

## Calcul du coefficient de réflectance bidirectionnelle du sol à partir deux modèles

S. Seghiri\*, A. Mokhnache et S.Tourta

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

(reçu le 20 Juin 2010 – accepté le 27 Septembre 2010)

**Résumé** - La réflectance est la mesure de la capacité d'une surface à réfléchir l'énergie incidente. La notion de réflectance bidirectionnelle  $\rho_s(\theta_s, \theta_v, \varphi_s)$ , dépend des longueurs d'ondes employées, de la nature et de la géométrie des surfaces de réflexion, des angles d'éclairage et de visée du capteur. Le coefficient  $\rho_s(\theta_s, \theta_v, \varphi_s)$  est un paramètre important dans le calcul du bilan d'échange global d'énergie à l'interface sol-atmosphère, il est égal au rapport entre le rayonnement solaire réfléchi dans la direction d'observation et le rayonnement incident. La réflectance de surface dépend de l'heure et de la saison, elle diminue avec l'augmentation de la hauteur angulaire du soleil. Dans ce travail, nous avons utilisé un modèle analytique à bande large et les images numériques du canal visible VISSR de Météosat pour l'estimation de  $\rho_s(\theta_s, \theta_v, \varphi_s)$ . Le site test est la région de Tamanrasset, où nous avons une station de mesures radiométriques et 7 images par jour pleine résolution qui couvrent toute l'Algérie pour la période de janvier jusqu'à décembre 1999. Les résultats d'observations et les calculs se concordent. Nous avons trouvé que  $\rho_s(\theta_s, \theta_v, \varphi_s)$  augmente avec l'angle solaire zénithal. Pour les mois d'été,  $\rho_s(\theta_s, \theta_v, \varphi_s)$  est faible par rapport aux mois d'hiver.

**Abstract** - The reflectance is the ability measure of a surface to reflect incident energy. The bidirectional reflectance concept  $\rho_s(\theta_s, \theta_v, \varphi_s)$ , depends on the employed wave longs, the nature and geometry of reflecting surfaces, illumination angles and sensor viewing. The coefficient  $\rho_s(\theta_s, \theta_v, \varphi_s)$ , is an important parameter in determining the overall balance of energy exchange at the interface soil-atmosphere, it is the ratio of reflected solar radiation in the observation direction and the incident radiation. The surface reflectance depends on the time and season, it decreases with increasing the angular height of the sun. In this work, we have used an analytical model for broad band, and digital images of the visible channel VISSR Meteosat for estimation of  $\rho_s(\theta_s, \theta_v, \varphi_s)$ . The test site is the region of Tamanrasset, where we have a radiometric station and 7 days with full resolution images that cover the whole of Algeria for the period of January to December 1999. The observations results and calculations are consistent. We have found that  $\rho_s(\theta_s, \theta_v, \varphi_s)$ , increases with solar zenith angle. For the summer months,  $\rho_s(\theta_s, \theta_v, \varphi_s)$  low compared to the winter months.

**Mots clés:** Réflectance bidirectionnelle - Satellite Météosat - Télédétection - Rayonnement global.

### 1. INTRODUCTION

Le détecteur de Météosat est équipé d'un radiomètre à balayage, qui balaye la surface de la terre ligne par ligne. Chaque ligne consiste en une série d'images élémentaires ou pixel. Pour chaque pixel, le radiomètre mesure l'énergie radiative dans différentes bandes spectrales et fournit des signaux numérisés codés sur 8 bits appelés

---

\* seg.sara@gmail.com

comptes numériques (CN), qui représentent le rayonnement réfléchi par le système sol – atmosphère [1]. Cette mesure est transmise à une station au sol où elle est traitée avant d’être envoyée à la communauté des utilisateurs. Ces images sont souvent utilisées pour estimer le rayonnement solaire global au sol et l’albédo de surface. Le rayonnement mesuré par le capteur du satellite dépend de la nature du sol et de l’état de l’atmosphère [2].

La surface du sol est caractérisée par  $\rho_s (\theta_s, \theta_v, \varphi_s)$ , qui dépend de l’humidité, de la température, de la texture et des conditions géométriques d’éclairement. Nous avons choisi un site du désert pour lequel l’influence humaine n’existe pas. Ce site est stable et uniforme, tel que vu par Météosat. A partir de la nébulosité totale, nous avons sélectionné les images de ciel clair pour la période janvier-décembre 1999. C’est la première étape pour estimer le coefficient de réflectance du sol [3].

Dans ce travail, nous avons utilisé un modèle analytique à bande large qui est décrit par des relations en fonction de la masse d’air. Ces relations sont intégrées sur tout le spectre et qui tiennent compte de l’atténuation du rayonnement par les principaux constituants de l’atmosphère.

## 2. LA REFLECTANCE BIDIRECTIONNELLE

Le rayonnement électromagnétique du soleil interagit avec la surface de la terre. Cette interaction, se caractérise par la réflectance bidirectionnelle spectrale de surface  $\rho_\lambda (\theta_s, \Psi_s, \theta_v, \Psi_v)$ , qui dépend donc de la longueur d’onde  $\lambda$  et les angles zénithaux d’incidence  $\theta_s$  et de réflexion  $\theta_v$ , du rayonnement par rapport à la surface, et par leurs angles azimutaux  $\Psi_s$  et  $\Psi_v$  (Fig. 1).

Selon la nature de la surface avec laquelle le rayonnement interagit, il sera diffusé ou absorbé de manière très diverse (réflexion spéculaire, réflexion diffuse, rétrodiffusion).

La formulation physique de la réflectance spectrale bidirectionnelle est la suivante [4]:

$$\rho_\lambda (\theta_s, \Psi_s, \theta_v, \Psi_v) = \frac{\pi L(\theta_v, \Psi_v)}{E_{s\lambda}(\theta_s, \Psi_s)} \tag{1}$$

$L(\theta_v, \Psi_v)$  est la luminance mesurée dans la direction d’observation  $(\theta_v, \Psi_v)$ , et  $E_{s\lambda}(\theta_s, \Psi_s)$  l’éclairement incident du soleil suivant la direction  $(\theta_s, \Psi_s)$ .

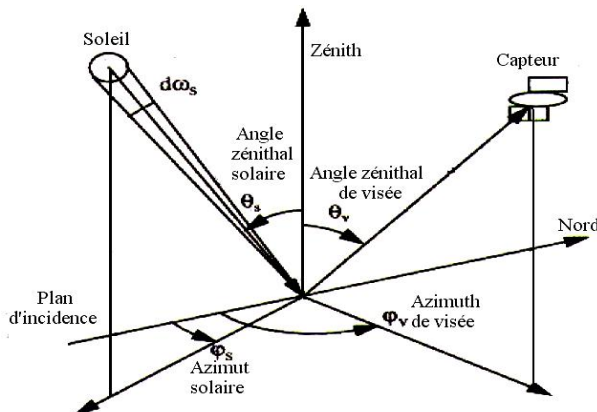


Fig. 1: Géométrie des acquisitions de réflectance bidirectionnelle

### 3. LES MODELES PHYSIQUES

Nous avons utilisé deux modèles pour l'estimation du rayonnement solaire au sol, le premier est le modèle spectral SMARTS2.9, le deuxième est le modèle analytique à bande large.

#### 3.1 Modèle spectral de SMARTS2.9

C'est un modèle de transfert radiatif rédigé en fortran avec une interface graphique sous Windows ce qui facilite l'utilisation du code. Le SMARTS2.9 est un modèle spectral qui calcule les transmissions atmosphériques, le rayonnement direct, diffus et global sur plan horizontal et l'inclinaison la surface. Il couvre les ondes comprises entre 280 à 4000 nm.

#### 3.2 Modèle analytique à bande large

Perrin de Brichambaut [5], 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.

##### Rayonnement global

Le rayonnement global est exprimé par:

$$GL = I \times \sin(h_s) + D \quad (2)$$

D : le rayonnement diffus est la somme du diffus Rayleigh et du diffus des aérosols,

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

$D_r$  , le rayonnement diffus Rayleigh est exprimé par la formule suivante:

$$D_r = I_{on} \times \cos \times \sin(h_s) \times T_m \times [T_{ae} \times (1 - T_r) \times 0.5] \quad (4)$$

$D_{ae}$  , le rayonnement diffus des aérosols s'exprime par la relation suivante:

$$D_{ae} = I_{on} \times \cos \times \sin(h_s) \times T_m \times [\omega_0 \times (1 - T_{ae}) \times T_r \times f d_v^1] \quad (5)$$

$T_m$  est la transmission de l'ozone et de la vapeur d'eau,  $T_m = T_{oz} \times T_w$  ;  $\omega_0$  est l'albedo de simple diffusion des aérosols; et  $f d_v^1$  la fonction de diffusion vers l'avant des aérosols.

I, le rayonnement direct normal est calculé à partir de la formule suivante:

$$I = I_0 \times \cos \times T_{oz} \times T_w \times T_r \times T_g \times T_{ae} \quad (6)$$

$T_{oz}$  ,  $T_w$  ,  $T_r$  ,  $T_g$  et  $T_{ae}$  sont les transmittances respectives de l'ozone, de la vapeur d'eau, de Rayleigh, des gaz et aérosols.  $I_0$  est la constante solaire hors atmosphère, elle est égale à 1367 W/m<sup>2</sup> .  $\cos$  est le facteur de correction de la distance moyenne terre – soleil.

#### 3.3 Les modèles satellitaires

##### 3.3.1 Les coordonnées géographiques de la ville Tamanrasset

Dans ce travail, nous allons calculé le coefficient de réflectance en introduisant les comptes numériques du canal visible, en utilisant le modèle satellitaire et formule

spécifique. On doit localiser la région de Tamanrasset sur les images visibles, qui sont formées 3561 lignes par 2261 pixels et représentent le disque terrestre observé (Fig. 2).

En introduisant les coordonnées géographiques, latitude et longitude du lieu, et la résolution de l'image, on obtient la ligne et le pixel (colonne) du lieu.

A partir de l'image visible de satellite Météosat7 (Fig. 3) on sélectionne la ville de Tamanrasset qui se situe au point de latitude 22.470 Nord, de longitude 5.310 Est, on l'obtient la figure 4.

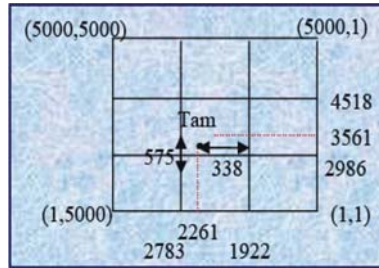


Fig. 2: Coordonnées image de la ville de Tamanrasset

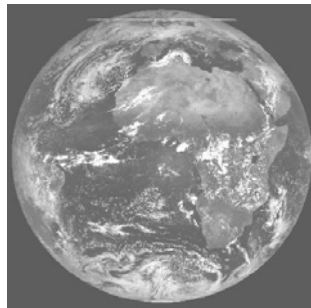


Fig. 3: Image de satellite METEOSAT7



Fig. 4: Région de Tamanrasset

### 3.3.2 Le coefficient de réflectance bidirectionnelle

L'évaluation de la réflectance d'une cible, surface du sol interceptant le champ de visé du satellite dépend des angles d'incidences en direction du sol ( $\theta_s$ ) et en direction du satellite ( $\theta_v$ ), et aussi de l'azimut relatif ( $\phi_s$ ) entre les plans verticaux contenant les

directions d'incidence (Fig. 1), doit tenir en compte les deux systèmes, le système soleil – cible d'une part, et le système cible – satellite d'autre part.

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

$$GL(\tau_{ae}) = \mu_s \times A \times cor \times T_{tot}^{12} \quad (7)$$

$$T_{tot}^{12} = T_{oz}^{12} \times T_{ve}^{12} \times T_{ae}^{12} \times T_r^{12} \times \left( T_r^1 \times T_{ae}^1 \times (0.5 - f \, dv) + 0.5 \times T_{ae}^1 + f \, dv \times T_r^1 \right) \quad (8)$$

$\mu_s = \sin(h_s)$  est le sinus de la hauteur du soleil.

A est une constante qui dépend de la réponse spectrale du détecteur; elle est égale à 0.501 pour Météosat7.

$T_{tot}^{12}$  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.

Le coefficient de réflectance bidirectionnelle avec  $\tau_{ae}$  variable est exprimé par la relation suivante:

$$\rho_s(\theta_s, \theta_v, \varphi) = \frac{\pi \times C \times (B_{sat} - B_{atm})}{A \times GL(h_s) \times T_{sat}^{12}} \quad (9)$$

C est la constante de calibration du détecteur, elle est égale à 0.873 pour Météosat7.

Ainsi la réflectance pour  $\beta$ . égale à 0.08 pour une heure quelconque est donnée par la formule suivante:

$$\rho_s(\theta_s, \theta_v, \varphi) = \frac{\pi \times C \times (B_{max} - B_{atm})}{A \times GL_{(0.08)}(h_s) \times T_{sat}^{12}} \quad (10)$$

$B_{max}$  est la brillance maximale de satellite,  $GL_{(0.08)}$  est le rayonnement global, mesuré pour  $\beta = 0.08$  et  $B_{atm}$  est la brillance atmosphérique.

## 4. RESULTATS ET DISCUSSION

La réflectance est une caractéristique intrinsèque du matériau qui décrit le rapport du flux réémis par le matériau sur le flux incident.

### 4.1 Evolution du coefficient de réflectance bidirectionnelle

Sur la figure 5, on a représenté le coefficient de réflectance bidirectionnelle  $\rho_s(\theta_s, \theta_v, \varphi_s)$ , en fonction du temps universel.

Cette courbe montre que la valeur de la réflectance est minimum à midi et une valeur maximum à 15h00, cela est dû à la variation inverse du rayonnement global.

### 4.2 Effet de la hauteur angulaire du soleil sur le calcul de réflectance

Sur la figure 6, on a représenté le coefficient de réflectance bidirectionnelle  $\rho_s(\theta_s, \theta_v, \varphi_s)$ , en fonction de  $\sin(h_s)$ .

Il apparaît une diminution du coefficient de réflectance  $\rho_s(\theta_s, \theta_v, \varphi_s)$  avec l'augmentation de  $\sin(h_s)$ , telle que les valeurs de la réflectance du sol sont maximales pour certaines heures de l'après midi (14h00, 15h00), et des valeurs minimales à midi. Cela est dû à l'inclinaison du sol.

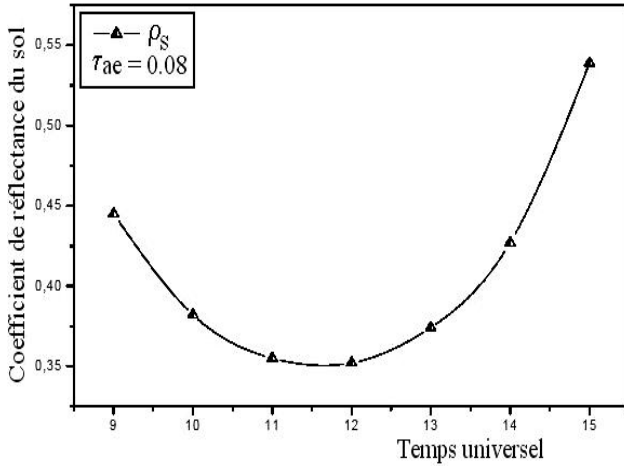


Fig. 5: Evolution horaire du coefficient de réflectance (01/06/1999)

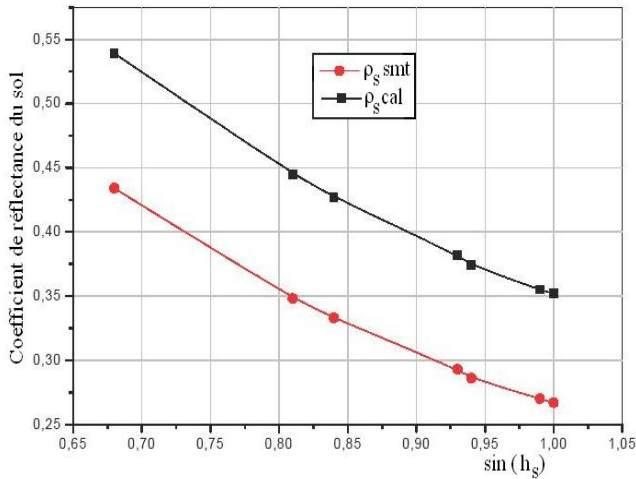


Fig. 6: Variation du coefficient de réflectance en fonction de  $\sin(h_s)$

Par ailleurs, l'effet de la variation de  $\sin(h_s)$  est nettement mis en évidence sur la figure 7, qui montre une relation linéaire entre la variation de  $\rho_s(\theta_s, \theta_v, \varphi_s)$  et la variation de  $\sin(h_s)$ , le coefficient de corrélation est de  $R = 0.9872$ .

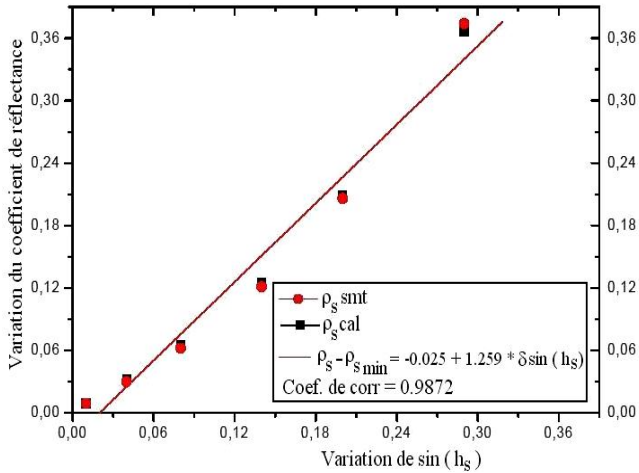


Fig. 7: Etude statistique de la variation du coefficient de réflectance en fonction de  $\sin(h_s)$

#### 4.3 Comparaison des résultats obtenus par les deux modèles

Le graphe présent dans la figure 8, montre la variation de coefficient de réflectance calculé par deux modèles, analytique à bande large et spectral de SMARTS2 au sol en fonction de temps.

Sur la figure 8, on remarque la même variation des valeurs de coefficient de réflectance dans les deux modèles.

- à 15h00 le coefficient de réflectance du sol est maximum.
- à 12h00 le coefficient de réflectance du sol est minimum.

En outre, l'observation de cette courbe montre qu'il y a une petite différence entre les calculs obtenus par le modèle spectral de SMARTS2 et le modèle analytique de bande large est 2,4 %, on peut dire que le calcul de  $\rho_s$  par le modèle de bande large est plus précis de modèle de SMARTS2.

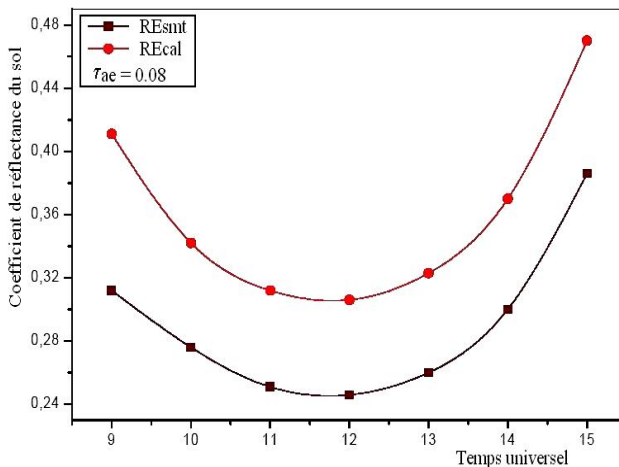


Fig. 8: Coefficient de réflectance calculé par deux modèles (28/07/1999)

Pour valider les résultats, on va comparer les deux modèles du calcul (analytique à bande large avec spectral de SMARTS2 au sol).

Les figures 9 présentent une régression linéaire entre les deux modèles de calcul à 9h00 jusqu'à 15h00 temps universel, le coefficient de corrélation et les erreurs relatives, ce qui indique que le modèle analytique, simple et intégré sur tous les spectres, donnent des résultats similaires que le modèle spectral au sol de SMARTS2.

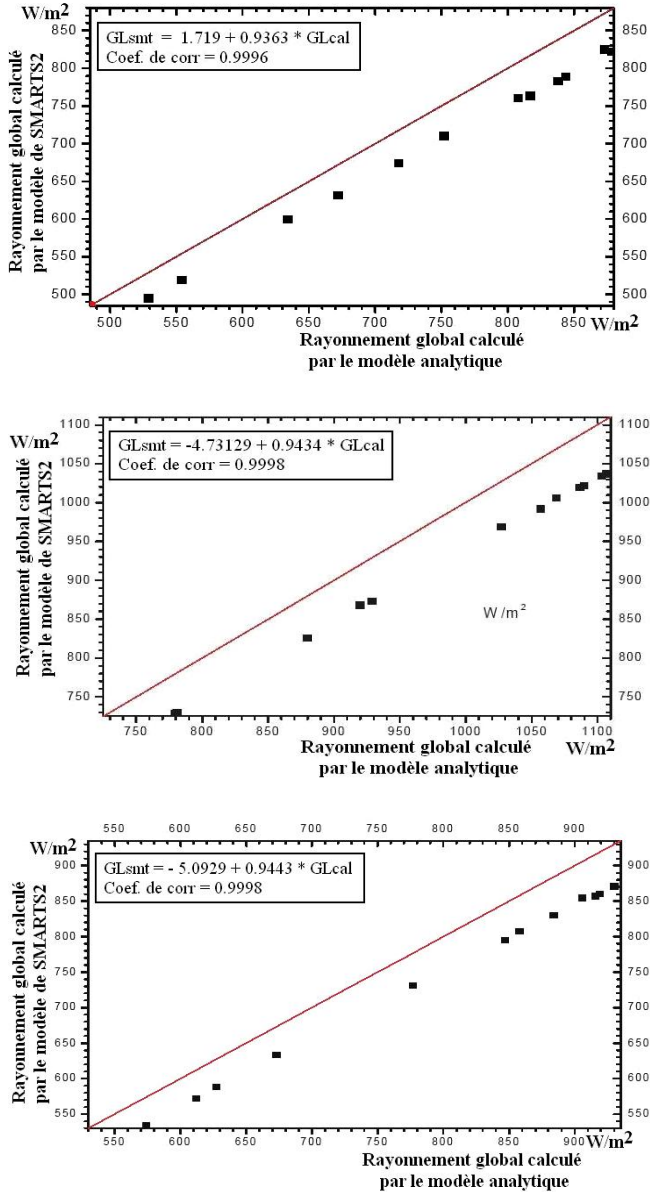


Fig. 9: Comparaison entre le rayonnement global calculé par le modèle analytique et calculé par le modèle spectral de SMARTS à 09h00, 11h00, 14h00 Temps universel



## 5. CONCLUSION

La réflectance est la mesure de la capacité d'une surface à réfléchir l'énergie incidente. Les surfaces terrestres interceptent la majeure partie de l'énergie solaire incidente dans les régions du spectre électromagnétique du visible et des courtes longueurs d'onde infra-rouge.

La notion de réflectance bidirectionnelle dépend des longueurs d'ondes employées, de la nature de la géométrie des surfaces de réflexion, des angles de l'éclairement solaire et de visée du capteur. La comparaison entre le rayonnement global calculé par les deux modèles montre que les calculs de  $\rho_s$  obtenu par le modèle de bande large est plus précis que le modèle de SMARTS2.

Les mesures au sol du coefficient de réflectance bidirectionnelle montrent que la hauteur angulaire du soleil a une influence notable. Pour le même point de surface, nous avons une forte valeur de réflectance le matin et une valeur minimale à midi solaire.

Dans notre hypothèse, nous avons considéré que la valeur minimale de la réflectance correspond à la vraie valeur caractéristique de la surface du sol. Pour la même journée, nous savons que l'état de l'atmosphère reste inchangé et la valeur de référence de l'épaisseur optique des aérosols est de l'ordre de 0.08. Cette valeur correspond au cas d'un ciel pur.

## NOMENCLATURE

D : Rayonnement diffus, ( $\text{W}/\text{m}^2$ )

$E_\lambda(\theta_v, \Psi_v)$  : Eclairement incident du soleil suivant la direction  $(\theta_v, \Psi_v)$ , ( $\text{W}/\text{m}^2$ )

GL : Rayonnement solaire global au sol, ( $\text{W}/\text{m}^2$ )

I : Rayonnement direct, ( $\text{W}/\text{m}^2$ )

$L(\theta_v, \Psi_v)$  : Luminance mesurée dans la direction d'observation  $(\theta_v, \Psi_v)$

$T_{\text{tot}}^{12}$  : Transmission (directe + diffuse)

$\rho_s(\theta_s, \theta_v, \varphi_s)$  : Coefficient de réflectance bidirectionnelle du sol

$B_{\text{max}}$  : Brilliance au niveau du satellite

$B_{\text{atm}}$  : Brilliance de l'atmosphère

$\theta_s$  : Angle zénithal solaire

$\theta_v$  : Angle zénithal de visée

$\varphi$  : Angle azimuth

**REFERENCES**

- [1] L. Claustres, '*Modélisation de la Fonction de Distribution de la Réflectance Bidirectionnelle par Ondelettes pour le Rendu Physiquement Réaliste*', Thèse de Doctorat, Université Paul Sabatier, Toulouse, 2003.
- [2] Document Collectif, '*Cours de Télédétection*', Centre Canadien de la Télédétection des Ressources Naturelles, Canada, 1998.
- [3] S. Seghiri et A. Mokhnache, '*Utilisation des Images Numériques Satellitaires pour la Quantification de l'Effet de l'Inclinaison Solaire sur le Coefficient de Réflectance Bidirectionnelle du Sol*', Congrès sur les Energies Renouvelables, ICRESD\_07, Tlemcen, Algérie, 21-24 Mai, 2007.
- [4] Arino, '*Albédo de Surface et Bilan Radiatif de Courte Longueur d'Ondes: Contribution Satellitaire*', Thèse de Doctorat, Toulouse, 1990.
- [5] Perrin de Brichambaut, '*Estimation des Ressources Solaires Energétiques en France*', Supplément, N°1 des Cahiers de l'Association Française pour l'Etude et le Développement de l'Energie Solaire, Edition Européenne Thermique et Industrie, pp 80, 1975.