

Etude de l'effet des aérosols sur l'estimation du coefficient de réflectance bidirectionnelle à l'aide de mesures satellitaires

S. Tourta^{*}, A. Mokhnache et S. Seghiri

Laboratoire de Physique Energétique, Département de Physique, Faculté des Sciences,
Université Mentouri, Route Ain El Bey, Constantine, Algérie

(reçu le 21 Décembre 2011 – accepté le 28 Décembre 2012)

Résumé - Le rayonnement solaire est atténué par les différents constituants atmosphériques, tels que les molécules, les aérosols, les gaz, les gouttelettes nuageuses ou les cristaux de glace. Les aérosols absorbent et diffusent le rayonnement, l'atténuation par diffusion est caractérisée par l'épaisseur optique des aérosols qui représentent le degré de turbidité de l'atmosphère. Cette turbidité peut être quantifiée à l'aide du coefficient de trouble d'Ångström [1] ou du TL de Linke. La connaissance de τ_{ae} est importante dans l'estimation du rayonnement solaire du sol à partir des images satellitaires. Le but de ce travail est l'étude de l'effet des aérosols sur l'estimation du coefficient de réflectance bidirectionnel sur le site de Tamanrasset, en utilisant les deux modèles: modèle spectral de Smarts2 et modèle analytique à bande large, pour les trois heures de prise d'images à pleine résolution, 9h00, 12h00, 15h00 temps universel, et pour des jours de ciel clair de l'année 1999. Les résultats d'observations et les calculs se concordent. Nous avons trouvé que pour les fortes valeurs de l'épaisseur optique des aérosols τ_{ae} , on a un fort coefficient de réflectance bidirectionnelle ρ_s .

Abstract - The solar radiance is attenuated by the different atmospheric constituents such as the molecules, the sprays, gases, the cloudy droplets or the ice crystals. The sprays absorb and distribute the radiance; the attenuation by diffusion is characterized by the optic thickness of the sprays which represents the degree of turbidity of the atmosphere. This turbidity can be to quantify with the help of the Ångström trouble coefficient [1] or the TL of Linke. The knowledge of τ_{ae} is important in the evaluation of the solar radiance of soil from the satellite pictures. The butt of this work is the survey of the sprays effect on the evaluation of the bi-directional reflectance coefficient on the site of Tamanrasset, while using the two models: spectral model of Smarts2 and analytical large strip model, for the three hours of hold of pictures to full resolution, 9h00, 12h00, 15h00 universal times, and for days of clear sky of 1999 year. The results of observations and the calculations agree himself. We found that for high values of optic thickness of the sprays τ_{ae} , we have a high the bi-directional reflectance coefficient ρ_s .

Mots clés: Aérosols atmosphériques – Atmosphère – Rayonnement global – Coefficient de réflectance – Atténuation atmosphérique – Gisement solaire – Télédétection.

1. INTRODUCTION

La connaissance du rayonnement solaire au sol et sa distribution géographique est très importante pour l'énergie solaire et ses applications. Le rayonnement solaire rediffusé porte la signature des propriétés que l'on caractérise par la réflectance du sol [2, 3]. Le capteur mesure le rayonnement au sol, du essentiellement aux variations des constituants

* taourta.sabah@yahoo.fr

gazeuse de l'atmosphère, tels que la vapeur d'eau, le gaz carbonique,...et des aérosols.

Les aérosols, particules solides en suspension dans l'atmosphère, sont caractérisés par leur épaisseur optique, qui représente le degré de turbidité de l'atmosphère. Les fluctuations du signal mesuré sont en grande partie dues aux fluctuations de l'épaisseur optique des aérosols.

Le coefficient de réflectance bidirectionnelle et l'épaisseur optique des aérosols jouent un rôle important dans le calcul du bilan radiatif à l'interface Terre-Atmosphère. Leur mesure demande un équipement spécifique.

Notre étude est focalisée sur l'estimation de coefficient de réflectance bidirectionnelle ρ_s sur le site de Tamanrasset à partir des images pleine résolution, où nous avons étudié les effets des aérosols sur cette estimation. Cette étude compare le coefficient de réflectance bidirectionnelle ρ_s pour différentes valeurs de τ_{ae} .

2. METHODE DE CALCUL

Dans le cadre de ce travail, nous avons utilisé le modèle analytique à bande large pour l'estimation du rayonnement solaire au sol. A partir des résultats obtenus et les images satellitaires, nous pouvons calculer le coefficient de réflectance bidirectionnelle du sol.

2.1 Images pleine résolution

Ces images sont les images de Météosat7 de l'année 1999. Elles ont été obtenues de la station de réception des images Météosat de Darmstadt. Le format Mcidas sous lequel sont enregistrées ces images, est un format spécial. Par contre, nous avons eu beaucoup de difficultés à lire et à extraire des parties de l'image pour leur exploitation.

Nous sommes passés par plusieurs étapes.

2.1.1 Etape 1

- A l'aide du logiciel de conversion 'latitude – longitude' en ligne pixel de l'image fournie par la station de Darmstadt, nous avons calculé les lignes pixels des quatre coins de l'image.

- En utilisant le logiciel 'Bilko', nous avons pu déterminer la taille de l'entête (header file), mais nous avons rencontré deux problèmes.

Premier problème: Il est relatif à la courbure de la terre. Le logiciel de conversion tient compte de la courbure de la terre et les images sont rectangulaires. Le nombre de pixels de bas de l'image est égal à celui du haut de l'image.

Deuxième problème: Ce logiciel ne permet pas le stockage en format ASCII qui pourrait être lu avec le logiciel de calcul.

Nous étions alors obligés de travailler sur le logiciel 'Mclite' (Mcidas lite), qui fonctionne sous linux. Ce logiciel reconnaît les fichiers d'extension Mcidas. Il donne toutes les informations concernant l'image en commençant par: le satellite, la date et l'heure de prise de l'image (le slot), le header file, le nombre de ligne et de colonne et les coordonnées géographiques de chaque pixel.

2.1.2 Etape 2

Nous avons utilisé 'Mclite' pour avoir les coordonnées Images pleine résolution (5000 × 5000 pixels) ligne = 1781 et pixel = 1131 pour la région de Tamanrasset de coordonnées géographiques 22.47° N de latitude et 5.31° E de longitude.

2.1.3 Etape 3

- Stockage des fichiers images.
- Ouverture des fichiers images visibles, pour la date (jour, mois, année) et pour les heures 9h 00, 12h 00, 15h 00.
- Sélection des images.

Nous avons utilisé deux méthodes pour la sélection des images pour ciel clair: la visualisation de l'image en format JPEG ou Bitmap pour voir la présence des nuages ou pas, et l'utilisation de la nébulosité totale, selon les recommandations du service des mesures de la station météorologique de Tamanrasset, partageant l'échelle de nébulosité (comptée en dixièmes) comme suit: 0- ciel dégagé, 1 à 3- correspond à un ciel peu nuageux, 4 à 6- ciel nuageux, 7 à 9- ciel très nuageux, 10- ciel couvert.

- Enregistrement de la partie désirée dans un fichier format ASCII pour pouvoir ensuite les lire en Fortran ou en Pascal.

- Extraction de chaque fichier d'une maille luminance de (3×3) pixels, qui représente la région de Tamanrasset et dont le point (1787, 1131) est le centre de la matrice (3×3) .

- On retient la valeur du centre, représentant la luminance mesurée par le satellite.

Nous avons trois images par jour de 9h 00, 12h 00 et 15h 00 TU.

- On tire la valeur maximale, B_{\max} , de ces trois valeurs, généralement c'est celle de 12h 00 TU.

Comme il a été dit précédent, le modèle utilisé pour le calcul du coefficient de réflectance bidirectionnelle est le modèle de bande large. Ce modèle est bien adapté pour l'étude de l'évolution du coefficient de réflectance bidirectionnelle en utilisant l'imagerie satellitaire. Nous avons calculé la transmission dans la direction du satellite en la pondérant par la réponse spectrale du détecteur du satellite et on fait les calculs suivants:

- On calcule le rayonnement global avec $\tau_{ae} = 0.08$ pour les heures considérées.
- On calcule le rayonnement global pour τ_{ae} quelconque de l'heure considérée.
- Enfin, calcul du coefficient de réflectance bidirectionnelle du sol pour:
 - τ_{ae} constant égal à 0.08
 - Et τ_{ae} variable (réel mesuré pour chaque heure considérée).

2.2 Modèle analytique à bande large

Dans le cadre de ce travail, nous avons utilisé le modèle analytique à bande large pour l'estimation du rayonnement solaire au sol. De ces résultats obtenus et les images satellitaires, le calcul du coefficient de réflectance bidirectionnelle peut être effectué.

Perrin de Brichambaut [7], utilise des relations en fonction de la masse d'air pour calculer les effets intégrés sur tout le spectre, des constituants de l'atmosphère sur l'atténuation du rayonnement direct et la création du rayonnement diffus. Ces relations n'expriment plus strictement des lois physiques (qui sont spectrales), mais elles permettent de tenir compte séparément de la vapeur d'eau, des aérosols et de l'ozone dans l'atmosphère.

● **Le rayonnement direct normal**- Il est calculé à partir de la formule suivante:

$$I = I_0 \times \text{cor} \times T_{Oz} \times T_{ve} \times T_R \times T_g \times T_{ae} \quad (1)$$

I_0 est la constante solaire hors atmosphère; elle est égale à 1367 W/m^2 . cor est le facteur de correction de la distance moyenne terre-soleil; Il est exprimé par la relation suivante:

$$\text{cor} = 1 + 0.034 \times \cos(0.986 \times (Q_j - 3)) \quad (2)$$

T_{O_3} , T_{ve} , T_R , T_g , T_{ae} sont les transmittances respectives de l'ozone, de la vapeur d'eau, de Rayleigh, des gaz et des aérosols.

● **Le rayonnement diffus**- Ce rayonnement diffus est la somme du diffus de Rayleigh et du diffus des aérosols.

$$D = D_R + D_{ae} \quad (3)$$

● **Le rayonnement diffus de Rayleigh**- Le diffus de Rayleigh est exprimé par l'expression suivante.

$$D_R = I_{on} \times \text{cor} \times \cos(\theta_s) \times T_m \times [T_{ae} \times (1 - T_R) \times 0.5] \quad (4)$$

$\cos(\theta_s)$ est le cosinus de la distance zénithale du soleil).

● **Le rayonnement diffus des aérosols**- Le diffus des aérosols est exprimé par l'expression suivante.

$$D_{ae} = I_{on} \times \text{cor} \times \cos(\theta_s) \times T_m \times \left[\omega_0 \times (1 - T_{ae}) \times T_R \times f \, dv^1 \right] \quad (5)$$

T_m est la transmission de l'ozone et de la vapeur d'eau, $T_m = T_{O_3} \times T_{ve}$.

ω_0 est l'albédo de simple diffusion des aérosols.

$f \, dv^1$ est la fonction de diffusion vers l'avant des aérosols dans la direction du soleil, elle s'exprime par la formule suivante (Gueymard).

$$f \, dv^1 = 1 - \exp(-0.6931 - 1.8326 \times \cos(\theta_s)) \quad (6)$$

● **Le rayonnement global**- Ce rayonnement est exprimé par la relation suivante.

$$GL = I \times \cos(\theta_s) + D \quad (7)$$

3. CALCUL DU COEFFICIENT DE REFLECTANCE BIDIRECTIONNELLE

Le rayonnement mesuré au niveau du capteur du satellite Météosat est la somme du rayonnement réfléchi par le système sol – atmosphère, donc la luminance mesurée par le capteur est égale à la luminance du sol plus celle d'atmosphère:

$$B_{\text{satellite}} = B_{\text{sol}} + B_{\text{atm}}$$

Le rayonnement solaire réfléchi par l'ensemble sol - atmosphère détecté par le capteur dépend de la nature du sol [4] et de l'état de l'atmosphère. Pour les jours de ciel clair, nous avons observé que la brillance demeure constante pendant plusieurs jours dans le mois: c'est la brillance stable et elle caractérise le beau temps. Dans notre cas, nous avons utilisé un modèle analytique à bande large, où nous avons introduit les corrections atmosphériques.

Le rayonnement solaire, qui traverse l'atmosphère, est atténué par absorption, par diffusion, par diffraction et par réflexion atmosphérique. Au niveau du sol, le rayonnement global est la somme du rayonnement direct-normal sur plan horizontal et du rayonnement diffus [5]. Le rayonnement solaire global GL au niveau du sol est calculé comme suit:

$$GL = \mu_s \times \text{cor} \times I_0 \times T_{\text{tot}}^1 \quad (8)$$

$$T_{\text{tot}}^1 = T_{\text{O}_3}^1 \times T_{\text{ve}}^1 \times \left[T_{\text{ae}}^1 \times T_{\text{r}}^1 \times (0.5 - f \text{ dv}) + T_{\text{ae}}^1 \times 0.5 + T_{\text{r}}^1 \times f \text{ dv} \right] \quad (9)$$

où, $\mu_s = \cos(\theta_s)$

θ_s est la distance zénithale du soleil.

T_{tot}^1 est la transmission totale (directe + diffuse) dans la direction Soleil – Terre.

T_{ve}^1 , $T_{\text{O}_3}^1$, T_{ae}^1 et T_{r}^1 représentent respectivement les transmissions de la vapeur d'eau, de l'ozone, des aérosols et de Rayleigh.

L'exposant 1 représente le trajet Soleil – Terre. Le paramètre le plus important dans cette formule est la transmission des aérosols T_{ae} [6]: cette fonction n'est pas connue et il faut donc la déterminer. Nous avons trois images par jour (9h 00, 12h 00, 15h 00 TU). Pour les jours de beau temps, nous avons émis l'hypothèse que la surface ne varie pas et que seul l'état de l'atmosphère peut varier d'un instant à l'autre.

Le rayonnement global normalisé réfléchi vers le satellite et converti en compte numérique est exprimé par la formule suivante:

$$GL(\tau_{\text{ae}}) = \mu_s \times A \times \text{cor} \times T_{\text{tot}}^{12} \quad (10)$$

$$T_{\text{tot}}^{12} = T_{\text{O}_3}^{12} \times T_{\text{ve}}^{12} \times T_{\text{ae}}^2 \times T_{\text{r}}^2 \times X \quad (11)$$

$$X = T_{\text{r}}^1 \times T_{\text{ae}}^1 \times (0.5 - f \text{ dv}) + 0.5 \times T_{\text{ae}}^1 + T_{\text{r}}^1 \times f \text{ dv} \quad (12)$$

$$A = \frac{1}{\pi \times c} \times \int_{0.4}^{1.1} I_{0\lambda} \times \varepsilon_{\lambda} \times d\lambda \quad (13)$$

Où, c , représente la constante de calibration du détecteur; ε_{λ} , la réponse spectrale du détecteur; T_{tot}^{12} , est la transmission (directe + diffuse) dans la direction Soleil – Terre multipliée par la transmission dans la direction Terre – Satellite.

L'exposant 2 représente le trajet Terre - Satellite. La brillance de référence correspond à la brillance maximale des trois heures. Le rayonnement global de référence est le rayonnement calculé avec un τ_{ae} égal à 0.08 en partant de l'idée que seule l'atmosphère peut varier d'un instant à l'autre.

L'écart entre la brillance de référence et l'une des deux autres brillances reste proportionnelle à l'écart entre le rayonnement global de référence $GL_0(0.08)$ et le rayonnement global réel $GL_i(\tau_{\text{ae}})$.

$GL_0(0.08)$ et $GL_i(\tau_{ae})$ sont calculées pour la même heure. L'indice i représente les heures de 9h00, 12h00 et 15h00. Le coefficient de proportionnalité est $\rho_s(\theta_s, \theta_v, \varphi)$. Nous pouvons donc écrire:

$$GL_0(0.08) - GL_i(\tau_{ae}) = R / \rho_s(\theta_s, \theta_v, \varphi) \quad (14)$$

$$R = ((B_{\max} - B_{atm}) - (B_i - B_{atm})) \quad (15)$$

$\rho_s(\theta_s, \theta_v, \varphi)$ pour ($\tau_{ae} = 0.08$) et pour une heure quelconque est donnée par la relation suivante:

$$\rho_s(\theta_s, \theta_v, \varphi) = \frac{\pi \times C \times (B_{\max} - B_{atm})}{A \times GL_0(0.08) \times T_{sat}^{12}} \quad (16)$$

$\rho_s(\theta_s, \theta_v, \varphi)$ pour la même heure et pour des conditions réelles est donnée par la relation suivante:

$$\rho_s(\theta_s, \theta_v, \varphi) = \frac{\pi \times C \times (B_{\max} - B_{atm})}{A \times GL_i(\tau_{ae}) \times T_{sat}^{12}} \quad (17)$$

4. RESULTATS ET DISCUSSION

Nous avons montré la possibilité d'estimer le coefficient de réflectance bidirectionnelle en utilisant les modèles de transfert radiatif. Nous avons utilisé un modèle simple avec un minimum de paramètres d'entrées.

4.1 Evolution du coefficient de réflectance bidirectionnelle

Pour une atmosphère sans nuage, la transmission du rayonnement solaire direct dépend de la masse d'air (quantité d'aérosols et de vapeur d'eau) rencontrée au cours de sa traversée jusqu'au sol.

Cette influence est caractérisée globalement par les coefficients de trouble atmosphérique, tels que le facteur TL de Linke et le coefficient β d'Ångstrom. Les aérosols ont une influence notable surtout dans le visible 0.25 – 0.63 μm .

Les figures 1 à 3 montrent l'évolution du coefficient de réflectance bidirectionnelle calculé pour $\tau_{ae} = 0.08$ et τ_{ae} variable. Nous avons pris pour référence la valeur de 0.08 qui correspond au ciel bleu sombre.

Sur les figures 1, 2, 3, nous avons représenté l'évolution de la réflectance en fonction du quantième du jour. On remarque que l'allure des courbes n'est pas régulière lorsque τ_{ae} est variable.

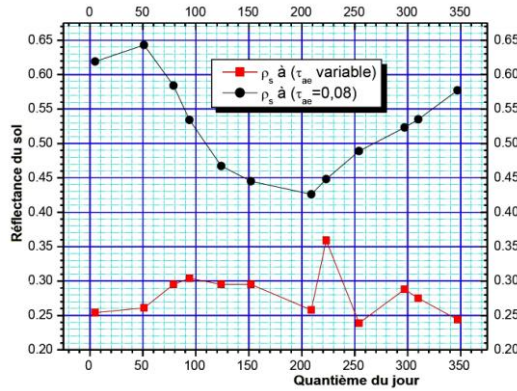


Fig. 1 : Evolution de la réflectance calculée à 9h00 TU pour $\tau_{ae} = 0.08$ et τ_{ae} variable

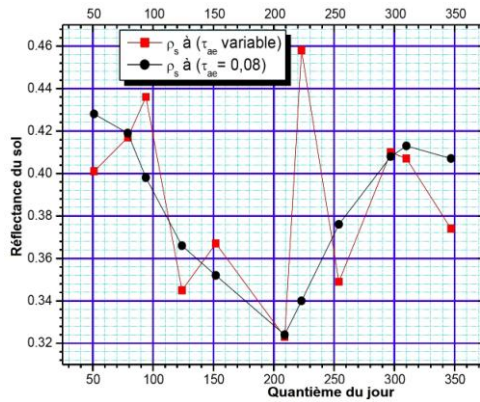


Fig. 2: Evolution de la réflectance calculée à 12h00 TU pour $\tau_{ae} = 0.08$ et τ_{ae} variable

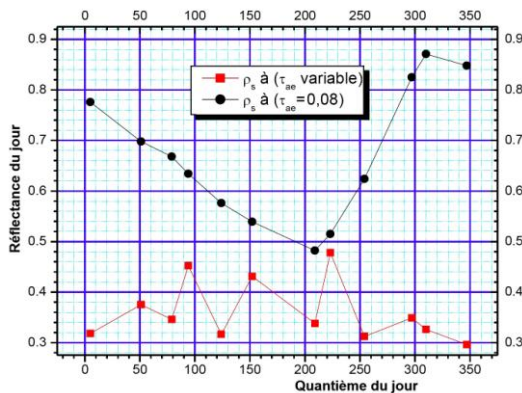


Fig. 3: Evolution de la réflectance calculée à 15h00 TU pour $\tau_{ae} = 0.08$ et τ_{ae} variable

L'évolution annuelle de la réflectance calculé pour un τ_{ae} constant est représentée par la figure 4. On remarque que les courbes ont mêmes allures, et que pour la même latitude, le coefficient de réflectance du sol augmente en fonction de l'heure de la journée. La réflectance est minimale en période estivale, tandis que le rayonnement global est maximal.

D'après les figures précédentes, on voit des variations significatives de la réflectance car, en plus de l'influence des aérosols, il y a aussi l'influence de l'inclinaison solaire. Les fluctuations observées pour la même heure sont dues aux variations de τ_{ae} .

4.2 Quantification de l'effet des aérosols sur le calcul

Sur la figure 5, nous avons représenté la variation de ρ_s en fonction de l'augmentation ou la diminution de τ_{ae} par rapport à τ_{ae} de référence.

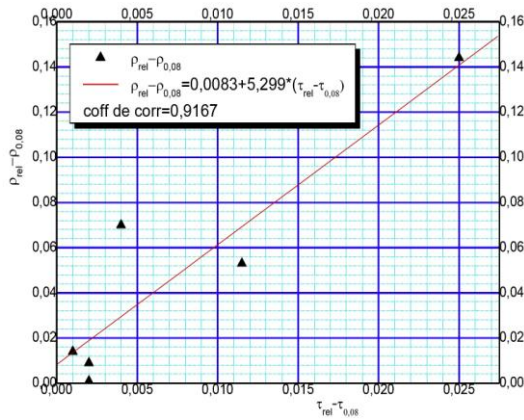


Fig. 5: Variation du coefficient de réflectance bidirectionnelle en fonction de la variation de l'épaisseur optique des aérosols

5. CONCLUSION

La surface de la terre n'absorbe pas totalement le rayonnement solaire incident, une partie de ce rayonnement est renvoyée (réflexion ou albédo) vers l'atmosphère et l'espace, en étant de nouveau diffusé et absorbé lors de sa traversée de l'atmosphère. Le réchauffement du sol et l'énergie stockée en surface dépendent de cette partie absorbée.

Le sol réfléchissant est caractérisé par le coefficient de réflectance bidirectionnelle ρ . L'épaisseur optique de référence des aérosols est de 0,08, et c'est le cas d'un ciel bleu foncé.

Nous avons ensuite utilisé les mesures de l'épaisseur optique de la station de Tamanrasset pour quantifier les fluctuations de la réflectance. La relation liant les variations de l'épaisseur optique ($\tau_{ae} - 0,08$) aux fluctuations de la réflectance ($\rho - \rho_{0,08}$) est linéaire avec un coefficient de corrélation de 0,9167.

Dans ces calculs, nous avons utilisé τ_{ae} mesuré pour la longueur d'onde $0,05 \mu\text{m}$ et nous n'avons pas tenu compte des autres propriétés optiques des aérosols, tels que l'indice de réfraction, les dimensions et la concentration des particules. Pour avoir plus

de précision de calcul, il est nécessaire de calculer à l'aide de la théorie de Mie, l'efficacité de diffusion et les paramètres de Stockes.

NOMENCLATURE

D : Rayonnement diffus, (W/m ²)	I : Rayonnement direct, (W/m ²)
D _{ae} : Rayonnement diffus des aérosols, (W/m ²)	D _r : Rayonnement diffus de Rayleigh, (W/m ²)
GL : Rayonnement solaire global au sol, (W/m ²)	ρ _s (θ _s , θ _v , φ) : Coefficient de réflectance bidirectionnelle du sol
T _{tot} ¹² : Transmission (directe + diffuse)	τ _{ae} : Epaisseur optique des aérosols
B _{max} : Brillance au niveau du satellite	B _{atm} : Brillance de l'atmosphère
θ _s : Angle zénithal solaire	θ _v : Angle zénithal de visée du satellite
φ : Angle azimuth	

REFERENCES

- [1] A. Angstrom, 'On the Atmospheric Transmission of Sun Radiation, and on the Dust in the Air', Geografska Annaler, Vol. 2, pp. 156 – 166, 1929.
- [2] J. Ross, 'The Radiation Regime and Architecture of Plant Stands', Series: Tasks for Vegetation Science, Springer, Boston, 420 p., 1981.
- [3] D.W. Derring, T.F. Eck and J. Otterman, 'Bidirectional Reflectances of Selected Desert Surfaces and Their Three-Parameter Soil Characterization', Agricultural and Forest Meteorology, Vol. 52, N°1-2, pp. 71 – 93, 1990.
- [4] K.L. Coulson and D.W. Reynolds, 'The Spectral Reflectance of Natural Surface', Journal of Applied Meteorology, Vol. 10, pp. 1285 – 1295, 1971.
- [5] B. Biona, 'Estimation du Rayonnement Solaire Global en Zone Sahélienne: Variabilités Spatiale, Temporelle et Schémas d'Interpolation à Partir des Données Météorologiques Synoptiques', Thèse de 3^{ème} Cycle, Université de Clermont II, 76 p., 1983.
- [6] A. Mokhnache, 'Détermination des Faibles Atténuations du Rayonnement Solaire au Sol à Partir de l'Imagerie Satellitaire', Université Mentouri de Constantine, 2002.
- [7] C. Perrin de Brichambaut, 'Estimation des Ressources Energétiques en France', Cahiers de l'A.F.E.D.E.S, N°1, 1975.