

Estimation de rayonnements d'origine solaire reçus à la surface terrestre grâce au modèle 6S de transfert radiatif dans l'atmosphère et des mesures d'un photomètre solaire

Olivier Marloie¹, Frédéric Baret, Jean-François Hanocq

Résumé : *Cet article présente un exemple d'utilisation d'un modèle de transfert radiatif dans l'atmosphère afin de simuler le rayonnement d'origine solaire reçu à la surface du sol. Le modèle choisi est celui mis en œuvre dans le code 6S (second simulation of the satellite signal in the solar spectrum) utilisant des données d'épaisseur optique mesurées grâce à des photomètres solaires. Nous décrivons dans un premier temps, le code 6S (principe et utilisation), le réseau mondial de photomètres solaires, AERONET, mettant à disposition des données d'épaisseur optique et dans un second temps, des comparaisons d'estimations à des mesures réalisées sur le centre Inra d'Avignon. Les résultats des comparaisons montrent une bonne adéquation entre les mesures et les estimations dans les domaines de longueurs d'onde de 300 à 3 000 nm.*

Mots clés : rayonnements solaires, modèle, transfert radiatif

Introduction

L'estimation de rayonnements d'origine solaire reçus à la surface terrestre peut se révéler intéressante lorsque l'on ne dispose pas d'instruments pour sa mesure ou lorsque l'on considère des bandes spectrales bien précises. Des méthodes permettent de simuler le rayonnement global en tout point en utilisant des données satellitaires (Météosat par exemple) mais elles sont d'une précision limitée à une échelle de temps courte et sur un domaine spatial limité. L'avantage d'utiliser un modèle de transfert radiatif dans l'atmosphère tel que le code 6S (*Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum*; Vermote *et al.* 1994, 1997) réside dans le fait de pouvoir estimer à partir d'un faible nombre d'entrées, le rayonnement non seulement sur l'ensemble du domaine solaire mais également dans des bandes spectrales plus réduites. Il permet également d'estimer les composantes directes et diffuses. Cependant, son utilisation nécessite de disposer d'information sur les caractéristiques de l'atmosphère (épaisseur optique des aérosols notamment) au moment de l'estimation. Ces informations sont obtenues à partir de données photométriques issues de mesures réalisées par des photomètres solaires et en de nombreux points répartis dans le monde grâce au réseau mondial AERONET (Holben *et al.*, 1998).

Dans un premier temps, nous décrirons rapidement le code 6S et le réseau AERONET puis nous comparerons les sorties du modèle et les mesures réalisées sur le centre Inra d'Avignon.

¹ UMR1114 - Environnement méditerranéen et modélisation des agro - hydro systèmes (EMMAH) INRA-Univ. Avignon et Pays de Vaucluse – F-84914 Avignon ☎ 04 32 72 23 47 ✉ olivier.marloie@avignon.inra.fr

1. Le code 6S

Le laboratoire d'optique atmosphérique (LOA) de Lille a développé ce code pour corriger les mesures radiométriques des effets de l'atmosphère (absorption par les gaz, diffusion par les molécules et les aérosols). Il simule le signal émis par une surface (de 0,25 à 4,0 microns) et il est observé par un capteur radiométrique embarqué (satellite, avion) à différentes altitudes et sous différentes conditions de l'atmosphère, d'éclairement solaire et d'angle de visée. Ce code repose sur la modélisation des processus de transferts radiatifs dans l'atmosphère en simulant les flux directs et diffus arrivant au sol en fonction de la longueur d'onde (résolution : 2,5 nm).

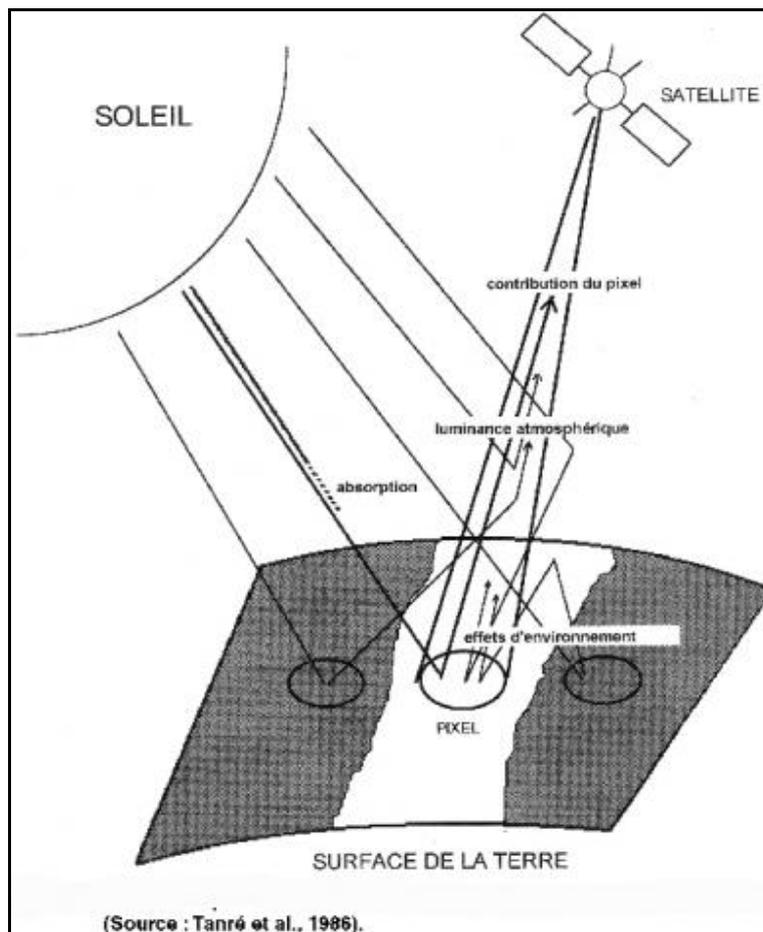


Figure 1 : Trajet atmosphérique et effets de l'atmosphère sur la mesure radiométrique

Ce logiciel se présente sous la forme d'un fichier exécutable. La ligne de commande intègre des options et le nom du fichier contenant les paramètres nécessaires aux calculs des grandeurs de sortie.

En entrée (**figure 2**), il faut définir successivement :

- **la géométrie** : définie soit par l'entrée des angles solaires (zénithal et azimutal) et des angles de visée radiométrique, soit par l'entrée des date, heure, longitude et latitude nécessaires au calcul des angles solaires et des conditions de visée propres à un satellite donné (Landsat, SPOT, AVHRR,...) ;

- les caractéristiques atmosphériques, déterminant l'absorption et la diffusion :

- pour les molécules de gaz (ozone, vapeur d'eau, oxygène, dioxyde de carbone, méthane, oxyde nitrique et monoxyde de carbone) : choix entre un modèle d'atmosphère (tropical, latitude moyenne d'hiver ou d'été, subarctique d'hiver ou d'été, et standard US 62), l'entrée de données de radiosondage ou l'entrée de données des contenus intégrés en vapeur d'eau et en ozone de l'atmosphère ;
- pour les aérosols troposphériques : choix du modèle d'aérosols (continental, désertique, maritime ou urbain) ou définition d'un modèle à partir des proportions (%) des constituants possibles (poussières, constituants solubles, particules océaniques et suies de carbone) ; concentration des aérosols, à partir soit de la visibilité horizontale, soit de l'épaisseur optique des aérosols à la longueur d'onde de 550 nm.

- les caractéristiques spectrales : choix entre des conditions spectrales prédéfinies correspondant aux canaux des satellites et capteurs les plus usuels (en particulier NOAA, Landsat MSS, TM et SPOT HRV en mode multi spectral), l'entrée de caractéristiques spectrales définies par une longueur d'onde et une bande spectrale définie par ses bornes supérieure et inférieure ;

- les caractéristiques de surface : homogène ou hétérogène pour la détermination des effets d'environnement ; réflectance de la surface : soit constante sur l'intervalle spectral préalablement déterminé soit spectralement variable (il faut alors entrer la réflectance par intervalle de 0,005 μm ; possibilité d'utiliser des courbes de réflectance prédéfinies pour l'eau claire, l'eau de lac, le sable et la végétation verte).

<p>Géométrie angle solaire zénithal : 69,94°, angle solaire azimutal : 0° angle d'obs. zénithal : 8,00°, angle d'obs. azimutal : 102,00°</p> <p>Caractéristiques atmosphériques description du modèle atmosphérique : vapeur d'eau et ozone ($U_{\text{H}_2\text{O}} = 0,86 \text{ g/cm}^2$, $U_{\text{O}_3} = 0,35 \text{ cm/atm}$) type d'aérosols : continental conditions optiques : épaisseur optique à 550 nm = 0,034 altitude de la cible (km) : - 0,03 altitude du capteur (km) : - 1 000</p> <p>Caractéristiques spectrales longueur d'onde inf. = 0,3 μm longueur d'onde sup. = 2,800 μm</p> <p>Caractéristiques de surface type de surface cible : homogène réflectance : 0,2</p>
--

Figure 2 : Exemple d'un fichier d'entrées du logiciel 6S

En sortie (**figure 3**), on obtient les éléments suivants :

- les valeurs intégrées de la réflectance apparente (en %) de la surface visée, de la luminance totale ($\text{W.m}^{-2}.\text{sr}^{-1}$) mesurée par le capteur et de la transmittance gazeuse ;
- les valeurs normalisées (en %) de l'éclairement solaire au niveau du sol (% de rayonnement direct, diffus et en provenance de l'environnement de la cible) et de la réflectance mesurée au niveau du satellite (contributions de l'atmosphère, de l'environnement et de la cible) ;
- les valeurs absolues correspondantes en W.m^{-2} pour l'éclairement au niveau du sol et en $\text{W.m}^{-2}.\text{sr}^{-1}$ pour les luminances au niveau du satellite ;
- l'éclairement solaire (hors atmosphère) intégré sur la bande spectrale considérée.

Réflectance apparente : 0,1202		
Luminance totale ($\text{W.m}^{-2}.\text{sr}^{-1}.\mu\text{m}^{-1}$) : 7,193		
Transmittance gazeuse totale : 0,818		
Eclairement solaire reçu au sol :		
	Valeurs normalisées (%)	Valeurs absolues (W.m^{-2})
Eclairement direct :	82,7	116,32
Eclairement diffus :	16,1	20,55
Contribution environnement :	0,8	0,95
Signal reçu au niveau du satellite :		
	Réflectances (%)	Luminances ($\text{W.m}^{-2}.\text{sr}^{-1}$)
Contribution atmosphère :	5,2	3,10
Contribution environnement :	0,4	0,23
Cible (pixel) :	6,4	3,86
Total :	8,1	2,138
Spectre solaire intégré (w.m^{-2}) : 1 370,03		
Fonction filtre intégrée (en mic) : 2,5		

Figure 3 : Données de sortie du logiciel 6S

Le rayonnement total reçu à la surface terrestre est égale à la somme des éclairagements directs, diffus et de la contribution de l'environnement, multipliée par la l'intervalle de longueur d'onde sur lequel a été réalisé la simulation (2,5 μm dans cet exemple) :

$$R_g = (E_{\text{direct}} + E_{\text{diffus}} + C_{\text{environnement}}) * 2,5 = 344,5 \text{ W.m}^{-2}.$$

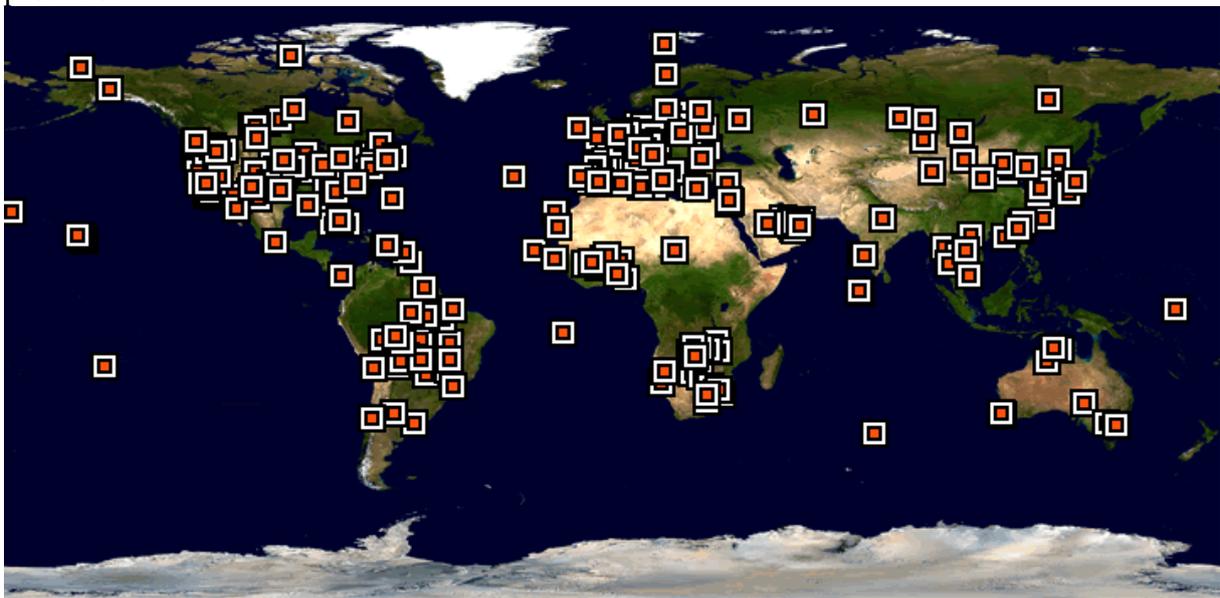
3. Mesure de l'épaisseur optique des aérosols : Le réseau AERONET

Les aérosols sont des particules très légères dont la taille varie du centième de micron à quelques dizaines de microns, ils sont en suspension dans l'atmosphère, d'origine naturelle et anthropique c'est-à-dire liées à l'activité humaine et dont la durée de vie est plutôt brève ; elles peuvent être transportées sur de très grande distance.

L'épaisseur optique d'aérosols, ou AOD (Aerosol Optical Depth) caractérise la transparence du milieu atmosphérique, plus spécifiquement comment les aérosols affectent le passage de la lumière à travers l'atmosphère pour une longueur d'onde donnée.

Les photomètres solaires au sol permettent de déterminer localement l'épaisseur optique en mesurant l'éclairement direct ($W.m^{-2}$) provenant du soleil et arrivant à la surface terrestre. Ils sont constitués d'un détecteur qui vise le soleil et qui suit sa course tout au long de la journée. L'éclairement solaire au "sommet" de l'atmosphère étant connue, la mesure de sa valeur à la surface, après traversée de l'atmosphère, permet de connaître la transmission de l'atmosphère.

AERONET (Aerosol RObotic NETwork, <http://aeronet.gsfc.nasa.gov>) est un réseau de mesure des propriétés optiques et microphysiques des particules aérosols contenus dans l'atmosphère. Ce réseau a été initié au début des années 1990 par la NASA et le laboratoire d'optique atmosphérique du CNRS (composante française du réseau AERONET ORE PHOTONS : PHOTométrie pour le Traitement Opérationnel de Normalisation Satellitaire, <http://www-loa.univ-lille1.fr/photons>) afin de caractériser et de surveiller les aérosols sur l'ensemble du globe (**figure 4**). AERONET fournit des observations intégrées sur la colonne atmosphérique : épaisseur optique spectrale, distribution des tailles des particules, contenu en vapeur eau, produits.



Source : AERONET

Figure 4 : Carte d'implantation des sites de mesure du réseau AERONET

Ces observations sont essentielles pour la recherche (compréhension du rôle des aérosols sur le climat, étude sur la qualité de l'air) ainsi que pour la validation ou l'évaluation de variables déduites des images satellitaires.

Les photomètres utilisés dans le réseau AERONET sont exclusivement les instruments automatiques de la marque CIMEL (**figure 5**). Ils sont équipés de 8 filtres pour mesurer l'éclairement (composante directe du rayonnement incident) dans les longueurs

d'onde 340, 380, 440, 500, 670, 870, 1 020 et 1 640 nm. Le réseau impose l'entretien et l'étalonnage des instruments ainsi que le traitement et la distribution en quasi-temps réel des données. Les données de tous les sites de mesures sont envoyées toutes les heures au centre de réception des données par transmission satellite (GOES, METEOSAT, GMS).



Figure 5 : photomètre solaire CIMEL CE318 utilisé dans le réseau AERONET
Centre Inra d'Avignon

4. Comparaison des estimations avec des mesures *in situ*

La version 4.1 du logiciel 6S a été testée en simulant le rayonnement total dans le domaine solaire (300 – 3 000 nm) et visible (400 – 700 nm) sur le centre Inra d'Avignon. Nous avons estimé ces valeurs à partir de la totalité des mesures (épaisseur optique, contenu en vapeur d'eau) acquises par le photomètre solaire du réseau AERONET installés sur ce site (**figure 5**). Nous avons téléchargé sur le site AERONET les données photométriques qui correspondent au meilleur niveau de qualité (level 2,0 : vérification des performances de l'instrumentation, étalonnage, filtrage des données affectées par la présence de nuages).

Pour les conditions géométriques, il est nécessaire de fournir l'angle zénithal du soleil lors de la mesure de l'épaisseur optique ainsi que le jour et le mois. Pour les conditions atmosphériques, nous avons choisi un modèle d'atmosphère standard dont les caractéristiques (pression atmosphérique, composition) sont fixées à leur valeur nominale, les aérosols sont de type continental. La surface est supposée homogène avec une réflectance fixée à 0,1 dans le domaine visible et à 0,2 pour le domaine proche et moyen infrarouge. La bande spectrale sur laquelle est réalisée l'estimation, est calée sur la sensibilité spectrale des capteurs de mesure des rayonnements servant dans ces comparaisons.

Les résultats de mesure disponibles sur le centre Inra d'Avignon sont des valeurs moyennes du rayonnement par pas de 10 minutes pour les années allant de 2004 à 2008. Elles sont calculées à partir de mesures réalisées toutes les 15 secondes. Les résultats de mesure sont exprimés en unité énergétique (W.m^{-2}) dans le domaine solaire et en unité photonique dans le domaine visible ($\mu\text{mol.m}^{-2} .\text{s}^{-1}$).

Liste des capteurs utilisés dans le domaine solaire :

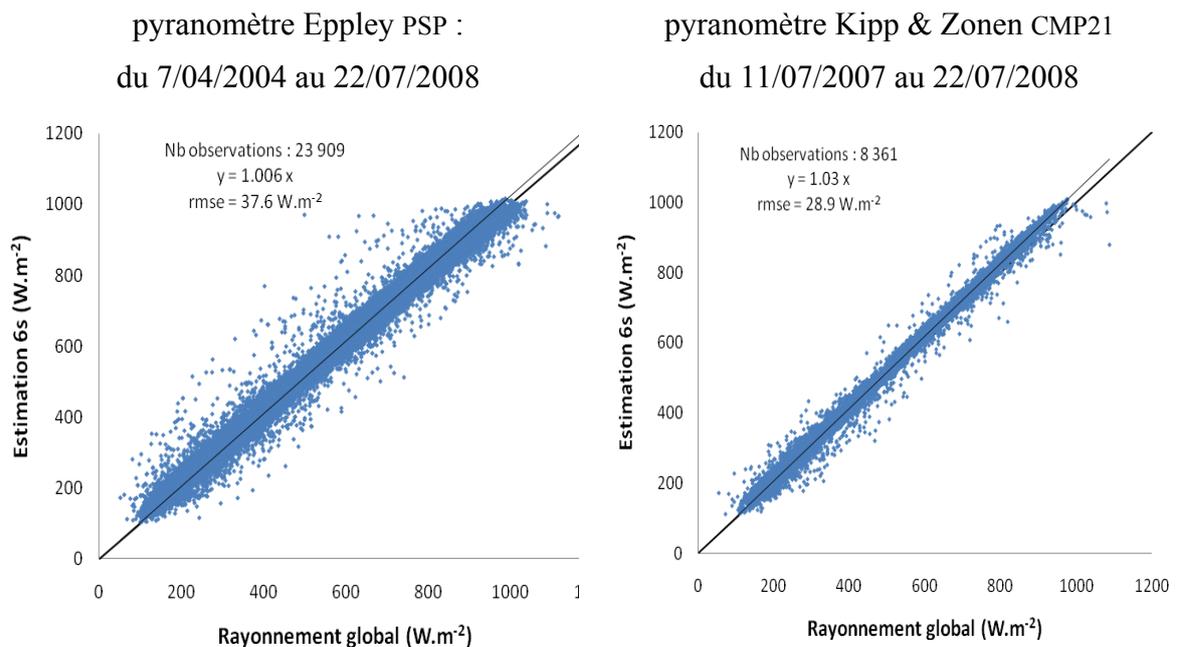
- pyranomètre Eppley PSP (sensibilité spectrale 285 - 2 800 nm, étalonné au centre radiométrique de Météo France de Carpentras) mis en place le 7/04/2004 ;
 - pyranomètre Kipp & Zonen CMP21 (sensibilité spectrale 310 - 2 800 nm, étalonné au centre radiométrique de Météo France de Carpentras) mis en place le 11/07/2007.
- L'incertitude de mesure (avec un niveau de confiance de 95 %) est inférieure à 5 % sur des cumuls journaliers dans les cas de suivi continu du rayonnement global tel qu'il est pratiqué sur notre site (en appliquant les recommandations de l'Organisation mondiale de la météorologie).

Liste des capteurs utilisés dans le domaine visible :

- quantummètre Li-Cor LI190SB (sensibilité spectrale 400 - 700 nm, étalonné par Li-Cor Inc.) mis en place le 16/10/2007. Le constructeur de ce capteur annonce une erreur relative sur la mesure inférieure à 5 % ;
- capteur d'ensoleillement delta-T BF3 (sensibilité spectrale 400 - 700 nm, étalonné par Delta-T) et mis en place le 10/11/2004. Ce capteur délivre par ailleurs une mesure de la composante diffuse du rayonnement incident. Ceci permet de calculer la fraction diffuse étant le rapport entre la composante diffuse et le rayonnement total reçu à la surface terrestre. La précision annoncée par le constructeur est de $\pm 12\%$ sur la mesure du rayonnement incident et de $\pm 15\%$ sur la mesure de la composante diffuse du rayonnement.

Les données d'épaisseur optique disponibles ont des pas de temps variables et représentent des valeurs instantanées. Afin de réaliser la comparaison, nous avons utilisé la valeur estimée à partir de l'épaisseur optique dont l'heure d'acquisition est la plus proche du centre de la période de la mesure du rayonnement (10 minutes). Seules les données dont l'angle zénithal du soleil est inférieur à 80° sont utilisées pour ces comparaisons.

Résultats dans le domaine solaire

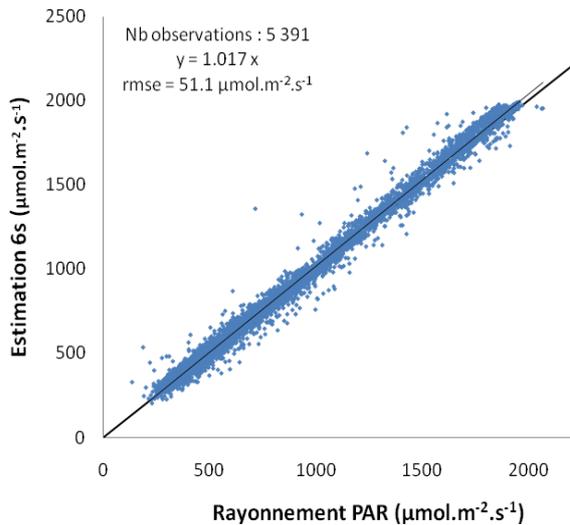


Résultats dans le domaine visible (400 – 700 nm) :

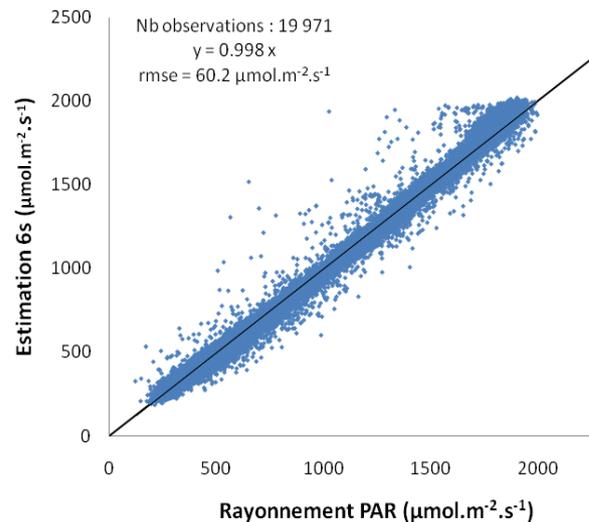
Les grandeurs de sorties de 6S étant exprimées en unité énergétique, le facteur de conversion en unité photoniques est celui défini pour des conditions de ciel clair (soleil, ciel bleu) :

$$1 \text{ W.m}^{-2} = 4,57 \text{ } \mu\text{mol.m}^{-2} \text{ .s}^{-1}.$$

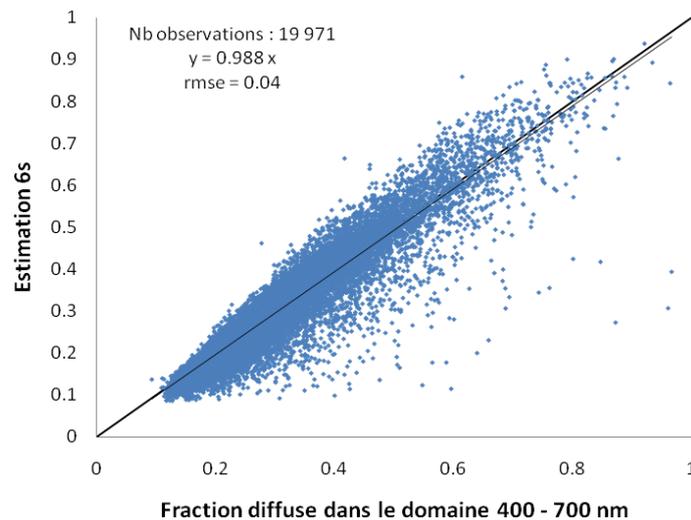
Quantum mètre Li-Cor LI-190SB :
du 16/10/2007 au 22/07/2008



Capteur d'ensoleillement Delta T BF3
du 10/11/2004 au 22/07/2008



Fraction diffuse calculée à partir des mesures délivrées par le capteur d'ensoleillement Deltat T BF3



Nous remarquons une bonne corrélation entre les estimations et les observations quel que soit le domaine spectral ainsi qu'un faible biais. La fraction diffuse dans le domaine visible est elle aussi assez bonne quoiqu'un peu plus bruitée. Compte tenu des incertitudes de mesure provenant des erreurs des instruments (de l'ordre de 5 % pour le PSP, CMP21 et LI190SB ; concernant le BF3, 12 % pour le rayonnement total et 15 % pour la mesure de la composante diffuse), de grandeurs d'influence (température) et aussi de l'entretien des capteurs (nettoyage

des salissures sur les dômes, vérification horizontalité, changement desséchant), les écarts observés et représentés par le calcul des écarts quadratiques moyens sont assez faibles. Le bruit observé provient d'une part, des différences de représentativité des données (mesures instantanées d'épaisseur optique, mesures intégrées des rayonnements, mesures pas forcément bien synchronisées) et d'autre part, des problèmes instrumentaux, conséquences soit d'erreurs de mesure, soit de salissures sur les dômes des instruments (poussières, déjections d'oiseaux). Il faut signaler tout de même que ces simulations sont réalisées pour des conditions de ciel plutôt clair (sans nuages bien définis). Le code 6S fait l'hypothèse d'une atmosphère homogène au niveau de la visibilité. Lorsque le ciel est fractionné avec des nuages bien structurés de type cumulus, les simulations sont beaucoup moins bonnes.

En conclusion, nous avons constaté sur notre site d'Avignon que le code 6S était bien adapté pour simuler le rayonnement d'origine solaire reçu à la surface du sol dans le domaine solaire et visible dans des conditions de ciel plutôt homogène (ciel non fractionné). Simple d'utilisation 6S demande peu d'entrées pour peu que l'on dispose d'un photomètre solaire du réseau AERONET à proximité. En extrapolant, nous jugeons qu'il est également utilisable pour d'autres applications en simulant le rayonnement dans d'autres bandes spectrales plus réduites du domaine solaire.

Bibliographie

Holben B.N., Eck T.F., Slutsker I., Tanré D., Buis J.P., Setzer A., Vermote E., Reagan J.A., Kaufman Y., Nakajima T., Lavenu F., Jankowiak I., (1998) AERONET-A Federated Instrument Network and Data Archive for Aerosol Characterization, Remote Sensing of the Environment, 66, 1-16.

Smirnov A., Holben B.N., Eck T.F., Dubovick O., Slutsker I. (2000) Cloudscreening and quality control algorithms for the AERONET database, Remote Sensing of the Environment, 73, 337- 349.

Vermote E.F., Tanré D., Deuzé J.L., Herman M., Morcrette J.J. (1997) Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum, 6s: An Overview. IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing. vol. 35. n°. 3.

Vermote E.F., Tanré D., Deuzé J.L., Herman M., Morcrette J.J. (1997) "Second simulation of the satellite signal in the solar spectrum (6S) - User guide version 2." University of Maryland / Laboratoire d'optique Atmosphérique / European Centre for Medium Range Weather Forecast.

Logiciel

Vermote E., Tanré D., Deuzé J.L., Herman M. Morcrette J.J. (1999) Second Simulation of the satellite signal in the solar spectrum (6S), Software, Version 4.1, Department of Geography, University of Maryland and Laboratoire d'Optique Atmosphérique, U.S.T.L.

Sites Internet

AERONET : <http://aeronet.gsfc.nas.gov/> (consulté le 9/01/2009)

Code 6S – Site du LOA : http://www-loa.univ-lille1.fr/SOFTWARE/Msixs/msixs_gb.html (consulté le 9/01/2009)

Code 6S – Site MODIS : http://modis-sr.ltdri.org/6S_code/index.html (consulté le 9/01/2009)

