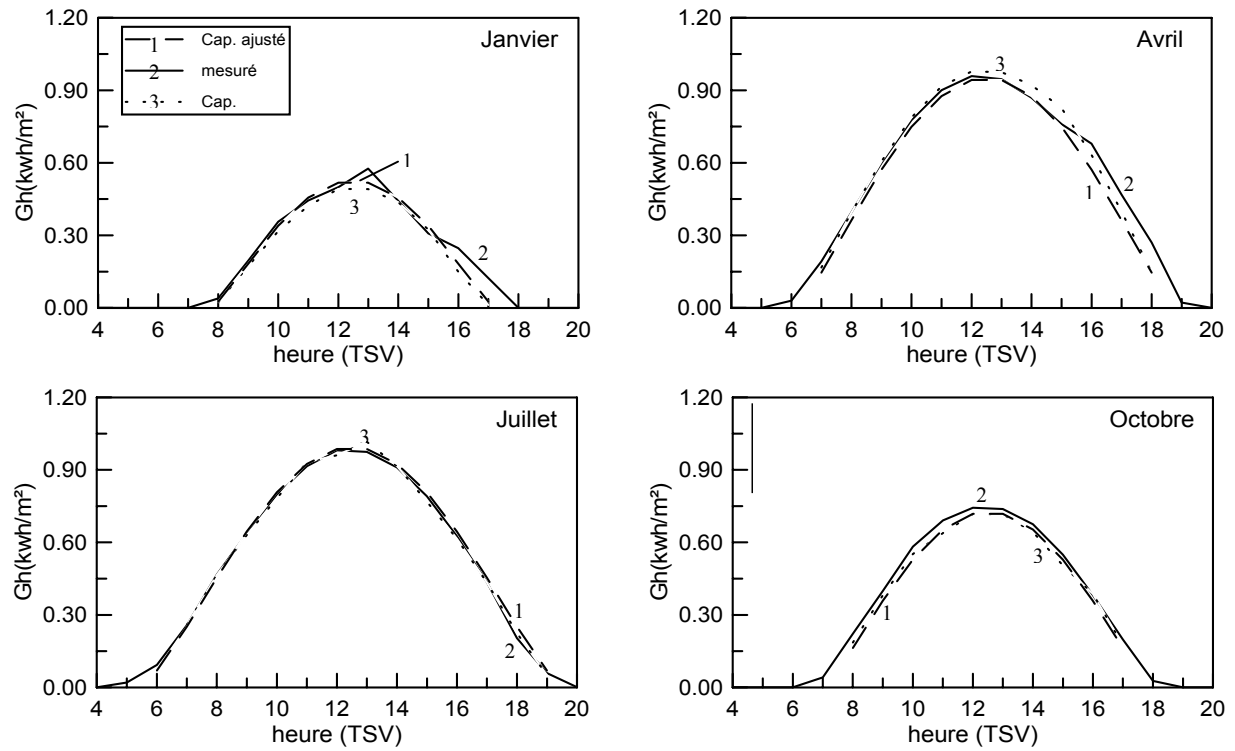


Fig. 6: Irradiation globale horizontale par ciel clair mesurée et simulée par les modèles Cap et Cap Ajusté

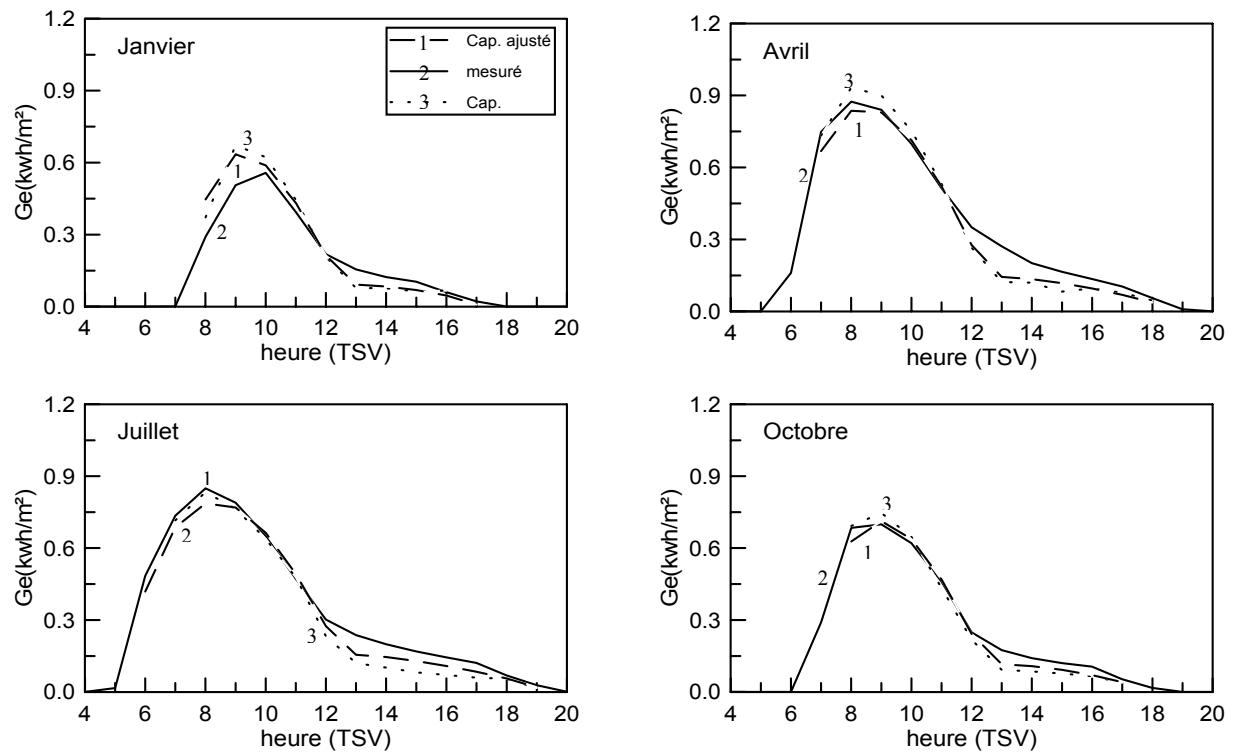


Fig. 7: Irradiation globale sur plan Est par ciel clair mesurée et simulée par les modèles Cap et Cap Ajusté

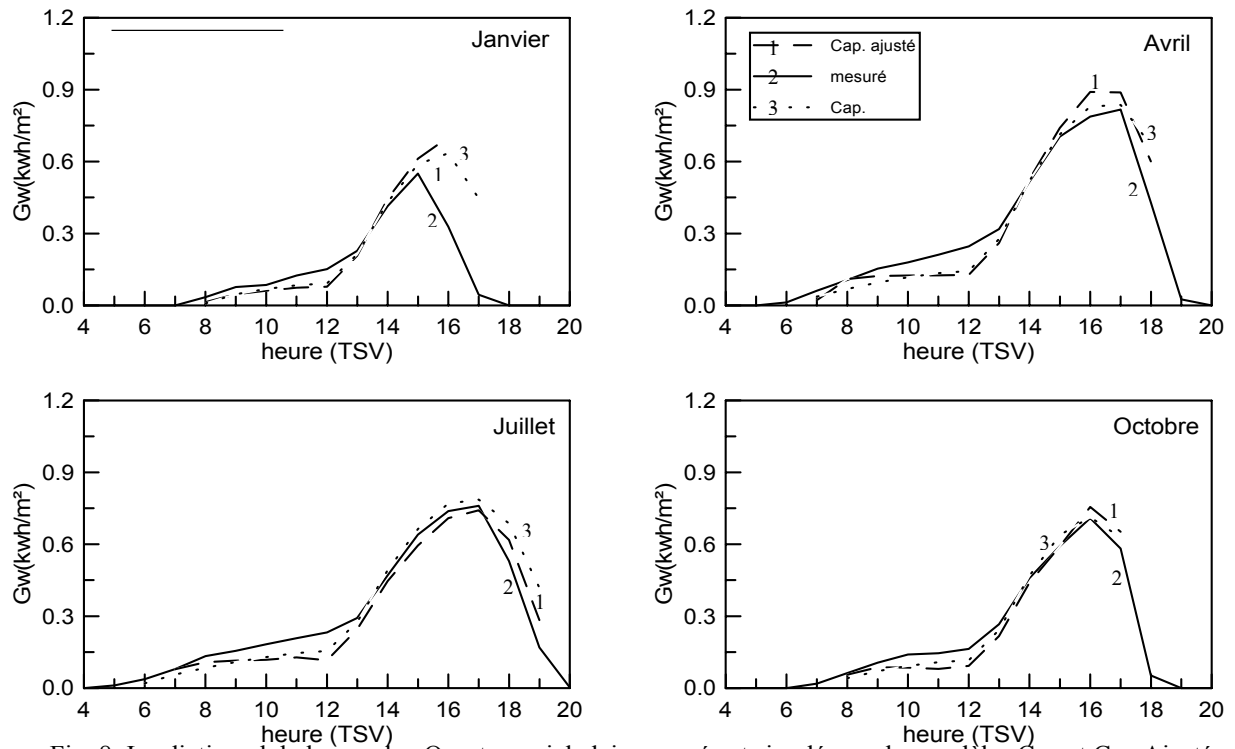


Fig. 8: Irradiation globale sur plan Ouest par ciel clair mesurée et simulée par les modèles Cap et Cap Ajusté

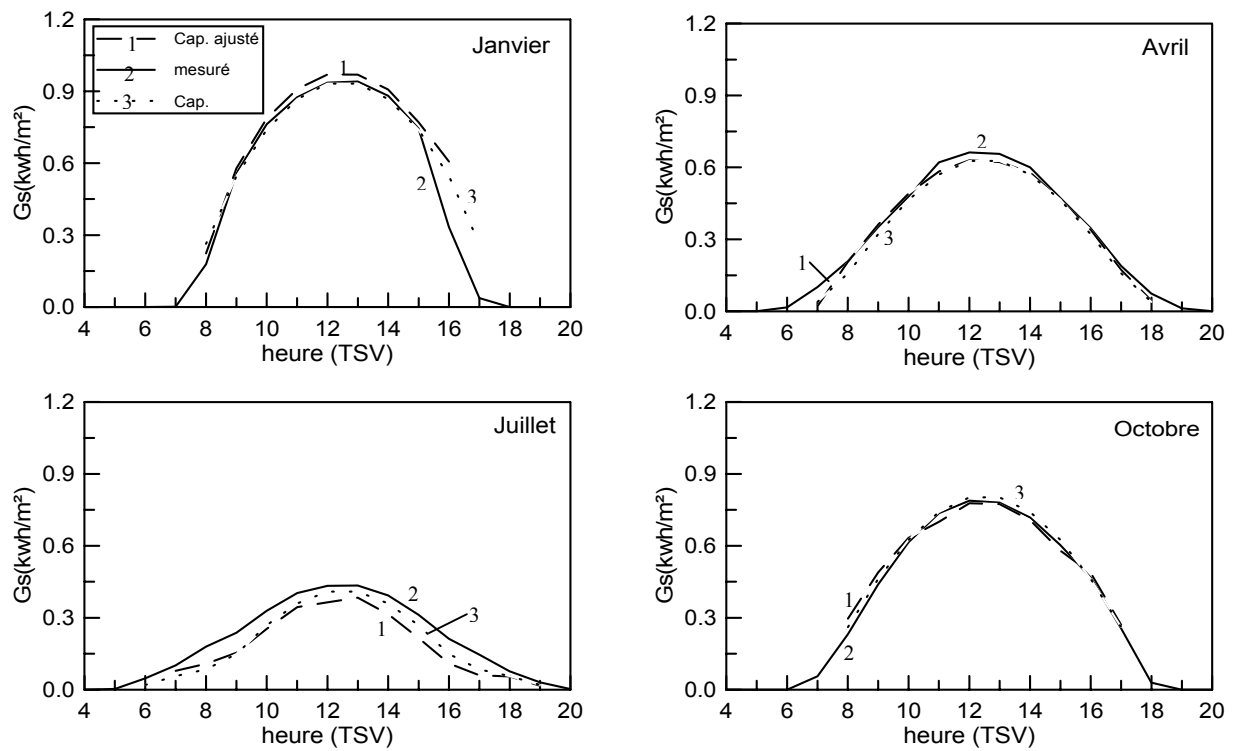


Fig. 9: Irradiation globale sur plan Sud par ciel clair mesurée et simulée par les modèles Cap et Cap Ajusté

5.2 Irradiation horaire par ciel moyen

Afin de déterminer l'irradiation horaire par journée moyenne, nous avons simulé les irradiances directe normale, diffuse horizontale et globales - Horizontal, Est, Ouest, Sud - par les deux modèles 'Cap.' et 'Cap. Ajusté'. Rappelons que ces modèles estiment les irradiances horaires moyennes à partir de la moyenne mensuelle de l'insolation à l'aide de la méthode probabiliste de Perrin de Brichambaut et celle développée en 4.2 et 4.3. Les résultats sont présentés en figures 10 à 15.

La figure 10 présente la comparaison de l'irradiation directe normale simulée par les deux modèles cités avec les données réelles. On constate que le modèle 'Cap.' donne une surestimation systématique importante pouvant atteindre 30 % et plus. Cette surestimation s'explique, en se référant à la figure 2, par le fait que pour les mois où $\bar{\sigma} < 0,55$, la densité de probabilité des journées de ciel couvert ($\sigma < 0,2$) présente une sous estimation par rapport à la densité de probabilité des données réelles. De même, pour les mois où $\bar{\sigma} > 0,55$, la densité de probabilité des journées de beaux temps est surestimée. En outre, la figure 3 montre que, pour les journées de K_b faible, la densité de probabilité des fractions d'irradiation directe horaire k_b est sous-estimée. Ces deux sources d'erreur sur les modèles de densité de probabilité engendrent systématiquement la surestimation de l'irradiation directe. La modification de ces deux modèles de densité de probabilité du 'Cap.', présentée en 4.2 et en 4.3, a permis une estimation nettement meilleure de l'irradiation directe normale par jour moyen. Sur la figure 11, est présentée la comparaison entre les irradiances diffuses moyennes mesurées et celles simulées par les deux modèles. On remarque que le modèle 'Cap. Ajusté' conduit donc à une surestimation, alors que le modèle 'Cap.', par contre, donne une bonne estimation. Nous expliquons cela de la manière suivante : D_h est calculé à partir du trouble diffusif par l'expression (3.3), soit $D_h = f_1(T_{LD})$, qui lui-même (T_{LD}) est calculé à partir de la fraction de l'irradiation directe par l'expression B.2, soit $T_{LD} = f_2(k_b)$. D_h est donc calculé à partir de k_b par une fonction $f_3 = f_1 \circ f_2$ d'où $D_h = f_3(k_b)$. Les fonctions f_1 , f_2 et f_3 sont illustrées sur la figure 16 pour les mois de janvier et de juillet et pour différentes heures TSV. La surestimation du diffus se situe donc entre ces deux fonctions f_1 et f_2 . Il est possible que f_1 surestime le diffus en fonction du trouble diffusif comme il est possible que, même si f_2 est une fonction précise, le trouble calculé à partir de k_b n'est pas entièrement diffusif. Cette surestimation n'apparaît pas pour le modèle 'Cap.', car il y a une compensation entre la surestimation du diffus instantané et la surestimation de la densité de k_b élevé pour lequel le diffus est faible comme le montre figure 16 (sous estimation du diffus à partir de k_b). Sur la figure 12, où est représentée l'évolution de l'irradiation globale horizontale mesurée et simulée, on constate que les deux modèles donnent une surestimation. Celle due au modèle 'Cap.' est inhérente à l'erreur sur la composante directe. La surestimation due au modèle 'Cap. Ajusté' est engendrée par l'erreur commise sur la composante diffuse et elle est moins importante. L'évolution des irradiances globales reçues sur les plans inclinés Est, Ouest et Sud sont présentées sur les figures 13, 14 et 15. On note que les écarts sont plus importants que ceux observés dans cas du plan horizontal. Ceci est éventuellement dû à la formulation du diffus sur plan incliné où interviennent les composantes circumsolaire, isotrope, celle du cercle de l'horizon et celle réfléchiée par le sol avec des proportions différentes pour les deux dernières composantes. En effet une erreur supplémentaire (par rapport au plan horizontal) est introduite à cause de la contribution importante des composantes du cercle de l'horizon et de celle réfléchiée par le sol.

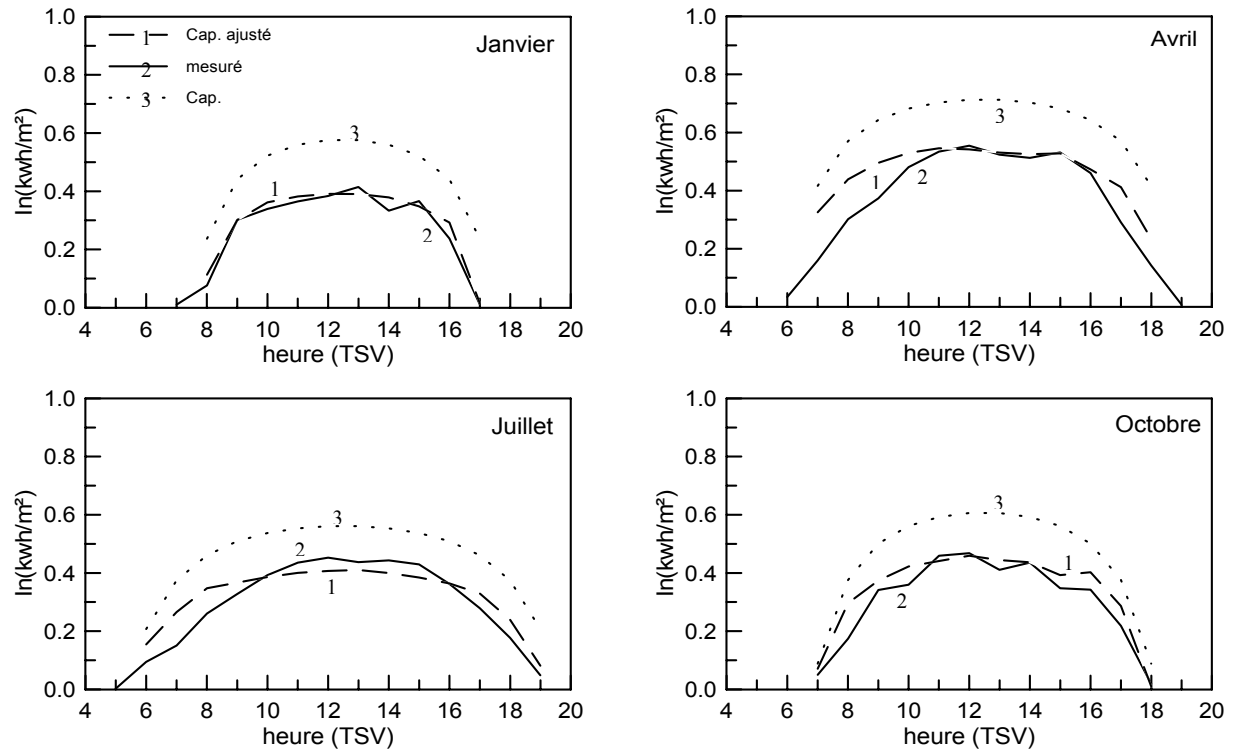


Fig. 10: Irradiation directe normale par ciel moyen mesurée et simulée par les modèles Cap et Cap Ajusté

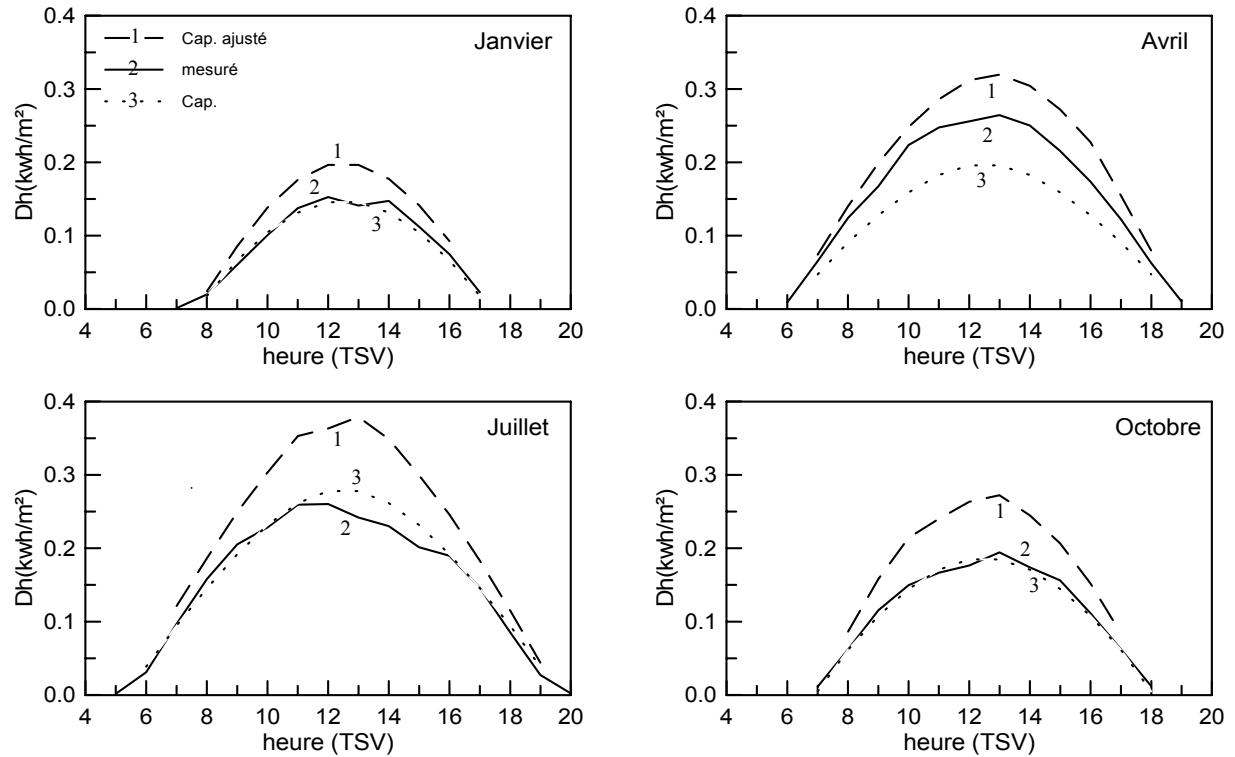


Fig. 11: Irradiation diffuse horizontale par ciel moyen mesurée et simulée par les modèles Cap et Cap Ajusté

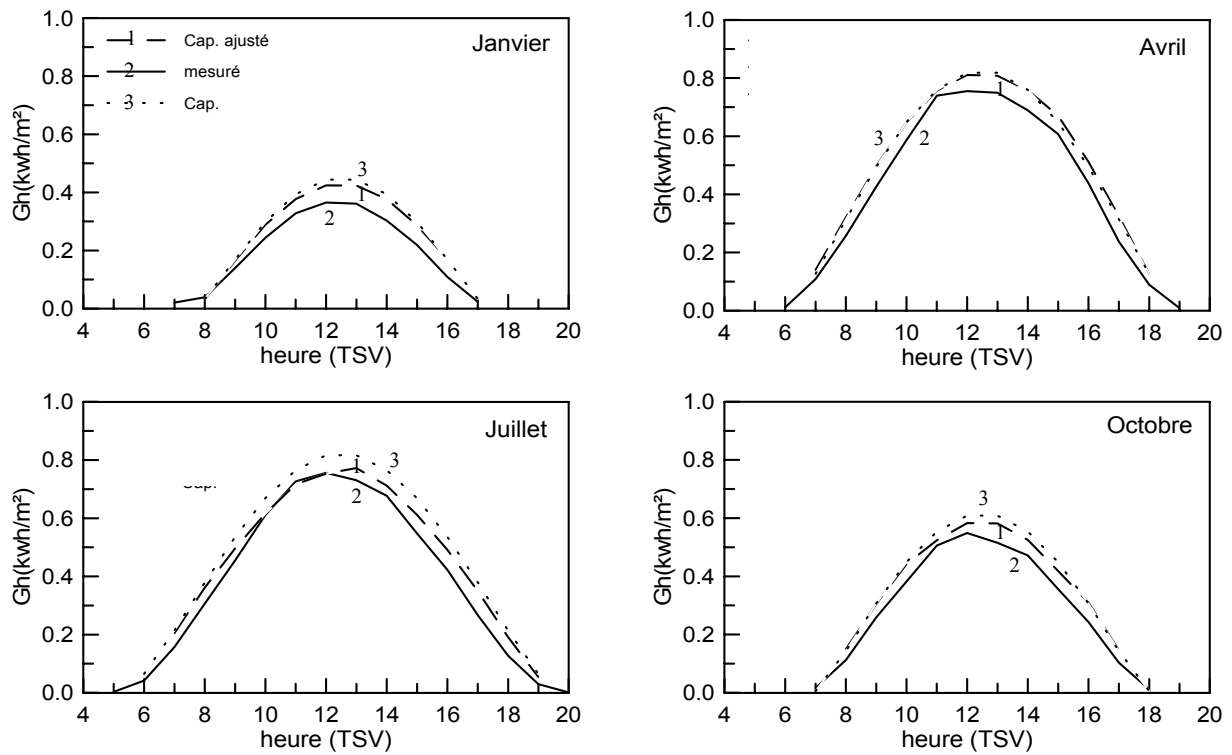


Fig. 12: Irradiation globale horizontale par ciel moyen mesurée et simulée par les modèles Cap et Cap Ajusté

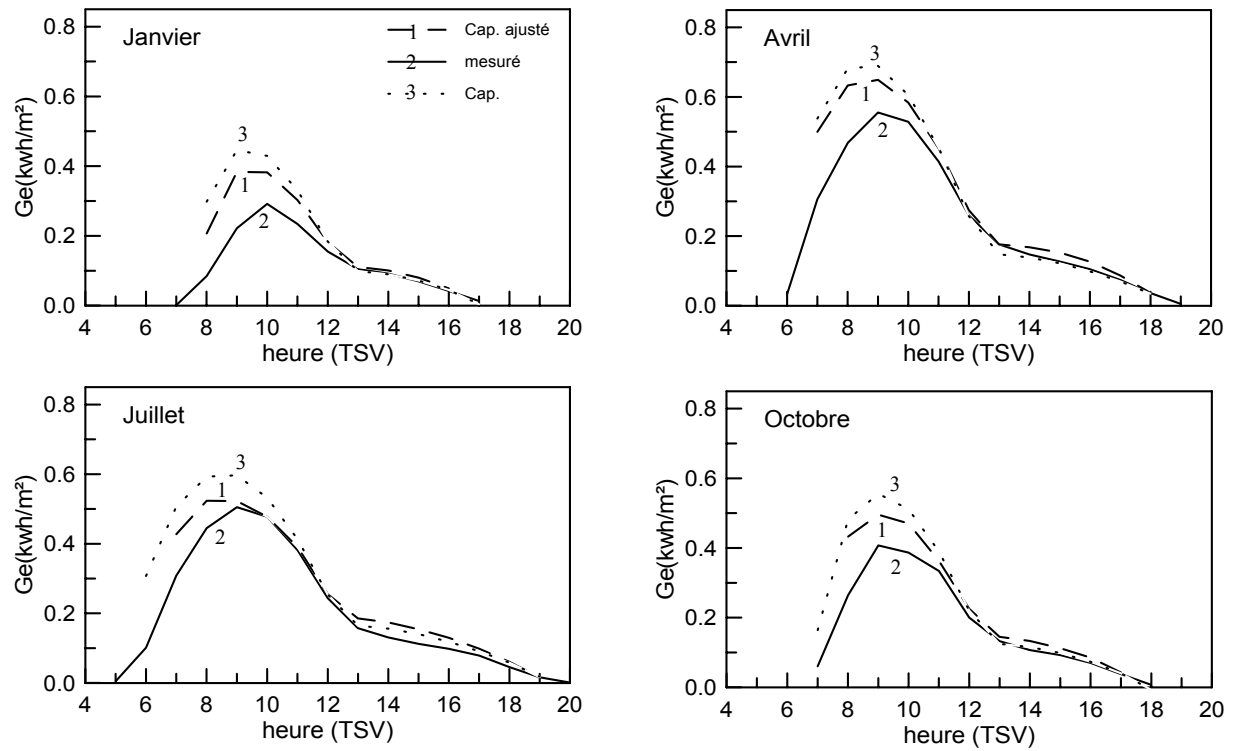


Fig. 13: Irradiation globale sur plan Est par ciel moyen mesurée et simulée par les modèles Cap et Cap Ajusté

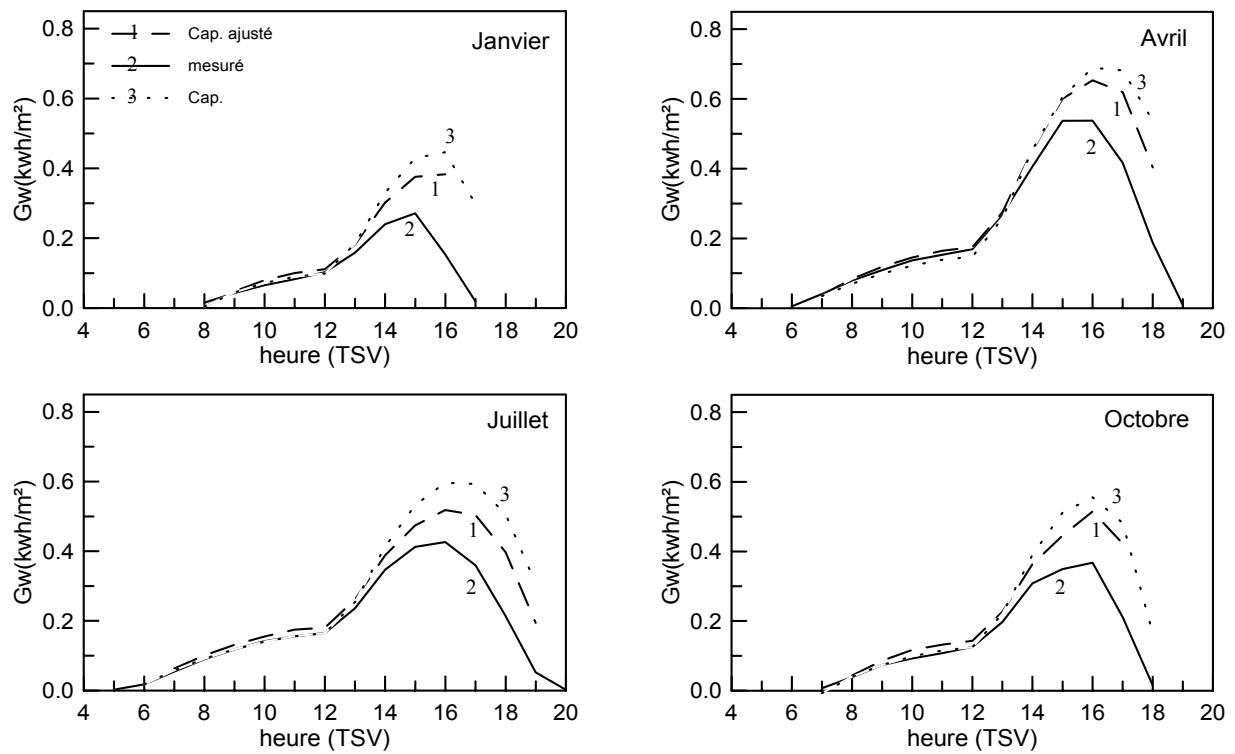


Fig. 14: Irradiation globale sur plan Ouest par ciel moyen mesurée et simulée par les modèles Cap et Cap Ajusté

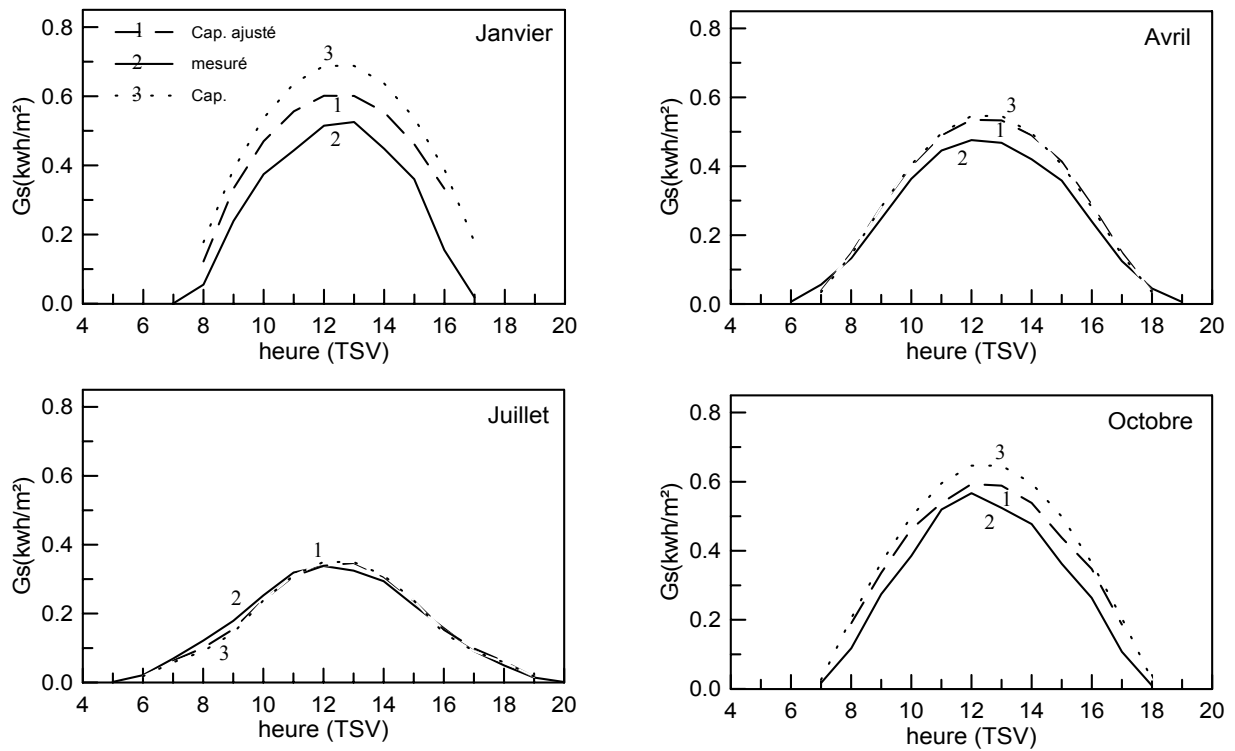


Fig. 15: Irradiation globale sur plan Sud par ciel moyen mesurée et simulée par les modèles Cap et Cap Ajusté

6. CONCLUSION

A travers cette étude, nous avons tenté d'apporter une analyse critique sur le modèle Atlas Solaire de l'Algérie (A.S.A.) qui sert actuellement de référence aux concepteurs des systèmes solaires. Une validation expérimentale nous a permis de nous affranchir sur le degré de précision. Si par ciel clair, la précision est acceptable, par ciel moyen les modèles de densités de probabilité ainsi que la formulation du diffus introduisent une erreur d'estimation non négligeable.

L'avantage de l'approche utilisée par l'auteur est qu'elle permet de générer, grâce à un modèle probabiliste, les différentes composantes de l'irradiation solaire sur les plans intéressant les concepteurs des systèmes solaires connaissant uniquement la moyenne mensuelle de l'insolation. Toutefois son inconvénient majeur est que cette approche est basée fondamentalement sur la connaissance détaillée du trouble atmosphérique. La mesure de ce paramètre est pratiquement inexistante du fait qu'elle soit coûteuse et difficile à réaliser dans les stations météorologiques classiques. Des modifications ont alors été apportées au modèle, en particulier la proposition de nouvelles fonctions de distribution plus simples et plus précises. Ces modifications ont nettement amélioré la précision excepté pour la composante diffuse dont la formulation doit être examinée plus en détails. L'association du modèle probabiliste corrigé avec une formulation plus précise du diffus est à envisager.

REFERENCES

- [1] M. Capderou, '*Atlas Solaire de l'Algérie, Tome I, Vol 1 et 2 : Modèles théoriques et expérimentaux*', Office des Publications Universitaires, Algérie, 1987.
- [2] A. Mefti, '*Comparison between two methods for the determination of the Angstrom turbidity in Algiers, Bouzaréah*', First Renewable Energy Congress, pp. 3122-3126, 1990.
- [3] A. Louche, G. Peri and M. Iqbal, '*An analysis of Linke turbidity factor*', Solar Energy, 37, pp. 393-396, 1986.
- [4] A. Louche, M. Maurel, G. Simonnot, G. Peri and M. Iqbal, '*Determination of Angstrom's turbidity coefficients from direct total solar irradiance measurements*', Solar Energy, 38, pp. 89-96, 1987.
- [5] C. Gueymard, '*Mathematically integrable parameterization of clear sky beam and global irradiances and its use*', Solar Energy, 50, pp. 385-397, 1993.
- [6] J.C. Grenier, A. Casinière and T. Cabot, '*A spectral model of Linke's turbidity factor and its experimental implications*', Solar Energy, 52, pp. 303-313, 1994.
- [7] F. Kasten, '*The Linke turbidity factor based on improved values of the integral Rayleigh optical thickness*', Solar Energy, 56, pp. 239-244, 1996.
- [8] Z.D. Adeyefa, B. Holmgren and J.A. Adedoku, '*Spectral solar radiation measurements and turbidity : comparative studies*', Solar Energy, 60, pp. 17-24, 1997.
- [9] C. Gaymard and F. Vignola, '*Determination of the atmospheric turbidity from the diffuse-beam broadband irradiance ratio*', Solar Energy, 63, pp. 135-146, 1998.
- [10] P. Bendt, M. Collares and A. Rabl, '*The frequency distribution of daily insolation values*', Solar Energy, 27, pp. 1-5, 1981.
- [11] K.G.T. Holland and S.J. Crha, '*A probability density function for the diffuse fraction, with applications*', Solar Energy, 38, pp. 233-236, 1987.
- [12] J. A. Olseth and A. Skartveit, '*A probability density model for hourly total and beam irradiance on arbitrary oriented planes*', Solar Energy, 39, pp. 343-352, 1987.
- [13] R.W. Stuart and K.G.T. Hollands, '*A probability density function for the beam transmittance*', Solar Energy, 40, pp. 463-468, 1988.
- [14] V.A. Graham and K.G.T. Hollands, '*A method to generate synthetic hourly solar radiation globally*', Solar Energy, 44, pp. 333-342, 1990.

- [15] A. Skartveit and J.A. Olseth, 'The probability density and autocorrelation of short-term global and beam irradiance', Solar Energy, 49, Vol. 6, 1992.
- [16] M.Y. Bouroubi, 'Modélisation du rayonnement solaire à l'échelle journalière et horaire', Thèse de Magister, U.S.T.H.B, Algérie, 1998.

Annexe A : Modèle du Trouble atmosphérique

Cette annexe décrit les expressions des différents coefficients de trouble atmosphérique utilisés au paragraphe 3.1

- T_0 est le trouble dû à l'absorption gazeuse, tant par les constituants fixes de l'atmosphère que par l'ozone et, surtout, par la vapeur d'eau de quantité variable. Il est donné

par la relation suivante :
$$T_0 = \frac{9,4 + 0,9 m_a}{m_a} \alpha_{aw} \quad (A.1)$$

α_{aw} représente le coefficient d'extinction après absorption par la vapeur d'eau.

$$m_a = \frac{\text{pression}}{101325} \times \frac{1}{\sin(h) + 9,4 \cdot 10^{-4} (\sin(h) + 0,0678)^{-1,253}} \quad \text{masse d'air optique.}$$

La modélisation de ce paramètre en fonction des seuls paramètres géo-astronomiques a permis à l'auteur de proposer l'expression suivante :

$$T_0 = 2,4 - 0,9 \sin(\varphi) + 0,1 (2 + \sin(\varphi) A_{he} - 0,2 z - (1,22 + 0,14 A_{he}) (1 - \sin(h))) \quad (A.2)$$

où : $A_{he} = \sin((360/365) \cdot (N - 121))$ est l'alternance hiver-été et N le numéro du jour.

- T_1 est le trouble correspondant à l'absorption par les gaz de l'atmosphère (O_2 , CO_2 et O_3) et à la diffusion moléculaire de Rayleigh. Il est normalement égale à 1, mais si on prend en compte l'effet de l'altitude du site, il est approché par la formule :

$$T_1 = (0,89)^Z \quad (A.3)$$

- Le trouble partiel T_2 est un terme relatif à la diffusion par les aérosols couplée à une légère absorption, qui dépendent à la fois de la nature, des dimensions et de la quantité des aérosols. Il est donné en fonction du coefficient de trouble d'Angstrom β par l'expression suivante :

$$T_2 = 16 \beta \quad (A.4)$$

A défaut de mesures du coefficient de trouble d'Angström, Capderou a adopté la formulation suivante :
$$T_2 = (0,9 + 0,4 A_{he}) (0,63)^Z \quad (A.5)$$

Annexe B : Modèles de l'approche probabiliste

Dans cette annexe, on présente la fonction M densité de probabilité des séquences journalières de la fraction d'insolation σ en fonction de leur moyenne mensuelle $\bar{\sigma}$, la fonction Q densité de probabilité de l'indice de clarté horaire k_b en fonction de sa moyenne journalière K_b , la fonction F1 qui relie, à une échelle journalière, la fraction d'irradiation directe à la fraction d'insolation ainsi que la fonction F2 qui relie, à l'échelle horaire, le facteur de trouble additif à l'indice de clarté.

- M est donnée par le tableau suivant :

Tableau 1 : Densité de probabilité de la fraction d'insolation journalière en fonction de sa moyenne mensuelle

I	Classe de σ	$\sigma_0(I)$	Poids statistique de chaque classe
1	$\sigma = 0$	0,00	$M(1) = (1 - \bar{\sigma}) / (1 + a \cdot \bar{\sigma})$
2	$0,0 < \sigma < 0,2$	0,10	$M(2) = 1,1 \bar{\sigma}^{0,5} (1 - \bar{\sigma})^{2,5}$
3	$0,2 < \sigma < 0,5$	0,35	$M(3) = 2,4 \bar{\sigma} (1 - \bar{\sigma})^{2,4}$
4	$0,5 < \sigma < 0,8$	0,65	$M(4) = 4,0 \bar{\sigma}^{2,2} (1 - \bar{\sigma})^{1,6}$
5	$0,8 < \sigma < 0,95$	0,88	$M(5) = 1 - [M(1) + M(2) + M(3) + M(4) + M(6)]$
6	$\sigma > 0,95$	0,98	$M(6) = \bar{\sigma} / (21 - 20 \bar{\sigma})$

- Q est donnée par le tableau suivant :

Tableau 2 : Densité de probabilité de l'indice de clarté horaire en fonction de sa moyenne journalière

J	Classes de k_b	$k_{b0}(J)$	Poids statistique de chaque classe
1	$k_b = 0$	0,00	$Q(1) = c (1 - K_b)^2 / (1 + 10 K_b)$
2	$0,0 < k_b < 0,2$	0,10	$Q(2) = c 3 K_b^{0,65} (1 - K_b)^4$
3	$0,2 < k_b < 0,5$	0,35	$Q(3) = 21 K_b^{2,1} (1 - K_b)^{4,2}$
4	$0,5 < k_b < 0,8$	0,65	$Q(4) = 26 K_b^{3,7} (1 - K_b)^{2,15}$
5	$0,8 < k_b < 1,0$	0,90	$Q(5) = 1,1 K_b^{3,4} (1 - K_b)^{0,1}$
6	$k_b = 1$	1,00	$Q(6) = K_b / (36 - 35 K_b)$

- La fonction F1 s'exprime comme suit : $K_b = F1(\sigma) = \frac{2\sigma}{2 + (1 - \sigma) \cdot (1 + 3\sigma)}$ (B.1)
- La fonction F2 est donnée par : $\Delta T = F2(k_b) = - (0,9 + \frac{9,4}{ma}) \log(k_b)$ (B.2)

Annexe C : Modèle du diffus

Ici, on présente les formules du modèle 'Cap.' qui permettent de calculer le diffus sur plan incliné à partir du trouble atmosphérique diffusif (voir 3.3.b).

$$D_a = \underbrace{\delta_d \cdot \cos(i)}_{D_a^d} + \underbrace{\delta_i \frac{1 + \sin(\gamma)}{2}}_{D_a^i} + \underbrace{\delta_h \cdot \cos(\gamma)}_{D_a^h} + \underbrace{\delta_a \cdot \frac{1 - \sin(\gamma)}{2}}_{D_a^a} \quad (C.1)$$

avec $\begin{cases} \delta_d = I_0 \exp \{ -2,48 + \sin(h) + a - \sqrt{4b^2 + a^2} \\ b = \log(T_L) - 2,28 - 0,5 \log(\sin(h)) \quad ; \quad a = 3,1 - 0,4b \end{cases} \quad (C.2)$

$$\delta_i = D_- - \delta_d \sin(h) \quad (C.3)$$

$$\begin{cases} \delta_h = I_n \frac{-0,02 a}{a^2 + ab + 1,8} \exp(\sin(h)) \\ b = \exp(0,2 + 1,75 \log(\sin(h))) \quad ; \quad a = \log(T_L) - 3,1 - \log(\sin(h)) \end{cases} \quad (C.4)$$

$$\delta_a = \bar{p} (I_n + \delta_d) \sin(h) + \delta_i = \bar{p} (I_- + D_-) \quad (C.5)$$

Les coefficients δ_j sont les modules des différentes composantes du diffus. Associés aux facteurs de forme, ils donnent le diffus reçu par le plan incliné considéré.