

Etude comparative de deux modèles de calcul du rayonnement solaire par ciel clair en Algérie

F. Yettou^{1*}, A. Malek², M. Haddadi³ et A. Gama¹

¹ Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables,
B.P. 88, ZI Gart Taam, Ghardaïa, Algérie

² Division Energie Solaire Photovoltaïque, Centre Développement des Energies Renouvelables
B.P. 62, Route de l'Observatoire, Bouzaréah, Alger, Algérie

³ Département d'Electronique, Ecole Nationale Supérieure Polytechnique
10, Avenue Hassen Badi, El-Harrach, Alger, Algérie

(reçu le 20 Février 2009 – accepté le 21 Juin 2009)

Résumé - Dans ce travail, nous avons élaboré une confrontation entre des valeurs de rayonnement solaires mesurées sur deux sites algériens et des valeurs estimées par des modèles théoriques proposés dans la littérature par divers chercheurs. Les sites choisis sont Bouzaréah (Alger) et Ghardaïa, dans lesquels des données météorologiques et radiométriques sont continuellement collectées. Quant aux modèles théoriques choisis, le modèle de Capderou, est celui qui sert de référence aux concepteurs de systèmes solaires en Algérie et le nouveau modèle r.sun. L'étude comparative des résultats obtenus a montré que c'est le modèle r.sun, qui présente une meilleure estimation des composantes directe et diffuse avec une faible erreur relative notamment pour une incidence sur plan incliné.

Abstract - In this work we have proposed to make a confrontation between measured values in two Algerian sites and estimated values by theoretical models proposed in the literature by various researchers. The sites chosen are those Bouzaréah (Algiers) and Ghardaïa in which radiometric and meteorological data are continuously collected. As for the theoretical models chosen, the model of Capderou, is one who serve as a reference for designers of solar systems in Algeria and the new model r.sun. The comparative study of results obtained showed that the model r.sun, which provides a best estimation of direct and diffuse components with low relative error, including an impact inclined plane.

Mots clés: Rayonnement solaire – Facteur de trouble de Linke – Modèle Capderou – Modèle r.sun.

1. INTRODUCTION

L'énergie solaire, qui se caractérise par une absence de pollution, par sa disponibilité fait l'objet d'un grand intérêt ces dernières années. En effet, les systèmes d'exploitation qui utilisent cette forme d'énergie demandent une légère maintenance et présentent une bonne fiabilité de fonctionnement, une autonomie de plus en plus accrue, une résistance extrême aux conditions naturelles (température, humidité, vent, corrosion, etc.), et donc une grande longévité.

Il apparaît dès lors que l'énergie solaire peut apporter de réelles solutions aux divers problèmes qui se posent actuellement concernant les changements climatiques, les crises énergétiques,....

* yettou.t@gmail.com

L'énergie solaire est utilisée de manières différentes, soit dans les systèmes photovoltaïques pour la production d'électricité ou soit dans les systèmes thermiques (chauffe-eau solaires) pour la production d'eau chaude, domaine où elle connaît un développement considérable particulièrement dans le secteur de l'habitat.

L'évaluation à long terme des performances des systèmes de conversion de l'énergie solaire s'établit par l'intermédiaire de programmes de simulation numérique. En Algérie, les logiciels de dimensionnement des installations photovoltaïques et thermiques font appel; dans la plupart des cas, à des bases de données intégrées pour calculer le rayonnement solaire, basées essentiellement sur le modèle de l'Atlas Solaire de l'Algérie de Capderou [1].

Cependant; ce modèle proposé en 1978, a fait l'objet de plusieurs critiques ces dernières années [2], du fait de l'erreur induite dans l'estimation des deux composantes du rayonnement solaire due essentiellement aux facteurs de trouble. Ce dernier est en relation directe avec les conséquences du changement climatique subi par la planète, ces dernières décennies.

Le présent travail vient répondre à cette problématique en utilisant un nouveau modèle (modèle r.sun) pour le calcul du rayonnement solaire par ciel clair. Basé sur le facteur de trouble de Linke et modélisé sous environnement Matlab, ce modèle nous a permis d'effectuer une étude comparative avec le modèle de Capderou et une analyse critique, à partir d'une validation des résultats obtenus pour les deux sites algériens: Ghardaïa et Bouzaréah.

2. DONNEES EXPERIMENTALES

Actuellement, en Algérie, la mesure des données du rayonnement solaire est effectuée d'une manière instantanée et sur certains sites seulement de l'Algérie. Nous avons choisi les sites de Ghardaïa (lat. 32.43°N) et de Bouzaréah sur les hauteurs d'Alger (lat. 36.8°N) pour cette étude.

Le choix de ces sites s'est porté sur la disponibilité des données radiométriques recherchées et sur la différence de climat existant entre eux. En effet, les deux sites ont des conditions climatiques différentes; Bouzaréah est un grand arrondissement d'Alger, ville côtière, et Ghardaïa est une ville saharienne située au Nord du Sahara.

Les données du rayonnement solaire (global, diffus et direct normal) utilisées proviennent de l'Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables de Ghardaïa, 'URAER' d'une part et du Centre de Développement des Energies Renouvelables de Bouzaréah, 'CDER' d'autre part.

3. MODELISATION MATHEMATIQUE

3.1 Modélisation des paramètres géométriques et atmosphériques

3.1.1 Angle horaire

L'angle horaire ω étant l'angle formé par le plan méridien passant par le centre du soleil et le plan vertical du lieu (méridien) définit le temps solaire vrai TSV [3]. L'angle horaire est donné par l'équation suivante:

$$\omega = 0.261799 \cdot (t - 12) \quad (1)$$

Pour calculer l'angle horaire, Capderou; dans l'Atlas Solaire de l'Algérie [1], a utilisé la formule suivante:

$$\omega = 15 \cdot (\text{TSV} - 12) \quad (2)$$

3.1.2 Déclinaison solaire

La déclinaison du soleil δ est l'angle que fait, la direction du soleil avec le plan équatorial de la terre [4]. La déclinaison varie de $-23^{\circ}27'$ au solstice d'hiver à $+23^{\circ}27'$ au solstice d'été et elle est nulle aux équinoxes [5]. La déclinaison solaire est bien représentée par la formule suivante:

$$\sin(\delta) = 0.3978 \times \sin[N_p - 1.4 + 0.0355 \times \sin(N_p - 0.0489)] \quad (3)$$

$$\text{avec } N_p = 2\pi \times N / 365.25 \quad (4)$$

Dans l'Atlas Solaire de l'Algérie, Capderou a utilisé l'expression (5) pour le calcul de la déclinaison, et qui donnerait le même résultat que l'expression précédente:

$$\sin(\delta) = 0.398 \times \sin \left\{ \frac{360}{365} \times (N - 82) + 2 \times \sin \left[\frac{360}{365} \times (N - 2) \right] \right\} \quad (5)$$

3.1.3 Hauteur du soleil

La hauteur du soleil γ_s est l'angle que fait, le plan horizontal avec la direction du soleil, la valeur $\gamma_s = 0$ correspond au lever et au coucher du soleil, la hauteur du soleil varie entre $+90^{\circ}$ (zénith) et -90° (nadir). La hauteur du soleil est bien représentée par une formule bien connue, qui avait été également adoptée par Capderou.

$$\sin(\gamma_s) = \cos(\varphi) \times \cos(\delta) \times \cos(\omega) + \sin(\varphi) \times \sin(\delta) \quad (6)$$

3.1.4 Azimut du soleil

L'azimut du soleil χ est l'angle que fait, sur le plan horizontal, la projection de la direction du soleil avec la direction du sud. L'azimut est compris entre $-180 \leq \chi \leq 180^{\circ}$ [5].

L'azimut du soleil est représenté en fonction de la déclinaison solaire δ , latitude du lieu φ , et de l'angle horaire ω de la manière suivante:

$$\cos(\chi) = \frac{\sin(\varphi) \times \cos(\delta) \times \cos(\omega) - \cos(\varphi) \times \sin(\delta)}{\left\{ [\cos(\delta) \times \sin(\omega)]^2 + [\sin(\varphi) \times \cos(\delta) \times \cos(\omega) - \cos(\varphi) \times \sin(\delta)]^2 \right\}^{0.5}} \quad (7)$$

Dans l'Atlas Solaire de l'Algérie, Capderou a utilisé la formule (8) pour calculer l'azimut du soleil:

$$\cos(\chi) = \frac{\cos(\delta) \times \cos(\omega) \times \sin(\varphi) - \sin(\delta) \times \cos(\varphi)}{\cos(\gamma_s)} \quad (8)$$

3.1.5 Masse atmosphérique

On appelle masse d'air m_A la masse d'atmosphère traversée par le rayonnement direct pour atteindre le sol (par ciel clair), par rapport à une traversée verticale au niveau

de la mer [6]. Plus le soleil est bas sur l'horizon, plus il va traverser une épaisseur importante d'atmosphère et plus il va subir des transformations. Dans l'Atlas Solaire de l'Algérie, Capderou a utilisé la formule suivante:

$$m_A = \frac{1}{\sin(\gamma_s) + 9.40 \times 10^{-4} \times [\sin(\gamma_s) + 0.0678]^{-1.253}} \quad (9)$$

En 1989, Kasten *et al.* [7] donnent une expression pour m_A qui est devenue largement utilisée {Eq. (10)}.

Le modèle r.sun utilise cette formule avec une légère correction de la hauteur du soleil.

$$m_A = \frac{p/p_0}{\sin(\gamma_s^{\text{cor}}) + 0.50572 \times (\gamma_s^{\text{cor}} + 6.07995)^{-1.6364}} \quad (10)$$

$$\text{avec } p/p_0 = \exp(-z/8434.5) \quad (11)$$

3.1.6 Epaisseur optique de l'atmosphère

En 1922, Linke [8] définit l'épaisseur optique de Rayleigh δ_R comme étant l'épaisseur optique totale d'une atmosphère sans nuages, vapeur d'eau et aérosols. Kasten, en 1980 [9] utilisa les données spectrales publiées par Feussner *et al.*, en 1930 [10] et proposa l'expression (12) pour δ_R , connue sous le nom de formule pyrhéliométrique de Kasten, où la diffusion moléculaire et l'absorption de la couche d'ozone stratosphérique sont prises en compte.

$$(\delta_R)^{-1} = 9.4 + (0.9 \times m_A) \quad (12)$$

Dans cette formule utilisée depuis fort longtemps, l'absorption par les gaz atmosphériques permanents tels que: CO₂, O₂, NO₂ et le CO n'est pas prise en compte. Capderou, dans l'Atlas Solaire de l'Algérie, 'A.S.A', utilisa la formule pyrhéliométrique de Kasten.

En 1986, Louche [11] ajouta l'absorption par les constituants permanents de l'atmosphère et proposa un polynôme de 4^{ième} ordre pour la masse d'air. Récemment en 1996, Kasten a ajusté la formule de Louche et proposa une nouvelle expression pour δ_R [12].

Le modèle r.sun a exploité la formule ajustée de Kasten pour une masse d'air inférieure à 20 et calcule δ_R avec l'expression ajustée de Page, 1996 pour une masse d'air supérieur à 20.

Pour $m_A \leq 20$

$$(\delta_R)^{-1} = 6.6296 + (1.7513 \times m_A) - (0.1202 \times m_A^2) + (0.0065 \times m_A^3) - (0.00013 \times m_A^4) \quad (13)$$

Pour $m_A > 20$

$$(\delta_R)^{-1} = 10.4 + (0.718 \times m_A) \quad (14)$$

3.1.7 Facteur de trouble de linke

Le facteur de trouble atmosphérique de linke T_L représente le nombre d'atmosphères idéales qui, si elles étaient superposées, entraîneraient la même atténuation que l'atmosphère réelle [11]. L'avantage du facteur de linke est d'exprimer les divers paramètres, tels que la vapeur d'eau atmosphérique et les aérosols en un seul indice facile à utiliser.

Le rayonnement direct normal est exprimé en fonction du facteur T_L , selon la formule suivante [11]:

$$I_N = I_0 \times \varepsilon \times \exp(-T_L \times m_A \times \delta_R) \quad (15)$$

La détermination du rayonnement solaire en fonction du facteur de Linke nécessite un modèle mathématique indépendant du rayonnement [13]. La plupart des modèles existants nécessitent la connaissance d'un grand nombre de données relatives au site [14].

Malheureusement, ces données ne sont pas toutes disponibles, par contre des tables relatives au facteur de Linke sont très abondantes [15-17]. Pour cela, nous avons choisi d'utiliser les données du projet SoDa [18] mis en disposition sur un site Web. La méthode adoptée par ce projet fait appel à des données satellitaires d'une part et des données de mesures au sol d'autre part pour calculer le facteur de Linke.

3.2 Modélisation du rayonnement solaire incident sur un plan horizontal par ciel clair

3.2.1 Rayonnement hors atmosphère

Le rayonnement solaire extraterrestre; fonction de la constante solaire I_0 et de la correction de distance entre la terre et le soleil ε , est donné par l'équation suivante:

$$G_0 = I_0 \times \varepsilon \quad (16)$$

3.2.2 Rayonnement solaire incident sur un plan horizontal (Modèle r.sun)

Pour le modèle r.sun [19], le rayonnement global incident sur un plan horizontal $IG^h(\gamma_s, T_L)$ par ciel clair; calculé en W/m^2 , est divisé en deux parties: le rayonnement direct $IB^h(\gamma_s, T_L)$ et le rayonnement diffus $ID^h(\gamma_s, T_L)$, chacun étant calculé séparément.

Le rayonnement direct est le flux solaire incident directement sur le plan considéré sous un angle représentant la hauteur solaire.

Tel que modélisé par Hofierka *et al.* (2002) [19], le rayonnement direct incident sur un plan horizontal $IB^h(\gamma_s, T_L)$ par ciel clair, est donné par:

$$IB^h(\gamma_s, T_L) = G_0 \times \sin(\gamma_s) \times \exp(-0.8662 \times T_L \times m_A \times \delta_R) \quad (17)$$

Le rayonnement diffus est le flux solaire reçu par un plan considéré qui traverse les nuages, provenant de la voûte céleste dans toutes les directions. Pour l'expression du rayonnement diffus, nous allons prendre la formule publiée par Hofierka *et al.* avec une légère correction du facteur T_L , cette correction ayant été adoptée en 2004 par le

nouveau Atlas Solaire de l'Europe (ESRA) [20, 21] et également prise en considération dans la version 2007 de MeteoNorm V6 [22].

Posons $T_{Lc} = (p/p_0) \times T_L$, l'expression du rayonnement diffus est donnée par:

$$ID^h(\gamma_s, T_L) = G_0 \times T_{rd}(T_L) \times F_d(\gamma_s, T_L) \quad (18)$$

$T_{rd}(T_L)$ est la fonction de la transmittance diffuse. Elle est fonction uniquement du facteur T_L corrigé, et varie entre 0 et 0.3 (a.s.l). L'expression de $T_{rd}(T_L)$ est réécrite de la manière suivante:

$$T_{rd}(T_L) = -1.5843 \times 10^{-2} + (3.0543 \times 10^{-2} \times T_{Lc}) + (3.797 \times 10^{-4} \times T_{Lc}^2) \quad (19)$$

$F_d(\gamma_s, T_L)$ est la fonction diffuse angulaire, fonction de la hauteur du soleil γ_s et du facteur de trouble T_L corrigé. $F_d(\gamma_s, T_L)$ est donnée par l'expression (20).

$$F_d(\gamma_s, T_L) = A_0 + A_1 \times \sin(\gamma_s) + A_2 \times [\sin(\gamma_s)]^2 \quad (20)$$

A_i sont des coefficients dépendants uniquement du facteur de trouble T_L corrigé.

3.2.3 Rayonnement incident sur un plan horizontal (Modèle Capderou)

Dans l'Atlas Solaire de l'Algérie (A.S.A) [1], Capderou; selon la préface de C. Perrin de Brichambaut, donna un modèle mathématique pour calculer le rayonnement direct et diffus incident sur un plan horizontal.

Il reste le modèle le plus utilisé en Algérie. Selon ce modèle, le rayonnement global modélisé par Capderou est la somme du rayonnement direct et diffus:

Pour le rayonnement direct, Capderou utilisa la formule (9) pour la masse d'air m_A et la formule (12) pour l'épaisseur totale de l'atmosphère δ_R et donna l'équation (21) qui permet de calculer le rayonnement direct incident sur un plan horizontal, $IB^h(\gamma_s, T_L)$, en fonction de la hauteur du soleil γ_s et du facteur de trouble total de Linke T_L :

$$IB^h(\gamma_s, T_L) = G_0 \times \sin(\gamma_s) \times \exp\left(\frac{-T_L}{0.9 + \frac{9.4}{(0.89)^2} \times \sin(\gamma_s)}\right) \quad (21)$$

Pour calculer le rayonnement diffus, Capderou utilisa le facteur de trouble diffusif T_L' et donna, en 1987, l'expression (22) fonction de la hauteur du soleil γ_s :

$$ID^h(\gamma_s, T_L) = G_0 \times \exp\left\{-1 + 1.06 \times \log(\sin(\gamma_s)) + a - \sqrt{b^2 + a^2}\right\} \quad (22)$$

Avec: $a = 1.1$ (23)

$$b = \log(T_L') - 2.80 + 1.02 \times [1 - \sin(\gamma_s)]^2 \quad (24)$$

3.3 Modélisation du rayonnement solaire incident sur un plan quelconque par ciel clair

3.3.1 Angle d'incidence

L'angle d'incidence est l'angle que font les rayons du soleil avec la normale du plan considéré. Il est défini par l'inclinaison du plan β et l'azimut de la normale du plan α (orientation du plan).

L'angle d'incidence est calculé à partir du $\sin(\delta^i)$ pour le modèle r.sun de la manière suivante:

$$\sin(\delta^i) = \cos(\varphi') \times \cos(\delta) \times \cos(\omega - \lambda') + \sin(\varphi') \times \sin(\delta) \quad (25)$$

$$\sin(\varphi') = -\cos(\varphi) \times \sin(\beta) \times \cos(\alpha_z) + \sin(\varphi) \times \cos(\beta) \quad (26)$$

$$\text{tg}(\lambda') = \frac{-\sin(\beta) \times \sin(\alpha_z)}{\sin(\varphi) \times \sin(\beta) \times \cos(\alpha_z) + \cos(\varphi) \times \cos(\beta)} \quad (27)$$

M. Capderou utilise la hauteur de la normale du plan γ pour calculer $\cos(\delta^i)$ de l'angle d'incidence, et ce sont les angles α et γ qui déterminent la position du plan.

L'angle d'incidence sur un plan quelconque est donné par Capderou par l'expression suivante:

$$\cos(\delta^i) = a' \times \sin(\omega) + b' \times \cos(\omega) + c' \quad (28)$$

$$a' = \cos(\delta) \times [\sin(\alpha_z) \times \cos(\gamma)] \quad (29)$$

$$b' = \cos(\delta) \times [\cos(\alpha_z) \times \cos(\gamma) \times \sin(\varphi) + \sin(\gamma) \times \cos(\varphi)] \quad (30)$$

$$c' = \sin(\delta) \times [-\cos(\alpha_z) \times \cos(\gamma) \times \cos(\varphi) + \sin(\gamma) \times \sin(\varphi)] \quad (31)$$

3.3.2 Rayonnement solaire incident sur un plan quelconque (Modèle r.sun)

Pour un plan quelconque (α, γ) , le rayonnement solaire incident $IG^i(\gamma_s, T_L)$ est estimé par la détermination du rayonnement direct et diffus [19].

Le rayonnement direct étant simple à calculer, il est donné en fonction de l'angle d'incidence par la formule suivante.

Le rayonnement direct étant simple à calculer, il est donné en fonction de l'angle d'incidence par la formule suivante:

$$IB^i(\gamma_s, T_L) = IN(\gamma_s, T_L) \times \sin(\delta^i) \quad (32)$$

Pour un plan dont l'incidence du flux solaire est reçue d'une manière directe (sans obstacle), le rayonnement diffus incident sur le plan considéré est donné par les équations (33) et (34):

Si $\gamma_s \geq 0.1$ (5.7°)

$$ID^i(\gamma_s, T_L) = ID^h(\gamma_s, T_L) \times \left[F(\beta) \times (1 - k_b) + k_b \times \frac{\sin(\delta^i)}{\sin(\gamma_s)} \right] \quad (33)$$

Si $\gamma_s < 0.1$ (5.7°)

$$ID^i(\gamma_s, T_L) = ID^h(\gamma_s, T_L) \times \left[F(\beta) \times (1 - k_b) + k_b \times \frac{\sin(\beta) \times \cos(\theta)}{0.1 - 0.008 \times \gamma_s} \right] \quad (34)$$

θ est l'azimut du soleil pour une surface inclinée et $F(\beta)$ est la fonction du rayonnement diffus du ciel.

3.3.3 Rayonnement incident sur un plan quelconque (Modèle Capderou)

Capderou proposa un modèle pour calculer le rayonnement solaire incident sur un plan (α, γ) , le rayonnement global étant la somme des deux composantes directe et diffuse.

Capderou utilisa l'angle d'incidence donné par l'équation (28) pour calculer le rayonnement direct à l'aide de l'équation suivante:

$$IB^i(\gamma_s, T_L) = IN(\gamma_s, T_L) \times \cos(\delta^i) \quad (35)$$

Le rayonnement diffus est lui-même décomposé en deux parties: celle provenant du ciel et celle provenant du sol:

$$ID^i(\gamma_s, T_L) = \delta_a \times \frac{1 - \sin(\chi)}{2} + (\delta_i + \delta_{i'}) \times \frac{1 + \sin(\chi)}{2} + \delta_d \times \cos(\delta^i) + \delta_h \times \cos(\chi) \quad (36)$$

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

4. RESULTATS ET INTERPRETATIONS

4.1 Résultats obtenus

Pour obtenir une validation du rayonnement solaire, nous allons confronter quelques valeurs; par ciel clair, du rayonnement solaire fournies par les deux stations radiométriques de Ghardaïa et de Bouzaréah, avec des valeurs, sur plan horizontal et sur plan incliné, délivrées par le logiciel de calcul, Matlab.

On présentera sur les figures suivantes, des graphes comparatifs relatifs au rayonnement diffus, au rayonnement direct et au rayonnement global, des modèles r.sun et Capderou, avec les données expérimentales des deux sites. Le graphe d'erreur relative en fonction du temps est également donné pour le rayonnement global.

4.1.1 Site de Bouzaréah (incidence sur un plan horizontal)

Les données expérimentales relatives aux composantes du rayonnement solaire, à savoir: global, diffus, direct, sur plan horizontal, et par ciel clair, et pour une journée

hivernale sur Bouzaréah sont présentées sur la figure 1 sous forme de graphes, et en les comparant aux données issues des deux modèles étudiés.

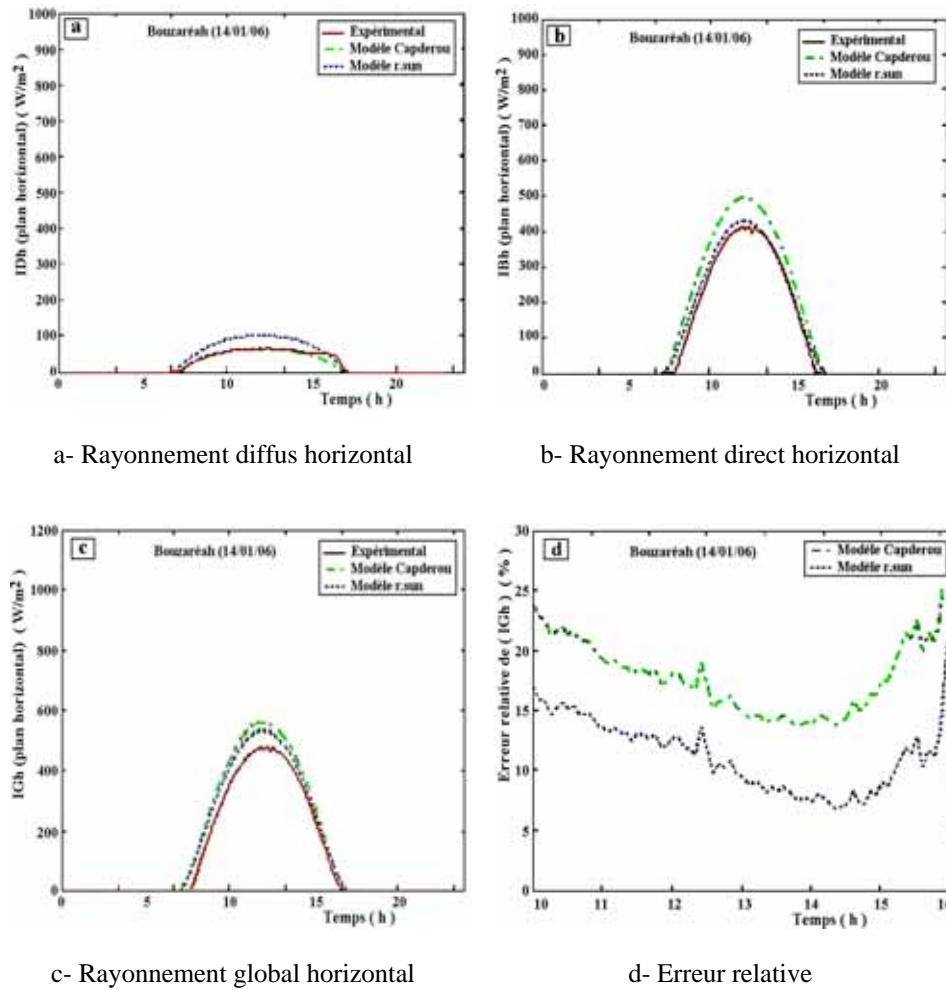


Fig. 1: Comparaison des résultats obtenus par les deux modèles avec les données expérimentales relatives aux composantes du rayonnement solaire, diffus, direct et global, ainsi que l'erreur relative sur Bouzaréah pour un jour d'hiver clair

4.1.2 Site de Ghardaïa (incidence sur un plan horizontal)

La figure 2 ci-dessous, représente les résultats obtenus par les deux modèles avec les données expérimentales relatives aux composantes du rayonnement solaire, global, diffus, direct, sur un plan horizontal, et par ciel clair, et ceci pour une journée hivernale à Ghardaïa. Une comparaison avec les deux modèles choisis a été également effectuée et il s'en suit l'obtention d'une erreur relative du rayonnement global.

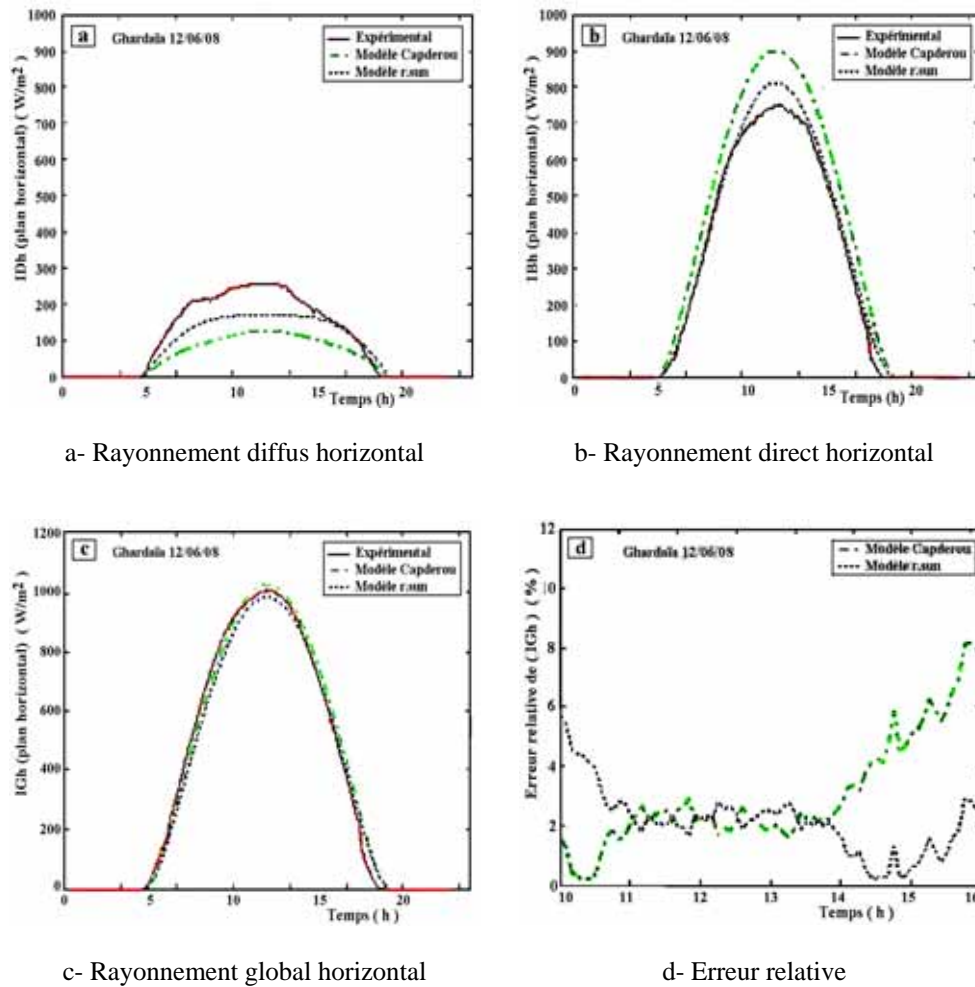
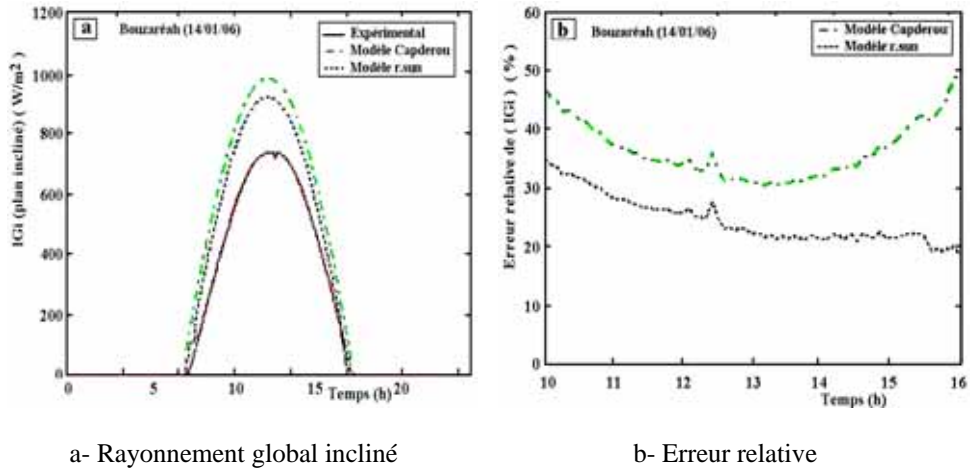


Fig. 2: Comparaison des résultats obtenus par les deux modèles avec les données expérimentales relatives aux composantes du rayonnement solaire, diffus, direct et global, ainsi que l'erreur relative sur Ghardaïa pour un jour d'été clair

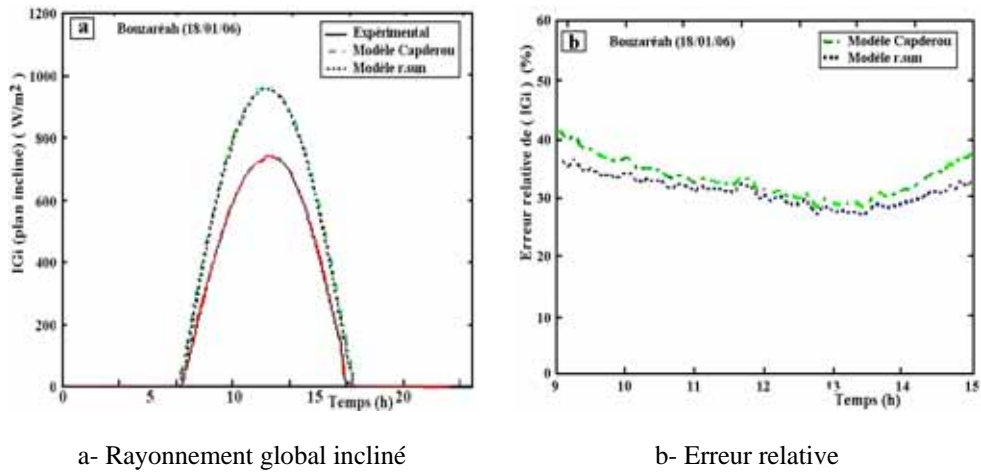
4.1.3 Site de Bouzaréah (incidence sur un plan incliné)

La figure 3 présente les résultats obtenus par les deux modèles avec les données expérimentales relatives au rayonnement global sur plan incliné, par ciel clair, et ceci pour une journée hivernale à Bouzaréah. Une comparaison avec les deux modèles choisis a été également effectuée.

La figure 4 présente la comparaison des résultats obtenus par les deux modèles avec les données expérimentales relatives au rayonnement global sur plan incliné, par ciel clair, et ceci pour une journée en automne à Bouzaréah.



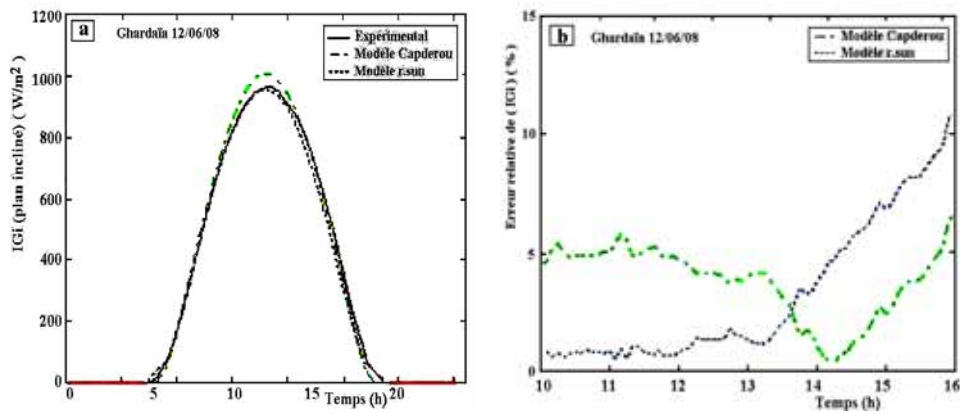
a- Rayonnement global incliné
 b- Erreur relative
 Fig. 3: Comparaison des résultats obtenus par les deux modèles avec les données expérimentales relatives au rayonnement global incliné, ainsi que l'erreur relative sur Bouzaréah pour une journée hivernale claire



a- Rayonnement global incliné
 b- Erreur relative
 Fig. 4: Comparaison des résultats obtenus par les deux modèles avec les données expérimentales relatives au rayonnement global incliné, ainsi que l'erreur relative sur Bouzaréah pour une journée claire en automne

4.1.4 Site de Ghardaïa (incidence sur un plan incliné)

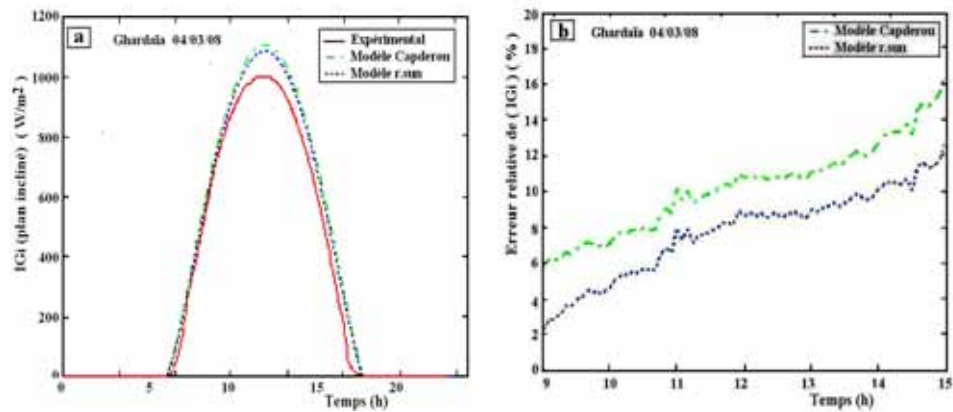
La figure 5 ci-dessous, présente les résultats obtenus par les deux modèles avec les données expérimentales relatives au rayonnement global sur plan incliné, par ciel clair, et ceci pour une journée claire estivale à Ghardaïa. Un comparatif sur ces modèles a été également entrepris.



a- Rayonnement global incliné

b- Erreur relative

Fig. 5: Comparaison des résultats obtenus par les deux modèles avec les données expérimentales relatives au rayonnement global incliné, ainsi que l'erreur relative sur Ghardaïa pour une journée d'été claire



a- Rayonnement global incliné

b- Erreur relative

Fig. 6: Comparaison des résultats obtenus par les deux modèles avec les données expérimentales relatives au rayonnement global incliné, ainsi que l'erreur relative sur Ghardaïa pour une journée claire de printemps

La figure 6 présente les résultats obtenus par les deux modèles avec les données expérimentales relatives au rayonnement global sur plan incliné, par ciel clair, et ceci pour une journée Ghardaïa. Une comparaison avec les deux modèles choisis a été également effectuée.

4.2 Etude comparative et analyse critique

Afin de réaliser une analyse critique des résultats obtenus, il a été effectué une comparaison des données expérimentales avec celles issues des deux modèles. Il a été

donc également calculé l'erreur relative du rayonnement diffus, du rayonnement direct et du rayonnement global sur les sites de Ghardaïa et Bouzaréah.

Les résultats obtenus sont regroupés dans le **Tableau 1** ci-après.

L'expression de l'erreur relative moyenne en (%) est donnée par l'équation suivante:

$$\text{Err}_{\text{moy}} = \frac{|\Delta G|}{G_{\text{mesurée}}} \quad (37)$$

Tableau 1: Résultats de calcul des erreurs relatives du rayonnement solaire horizontal et incliné pour quelques jours clairs, sur les deux sites choisis

Erreur relative moyenne journalière (%)	Horizontal						Incliné		
	R. diffus		R. direct		R. global		R. global		
	ASA	r.sun	ASA	r.sun	ASA	r.sun	ASA	r.sun	
Bouza Réah	14/01/06	7.48	50.77	26.07	5.63	18.22	11.43	36.83	24.71
	14/03/06	23.05	67.76	6.23	1.78	7.57	5.71	15.51	12.07
	09/07/06	35.73	61.40	3.79	2.15	5.23	4.45	4.15	2.41
	18/11/06	40.98	81.08	16.04	9.15	18.98	17.94	33.70	31.48
Ghardaïa	22/01/08	23.05	67.76	6.23	1.78	7.57	5.71	15.51	12.07
	04/03/08	35.73	61.40	3.79	2.15	5.23	4.45	4.15	2.41
	12/06/08	40.98	81.08	16.04	9.15	18.98	17.94	33.70	31.48
	15/10/08	52.02	25.17	26.28	7.26	2.81	2.43	12.32	5.05

Le traitement des données du rayonnement solaire provenant des deux stations montre d'une manière générale que les données du site de Bouzaréah sont assez perturbées par rapport à celles de Ghardaïa, sur l'ensemble de l'année et plus particulièrement en hiver. Autrement dit, la sélection des jours clairs, à des traitements, paraît difficile.

Nous avons donc analysé ces données de rayonnement, à savoir: -le diffus, le direct, le global horizontal et le global incliné- jour par jour, de l'année 2006 pour Bouzaréah et de l'année 2008 pour Ghardaïa. Nous avons noté les remarques suivantes:

- Le modèle r.sun donne une estimation de la composante diffuse pour le site de Bouzaréah avec une erreur importante, quant au modèle de Capderou, estime la composante directe avec une erreur élevée pour les deux sites. Cependant, l'erreur commise par Capderou a une influence remarquable sur l'estimation du rayonnement global, tandis que l'erreur commise par le modèle r.sun influe peu.

- Le modèle r.sun donne une bonne estimation de la composante directe que le modèle de Capderou. En effet, si on analyse bien les équations calculant le rayonnement direct donnés par les deux modèles, on trouve qu'elles ont la même forme et avec exactement les mêmes variables d'entrée (T_L , m_A , δ_R), mais le modèle r.sun utilise

des formules améliorées pour calculer ces trois variables, ce qui donne une précision meilleure des calculs.

- Nous avons noté aussi un phénomène redondant sur la majorité des mois pour le modèle Capderou, qui est la surestimation de la composante directe et la sous-estimation de la composante diffuse, pour approcher enfin de la composante globale.

Mais d'une manière générale, on peut dire que le modèle Capderou donne une estimation assez bonne du rayonnement solaire global pour les mois d'hiver par rapport aux mois d'été où le facteur de Linke a augmenté remarquablement ces dernières années, principalement à cause des changements climatiques.

- Nous avons remarqué également, pour le modèle r.sun, qu'il existe une erreur élevée dans l'estimation des trois composantes du rayonnement solaire au mois de Janvier de l'année 2008 sur le site de Ghardaïa (ligne 5 du **Tableau1**).

Cette erreur ne peut pas provenir du modèle lui-même, mais d'une origine commune aux trois composantes qui est sans doute le facteur de Linke. Ce dernier semble être surestimé pour ce mois (3.1 % en moyenne).

Cependant cette même valeur donnerait une erreur minime pour le mois de Janvier des années 2005, 2006 et 2007.

En recherchant une explication à ce problème, il semble que durant le mois de Janvier 2008, une carrière de sable blanc située à coté de la station de mesure a été arrêtée (pour maintenance sans doute), ce qui a diminué considérablement le facteur de Linke, tandis que la valeur 3.1 de T_L a été estimé par le projet SoDa [18] durant la période où la carrière a été fonctionnelle.

- Le modèle r.sun est incontournable pour l'estimation du rayonnement solaire incident sur un plan incliné (**Tableau 1** et Fig. 3-6), ce qui est intéressant pour effectuer le dimensionnement des systèmes thermiques (chauffe-eau) et des installations photovoltaïques, plus particulièrement en Algérie. Car il est utilisé le plus souvent le rayonnement solaire incident sur plan incliné plutôt que sur plan horizontal dans le dimensionnement des systèmes solaires.

5. CONCLUSION

Dans ce travail, une modélisation du rayonnement solaire par les modèles Capderou et r.sun est présentée et réalisée. Chacun des modèles a utilisé des équations propres pour la détermination des paramètres géométriques (déclinaison solaire, angle horaire, hauteur du soleil, azimut et angle d'incidence) et des paramètres atmosphériques (masse, épaisseur optique de l'atmosphère et facteur de trouble).

Les transmittances nécessaires pour le calcul des composantes du rayonnement solaire par ciel clair, incident sur un plan horizontal et incliné ont été programmées avec Matlab.

Ce travail nous a permis de confronter des valeurs mesurées et celles estimées par les deux modèles paramétrés. Nous avons constaté que le modèle r.sun donne une bonne estimation du rayonnement solaire, et plus particulièrement pour une incidence sur un plan incliné. Les résultats obtenus pour les deux sites se rapprochent avec une grande précision des données réelles.

Par ailleurs, l'utilisation du modèle Capderou peut conduire à des valeurs erronées, ce qui influe considérablement sur le dimensionnement des systèmes énergétiques solaires.

Pour les deux sites, ce modèle s'avère donner des valeurs estimées inférieures ou supérieures à celles mesurées.

REFERENCES

- [1] M. Capderou, '*Atlas Solaire de l'Algérie*', Modèles Théoriques et Expérimentaux, Vol. 1, T1, Office des Publications Universitaires, EPAU, Algérie, 375 p., 1987.
- [2] A. Mefti, M.Y. Bouroubi et A. Khellaf, '*Analyse Critique du Modèle de l'Atlas Solaire de l'Algérie*', Revue des Energies Renouvelables, Vol. 2, N°2, pp. 69 - 85, 1999.
- [3] R. Bernard, G. Menguy et M. Schwartz, '*Le Rayonnement Solaire, Conversion Thermique et applications*', Technique & Documentation, Ed. Lavoisier, France, 250 p., 1983.
- [4] A. Khedim, '*L'Energie Solaire, Utilisation Thermique et Photovoltaïque*', ANEP, 359 p., 2005.
- [5] J.M. Chasseriau, '*Conversion Thermique du Rayonnement Solaire*', Ed. Dunod, France, 273 p., 1984.
- [6] A. Labouret, '*Energie Solaire Photovoltaïque*', Ed. Dunod, France, 302 p., 2003.
- [7] F. Kasten and A.T. Young, '*Revised Optical Air Mass Tables and Approximation Formula*', Applied Optics, Vol. 28, N°22, pp. 4735 - 4738, 1989.
- [8] F. Linke, '*Transmissions - Koeffizient und Trübungsfaktor*', Beiträge zur Physik der Atmosphäre, Vol. 10, pp. 91 - 103, 1922.
- [9] F. Kasten, '*A Simple Parameterization of Two Pyrheliometric formulae for determining the Linke Turbidity Factor*', Meteorology Rdsch, Vol. 33, pp. 124 - 127, 1980.
- [10] K. Feussner and P. Dubois, '*Trübungsfaktor, Precipitable Water*', Staub. Gerlands Beitr., Geophysical, Vol. 27, pp. 132 - 175, 1930.
- [11] A. Louche, G. Peri and M. Iqbal, '*An analysis of Linke Turbidity Factor*', Solar Energy, Vol. 37, N°6, pp. 393 - 396, 1986.
- [12] F. Kasten, '*The Linke Turbidity Factor Based on Improved Values of the Integral Rayleigh Optical Thickness*', Solar Energy, Vol. 56, N°3, pp. 239 - 244, 1996.
- [13] C.P. Jacovides, '*Model Comparison for the Calculation of Linke's Turbidity Factor*', International Journal of Climatology, Vol. 17, N°5, pp. 551 - 563, 1997
- [14] R. Dogniaux, '*De l'influence de l'Estimation du Facteur Total de Trouble Atmosphérique sur l'Evaluation du Rayonnement Solaire Direct par Ciel Clair. Application aux Données Radiométriques de l'IRM à Uccle*', Institut Royal Météorologique de Belgique (IRM), Miscellanea, Serie C, N°20, 1984.
- [15] R. Pedros, J.A. Utrillas, J.A. Martinez-Lozano and F. Tena, '*Values of Broad Band Turbidity Coefficients in a Mediterranean Coastal Site*'. Solar Energy, Vol. 66, N°1, pp. 11 - 20, 1999.
- [16] L. Diabaté, J. Remund and L. Wald, '*Linke Turbidity Factors for Several Sites in Africa*', Solar Energy 75, N°2, pp. 111 - 119, 2003.
- [17] J. Remund, L. Wald, M. Lefevre, T. Ranchin and J. Page, In press. '*Worldwide Linke Turbidity Information*', In: Proceedings of the ISES Solar World Congress 2003, Goeteborg, Sweden, 16-19 June 2003.

- [18] B. Gschwind, L. Ménard, M. Albuissou and L. Wald, 'Converting a Successful Research Project into a Sustainable Service: The Case of the SoDa Web Service', *Environmental Modelling and Software*, Vol. 21, N°11, pp. 1555 – 1561, 2006.
- [19] J. Hofierka and M. Sári, 'The Solar Radiation Model for Open Source GIS: Implementation and Applications', *Proceedings of the Open source GIS - GRASS users conference*, Trento, Italy, 11-13 September 2002.
- [20] C. Rigollier, O. Bauer and L. Wald, 'On the Clear Sky Model of the 4th European Solar Radiation Atlas with Respect to the Heliosat Method', *Solar Energy*, Vol. 68, N°1, pp. 33 – 48, 2000.
- [21] M. Lefèvre, M. Albuissou and L. Wald, 'Description of the software HELIOSAT-II for the conversion of images acquired by METEOSAT satellites in the visible band into maps of solar radiation available at ground level', *Rapport, Groupe Télédétection & Modélisation, Centre d'Energétique, Armines, Ecole des Mines de Paris, France*, 43 p., 2004.
- [22] METEONORM version 6.0, 'Handbook Part II: Theory', *Swiss Federal Office of Energy (SFOE), Technical Documentation*, 101 p., 2007.