



HAL
open science

Station automatique de mesures pour l'étalonnage en vol des capteurs satellitaires : application à SPOT/HRV sur le site de La Crau

Catherine Six

► **To cite this version:**

Catherine Six. Station automatique de mesures pour l'étalonnage en vol des capteurs satellitaires : application à SPOT/HRV sur le site de La Crau. Autre. Université du Littoral Côte d'Opale, 2002. Français. NNT: . tel-00003404

HAL Id: tel-00003404

<https://theses.hal.science/tel-00003404>

Submitted on 22 Sep 2003

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

N° d'ordre : ULCO 2002.10



THÈSE

Présentée par

Catherine Six

Pour l'obtention du titre de DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ

Sujet

STATION AUTOMATIQUE DE MESURES POUR L'ÉTALONNAGE EN VOL DES CAPTEURS SATELLITAIRES : APPLICATION À SPOT/HRV SUR LE SITE DE LA CRAU

Soutenue le 25 juillet 2002 devant le jury composé de

<u>Rapporteurs</u> :	M. Xavier BRIOTTET	Ingénieur, ONERA Toulouse
	M. Claude DEVAUX	Professeur, Université de Lille I
<u>Examineurs</u> :	M. François CABOT	Ingénieur, CNES Toulouse
	M. Robert FROUIN	Directeur de Recherche, Université de Californie
	M. Richard SANTER	Professeur, ULCO, Directeur de Thèse
	M. Abderrahmane TADJEDDINE	Directeur de Recherche CNRS, Université de Paris-Sud

Remerciements

Tout d'abord, je tiens à remercier Claude Devaux, professeur au LOA et Xavier Briottet, ingénieur à l'ONERA, d'avoir accepté d'être rapporteurs. Leurs questions et remarques m'ont grandement aidée à améliorer mon mémoire. Je remercie également François Cabot, du CNES, Robert Frouin, de l'Université de Californie et Abderrahmane Tadjeddine, du LURE, d'avoir accepté de faire partie du jury.

Il me faut remercier le professeur Richard Santer, pour son encadrement, ses conseils et ses remarques tout au long de ma thèse.

Merci à Jean-Claude Roger, Maître de Conférences à l'ULCO, grâce à qui mon travail s'est enrichi et amélioré. Merci à Philippe Dubuisson, Maître de conférences à l'ULCO pour ses bons conseils et ses encouragements.

Je dois une immense gratitude à Catherine Schmechtig, qui m'a précédée dans ce travail. L'accueil qu'elle a fait à mes innombrables questions et les réponses qu'elle m'a données m'ont énormément facilité la tâche.

Mille mercis à l'équipe informatique de la MREN, David Dessailly, Frédéric Lemire et Bruno Monsterleet, sans qui ce travail n'aurait pas été possible. Merci aussi à mes coéquipiers des campagnes de mesures, qui ont mené avec moi la guerre aux araignées et aux chardons, Laurent Brutier, « expert international ès Cimel », et Xavier Mériaux. Tous ont participé à ce travail et je les en remercie.

Merci à tout le monde à la MREN et en particulier à Laurence Vanparis, qui s'est occupée de toute la partie administrative précédant la soutenance, merci à Malik Chami qui a partagé son bureau (et parfois son ordinateur) avec moi, merci à Nadège Noël pour sa gentillesse, merci à Éric Lécuyer pour sa bonne humeur. Merci à mes compagnons de tarot, Manu Devred, Nadège Martiny, Didier Ramon, Régis Borde.

Merci à David et Aurélie Dessailly, qui m'ont « nourrie-logée-blanchie » à chaque fois que je revenais à Wimereux. Grâce à eux, ces retours dans le Grand Nord ont toujours été chaleureux (et gastronomiques).

Je tiens à remercier Abdou Tadjeddine, Bertrand Busson et Franck Vidal, du LURE. Leur accueil dans mon nouveau laboratoire, leurs encouragements, leur aide, leur gentillesse ont seuls rendu possible la rédaction de ce mémoire. Qu'ils en soient remerciés.

Merci à mes parents, « sans qui rien n'aurait été possible » et à Marie et Michel, et Manu et Valérie, qui ont suivi attentivement les si longues études de la petite dernière. Et bien sûr, merci à mon docteur préféré, Marc.

Et puisqu'il faut bien s'arrêter, pour finir je dirai avec Catherine, David, Laurent, Xavier et les autres : « La vie est belle... ».

INTRODUCTION	3
CHAPITRE 1. TRANSFERT RADIATIF ET ÉTALONNAGE DES CAPTEURS SPOT	5
1 SIMULATION DU SIGNAL EN HAUT DE L'ATMOSPHÈRE	5
1-1 Définitions	5
1-2 Transfert radiatif	9
1-3 Les entrées des codes pour la simulation du signal TOA	14
2 LES CAPTEURS HRV ET HRVIR	15
2-1 Caractéristiques	16
2-2 L'étalonnage, méthodes utilisées	17
CONCLUSION DU CHAPITRE	29
CHAPITRE 2. LA STATION CIMEL	30
1 LA STATION CIMEL ATMOSPHERIQUE	30
2 LA STATION CIMEL DE LA CRAU	31
2-1 Bandes spectrales	32
2-2 Mode de balayage	32
2-3 Installation	35
2-4 Transmission des données	35
3 ÉTALONNAGE	35
3-1 Étalonnage en éclairage	36
3-2 Étalonnage en luminance	42
4 IMPLANTATION SUR LE SITE	58
4-1 Le site choisi	58
4-2 Période de fonctionnement et problèmes associés	59
CONCLUSION DU CHAPITRE	71
CHAPITRE 3. LES ENTRÉES POUR LA PRÉDICTION DU SIGNAL TOA	72
1 CARACTÉRISATION DE L'ATMOSPHÈRE	72
1-1 Épaisseur optique	72
1-2 Flux diffus	72
1-3 Modèle d'aérosol	74
1-4 Vapeur d'eau	79
2 CARACTÉRISTIQUES DE LA SURFACE	87
2-1 Transformation de la luminance en réflectance	87
2-2 Le modèle de BRDF historique	87
2-3 Le modèle de BRDF de La Crau	88
CONCLUSION DU CHAPITRE	97
CHAPITRE 4. ÉTALONNAGE EN RÉFLECTANCE	98
1 MÉTHODOLOGIE	98
1-1 Comptes numériques des sites	98
1-2 Caractérisation de la surface	102
1-3 Caractérisation de l'atmosphère	107
1-4 Estimation du signal TOA	110
2 APPLICATION DE LA MÉTHODE	112
2-1 Images SPOT utilisables pour l'étalonnage	112
2-2 Conditions atmosphériques	113
2-3 Réflectance de surface	113
2-4 Résultats	114
3 BILAN D'ERREUR	115
3-1 Identification des postes d'erreurs	115
3-2 Quantification des erreurs	118
4 COMPARAISON AVEC LES AUTRES MÉTHODES	122
4-1 Comparaison avec les coefficients estimés par le CNES	122
4-2 Comparaison avec les coefficients de La Crau	124
CONCLUSION DU CHAPITRE	127

CONCLUSION	128
BIBLIOGRAPHIE.....	130
ANNEXE 1 : ÉPAISSEURS OPTIQUES MESURÉES LORS DES CAMPAGNES DE 1999 ET DU PIC DU MIDI	135
CAMPAGNE DE JUIN-JUILLET 1999 À LA CRAU	135
CAMPAGNE DE JUIN 2000 AU PIC DU MIDI	135
ANNEXE 2 : COEFFICIENTS EN ÉCLAIREMENT A_K.....	138
ANNEXE 3 : RÉFLECTANCES DU SITE DE LA CRAU, 04/07/1999.....	139

INTRODUCTION

Les satellites SPOT (Système Pour l'Observation de la Terre), dont le cinquième vient d'être lancé, sont dédiés à la cartographie et à la surveillance des ressources planétaires. Depuis le début du projet en 1975, le CNES et l'ONERA ont développé avec le soutien scientifique du LOA (Laboratoire d'Optique Atmosphérique) et de l'INRA, dans leur démarche de qualité image, différentes méthodes afin d'étalonner les capteurs embarqués, tant au sol qu'en vol (Maisonneuve *et al.*, 1980, Dinguirard *et al.*, 1980, 1996-a et b, Begni *et al.*, 1986, Henry *et al.*, 1991, 1993 et 1995, Meygret *et al.*, 1998, 1999, 2001).

Ce travail traite de l'étalonnage en vol des capteurs embarqués à bord des satellites SPOT. Il existe deux sortes d'étalonnage des capteurs satellitaires : l'étalonnage absolu et l'étalonnage relatif. L'étalonnage sur site test (Biggar *et al.*, 1991, Santer *et al.*, 1992, Slater *et al.*, 1996) entre dans la première catégorie, ainsi que l'étalonnage sur la diffusion moléculaire (Dilligeard *et al.*, 1996) et sur les sources « à bord » (Dinguirard, 1999). Dans la seconde catégorie, nous incluons l'étalonnage multitemporel, l'étalonnage inter-instrument et l'étalonnage interbande (Dinguirard, 1999). Nous nous intéressons en particulier à l'étalonnage sur site test. Cette méthode d'étalonnage consiste à prédire le signal mesuré au sommet de l'atmosphère par le capteur à partir de mesures au sol. Elle requiert donc une connaissance précise des paramètres décrivant l'état de l'atmosphère et de la surface à un instant donné. Notre objectif est d'automatiser la collecte des mesures *in situ* grâce à un prototype de radiomètre robotisé, de mettre en place les méthodes d'analyse et de valider le protocole d'étalonnage (Baklouti *et al.*, 1996, Santer *et al.*, 1997).

Dans le premier chapitre, nous définissons ces paramètres puis nous exposons la théorie du transfert radiatif que nous utiliserons pour estimer le signal au sommet de l'atmosphère. Nous présenterons ensuite les caractéristiques orbitales et instrumentales de trois satellites SPOT actuellement en orbite. Nous décrivons enfin les méthodes d'étalonnage citées ci-dessus et les campagnes de mesures nécessaires à la mise en œuvre de l'étalonnage sur site test.

Le deuxième chapitre s'intéresse à l'instrumentation employée pour effectuer les mesures de caractérisation de l'atmosphère et de la surface. Tout d'abord, nous présentons rapidement un modèle classique de radiomètre, pour arriver à la description du centre de ce travail ; la station pour l'étalonnage en vol des satellites. Nous précisons en premier lieu les différentes mesures effectuées et surtout les méthodes d'étalonnage que nous appliquons à ces mesures pour obtenir les grandeurs physiques qui nous sont nécessaires. L'une des particularités de la station est d'être entièrement étalonnée à partir des mesures sur site (Six *et al.*, 2000). Nous effectuons un bilan de cet étalonnage *in situ* de l'instrument. Les différentes étapes de l'installation de la station d'étalonnage sur le site de La Crau et les campagnes de validation de l'instrument, menées en parallèle aux campagnes d'étalonnage « classiques » des satellites seront traitées dans la partie suivante.

Dans le troisième chapitre, nous abordons la caractérisation de l'atmosphère et de la surface à partir des mesures radiométriques. Nous décrivons d'abord les méthodes de restitution des paramètres atmosphériques tels que les modèles d'aérosols, les contenus en gaz... Puis nous nous intéressons aux propriétés bidirectionnelles de la surface du site test. En particulier, nous présentons une modélisation simple de la BRDF (Bidirectional Reflection Distribution Factor).

Enfin, la méthode d'étalonnage sur le site test de La Crau et les résultats obtenus font l'objet du chapitre quatre. Après avoir décrit notre méthodologie, nous présentons les coefficients d'étalonnage de SPOT évalués à partir des mesures sur La Crau. Nous faisons ensuite un bilan d'erreur afin d'estimer la précision des coefficients ainsi obtenus, et nous les comparons aux coefficients obtenus par les autres méthodes.

CHAPITRE 1. TRANSFERT RADIATIF ET ÉTALONNAGE DES CAPTEURS SPOT

La théorie du transfert radiatif est devenue indissociable de la télédétection ; ses applications, telles que les corrections atmosphériques sont indispensables à l'utilisation de nombre de produits satellitaires. La première partie de ce chapitre expose la théorie du transfert radiatif. La seconde partie concerne de façon plus ciblée les capteurs de SPOT et leur étalonnage, c'est-à-dire la transformation des Comptes Numériques en luminance.

1 SIMULATION DU SIGNAL EN HAUT DE L'ATMOSPHÈRE

1-1 Définitions

1-1-1 Grandeurs énergétiques

Nous définissons ici les grandeurs énergétiques associées à un champ radiatif (Lenoble, 1993). Outre l'énergie que le champ transporte, nous rappelons la définition du flux, de la densité de flux et de la luminance. La réflectance est également introduite, bien qu'elle ne dépende pas uniquement du champ.

1-1-1-1 Flux, densité de flux

Un champ électromagnétique (\vec{E}, \vec{B}) ou champ radiatif transporte de l'énergie. L'énergie du champ radiatif est exprimée en fonction des champs \vec{E} et \vec{B} par le vecteur de Poynting \vec{P} :

$$\vec{P} = \vec{E} \wedge \vec{B} \quad \text{équation 1-1}$$

Le flux énergétique F (unité : W) d'un champ radiatif correspond à une énergie transportée par unité de temps.

La densité de flux Φ (unité : $W.m^{-2}$) est le flux d'énergie traversant une surface élémentaire dS (équation 1-2). Si la densité de flux est reçue, on l'appelle éclairement E . C'est la densité de flux que par la suite nous nommerons « flux ».

$$\Phi = \frac{dF}{dS} \quad \text{équation 1-2}$$

1-1-1-2 Luminance

La luminance L (unité : $\text{W.m}^{-2}.\text{sr}^{-1}$) est définie comme la densité de flux traversant la surface élémentaire dS sous l'incidence θ dans l'angle solide $d\omega$ (Figure 1-1).

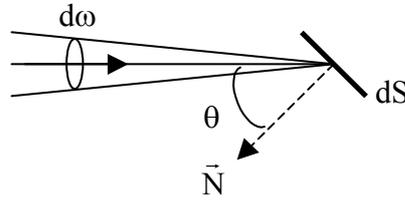


Figure 1-1 : Définition de la luminance L

Elle s'écrit donc :

$$L = \frac{d^2F}{d\omega dS \cos \theta} = \frac{d\Phi}{d\omega \cos \theta} \quad \text{équation 1-3}$$

Nous pouvons aussi exprimer la densité de flux traversant dS dans un pinceau $\Delta\omega$ en fonction de la luminance.

$$\Phi = \iint_{\Delta\omega} L \cos \theta d\omega \quad \text{équation 1-4}$$

Si nous considérons un rayonnement monochromatique, la luminance (notée dans ce cas L_λ) sera écrite sous la forme :

$$L_\lambda = \frac{dL}{d\lambda} \quad \text{équation 1-5}$$

De la même façon, seront définis le flux monochromatique, l'éclairement monochromatique...

1-1-1-3 Réflectance

La réflectance ρ est définie comme le rapport du flux Φ_r réfléchi par un milieu sur le flux Φ_i incident sur ce milieu. Si la luminance réfléchie dépend des directions d'incidence (\vec{s}_0) et de réflexion (\vec{s}), on parle alors de réflectance bidirectionnelle $\rho(\vec{s}, \vec{s}_0)$ (équation 1-6).

$$\rho(\vec{s}, \vec{s}_0) = \frac{\Phi_r(\vec{s})}{\Phi_i(\vec{s}_0)} \quad \text{équation 1-6}$$

1-1-2 Grandeurs énergétiques équivalentes

Nous définissons ici les grandeurs qui nous permettront d'explicitier les phénomènes physiques atmosphériques. Ces grandeurs sont intégrées sur les bandes spectrales des capteurs les mesurant.

1-1-2-1 Luminance équivalente

Nous noterons par la suite $s_k(\lambda)$ la sensibilité spectrale du capteur dans la bande spectrale k. L'expression de la luminance équivalente L_k dans la bande spectrale k du capteur est donnée par :

$$L_k = \frac{\int_0^{\infty} L(\lambda) s_k(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} s_k(\lambda) d\lambda} \quad \text{équation 1-7}$$

L'intérêt de cette définition est de réduire les erreurs dues à une mauvaise connaissance de la sensibilité spectrale $s_k(\lambda)$. Dans le cas d'un capteur embarqué, L_k sera la luminance montante mesurée en entrée du capteur au sommet de l'atmosphère, ou luminance Top Of Atmosphere L_k^{TOA} .

1-1-2-2 Réflectance en haut de l'atmosphère

La réflectance équivalente montante hors atmosphère ρ_k^{TOA} , ou réflectance TOA est définie par :

$$L_k^{\text{TOA}} = \frac{\rho_k^{\text{TOA}} E_{sk}}{\pi d^2} \cos(\theta_s) \quad \text{équation 1-8}$$

avec d la distance Terre-Soleil (en U.A.), E_{sk} est l'éclairement solaire (hors atmosphère) équivalent défini par :

$$E_{sk} = \frac{\int_0^{\infty} E_s(\lambda) s_k(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} s_k(\lambda) d\lambda} \quad \text{équation 1-9}$$

La réflectance ρ_k^{TOA} est la réflectance moyenne observée :

$$\rho_k^{\text{TOA}} = \frac{\int_0^{\infty} \rho^{\text{TOA}}(\lambda) E_s(\lambda) s_k(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} E_s(\lambda) s_k(\lambda) d\lambda} \quad \text{équation 1-10}$$

Nous définissons de manière analogue la réflectance de surface à partir d'une luminance équivalente au sol ainsi qu'un flux incident équivalent.

1-1-3 Grandeurs géométriques

Définissons les différents angles que nous allons utiliser dans le cadre du système « Soleil-Terre-capteur » (Figure 1-2) :

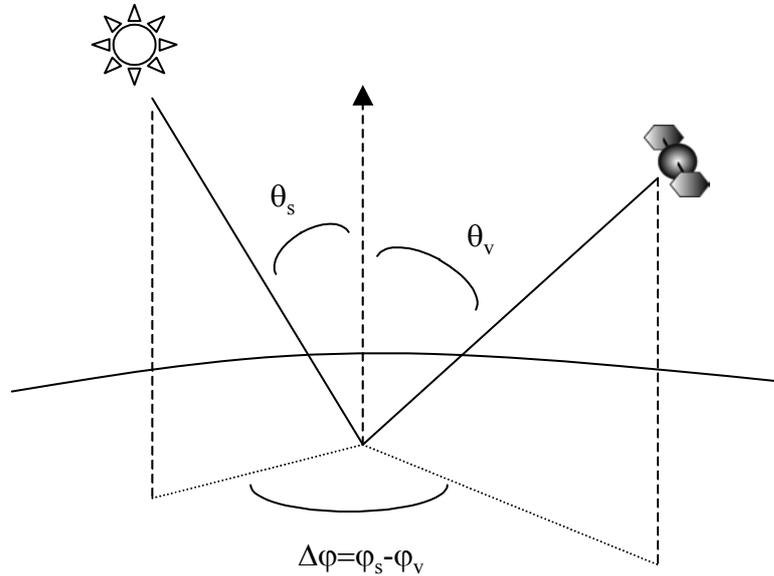


Figure 1-2 : Représentation des angles définissant la position du soleil et du capteur

Avec les notations suivantes :

- angles de visée du satellite ou de l'instrument : angle zénithal de visée θ_v , angle azimutal de visée φ_v ,
- position du soleil : angle zénithal solaire θ_s , angle azimutal solaire φ_s . Ces deux angles peuvent être calculés grâce à l'équation du temps, en fonction de l'heure TU, de la latitude et de la longitude du lieu considéré.

On emploie généralement les cosinus des angles zénithaux θ_s et θ_v :

$$\begin{aligned}\mu_s &= \cos \theta_s \\ \mu_v &= \cos \theta_v\end{aligned}$$

La masse d'air m , sur le trajet descendant, est calculée, pour $\theta_s < 75^\circ$, par :

$$m = \frac{1}{\mu_s} = \frac{1}{\cos \theta_s} \quad \text{équation 1-11}$$

Nous définissons ensuite l'angle de diffusion Θ comme étant l'angle entre la direction du faisceau incident et la direction du faisceau diffusé par une particule (molécule, aérosol...) (Figure 1-3).

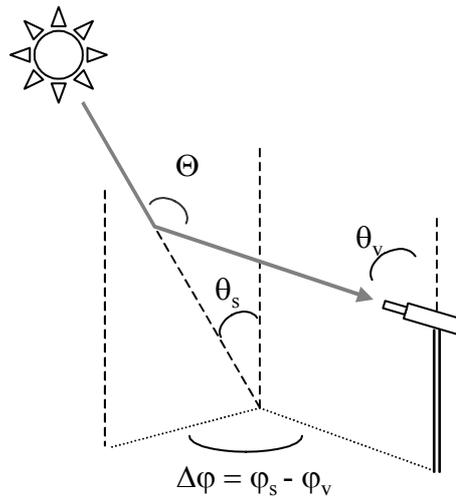


Figure 1-3 : Définition de l'angle de diffusion

Un calcul simple donne l'expression de Θ en fonction des angles θ_s , θ_v et $\Delta\varphi = \varphi_s - \varphi_v$ (équation 1-12).

$$\cos(\Theta) = \cos(\theta_s)\cos(\theta_v) + \sin(\theta_s)\sin(\theta_v)\cos(\Delta\varphi) \quad \text{équation 1-12}$$

Dans la convention de 6S (Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum, Vermote *et al.* 1997) $\Delta\varphi$ vaut 180° en diffusion avant et 0° en rétrodiffusion, au contraire de la convention des Ordres Successifs de diffusion (Deuzé *et al.*, 1989).

1-2 Transfert radiatif

1-2-1 Propriétés optiques de l'atmosphère

1-2-1-1 Définitions

Dans cette partie seront décrits les différents phénomènes que subit la lumière du soleil lors de son passage dans l'atmosphère terrestre ainsi que leur modélisation (Deschamps *et al.* 1983). Ces phénomènes sont l'absorption et la diffusion par les molécules et les aérosols. Ils sont regroupés sous le terme d'extinction.

La loi de Lambert pour l'extinction sur un trajet dz est la suivante :

$$dE = -K_{\text{ext}} E dz \quad \text{équation 1-13}$$

K_{ext} (en m^{-1}) est le coefficient d'extinction du milieu considéré.

La transmission directe monochromatique T_D sur le trajet atmosphérique vertical s'écrit donc :

$$T_D = \exp\left(-\int_{\text{sol}}^{\infty} K_{\text{ext}} dz\right) \quad \text{équation 1-14}$$

La définition de l'épaisseur optique en découle :

$$\tau_T = \int_{\text{sol}}^{\infty} K_{\text{ext}}(z) dz \quad \text{équation 1-15}$$

Nous avons dit plus haut que les phénomènes que subit la lumière dans l'atmosphère sont la diffusion et l'absorption par les aérosols et les molécules. Il faut donc définir quatre coefficients d'extinction, et les épaisseurs optiques correspondantes :

- Le coefficient de diffusion moléculaire et l'épaisseur optique de diffusion moléculaire :

$$dL_m^{\text{diff}} = -\sigma_m(z) L dz, \quad \tau_m^{\text{diff}} = \int_{\text{sol}}^{\infty} \sigma_m(z) dz \quad \text{équation 1-16}$$

- Le coefficient de diffusion par les aérosols :

$$dL_a^{\text{diff}} = -\sigma_a(z) L dz, \quad \tau_a^{\text{diff}} = \int_{\text{sol}}^{\infty} \sigma_a(z) dz \quad \text{équation 1-17}$$

- Le coefficient d'absorption (gazeuse) moléculaire :

$$dL_m^{\text{abs}} = -K_m(z) L dz, \quad \tau_m^{\text{abs}} = \int_{\text{sol}}^{\infty} K_m(z) dz \quad \text{équation 1-18}$$

- Le coefficient d'absorption par les aérosols :

$$dL_a^{\text{abs}} = -K_a(z) L dz, \quad \tau_a^{\text{abs}} = \int_{\text{sol}}^{\infty} K_a(z) dz \quad \text{équation 1-19}$$

Cependant, pour les aérosols, nous utiliserons l'épaisseur optique totale de diffusion et d'absorption : $\tau_a = \tau_a^{\text{abs}} + \tau_a^{\text{diff}}$. L'épaisseur optique totale τ sera définie comme l'épaisseur optique totale hors absorption gazeuse. Il est également important de définir l'albédo de simple diffusion des aérosols :

$$\omega_0 = \frac{\sigma_a}{\sigma_a + K_a} \quad \text{équation 1-20}$$

1-2-1-2 Transmission gazeuse

La transmission gazeuse varie beaucoup en fonction de la longueur d'onde. L'expression de la transmission gazeuse en fonction du coefficient d'absorption moléculaire est donnée par (Deschamps *et al.*, 1983) :+

$$T_{\text{gaz}} = \frac{\int_0^{\infty} \exp\left(-m \int_{\text{sol}}^{\infty} K_{\text{ext}}(\lambda, z) dz\right) s_k(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} s_k(\lambda) d\lambda} \quad \text{équation 1-21}$$

Elle est calculée avec un modèle, à partir de données telles que les quantités de gaz présentes dans l'atmosphère. Plusieurs modèles sont disponibles : modèle raie par raie (Dubuisson *et al.*, 1996), modèle de Malkmus (Malkmus, 1967), Goody (Goody, 1964)

1-2-1-3 Diffusion moléculaire

La diffusion moléculaire, ou diffusion Rayleigh, correspond à l'interaction des photons avec les molécules. Le coefficient d'extinction de la diffusion Rayleigh s'écrit :

$$\sigma_m = \frac{32 \pi^3}{3 \lambda^4} (n_{\text{STP}} - 1)^2 \frac{1}{N_{\text{STP}}} \frac{6 + 3\delta}{6 - 7\delta} \quad \text{équation 1-22}$$

avec δ le facteur de dépolarisation ($\delta=0,0279$), N_{STP} est le nombre de molécules par unité de volume, n_{STP} l'indice de l'air.

L'épaisseur optique Rayleigh $\tau_R = \tau_m^{\text{diff}}$ en découle :

$$\tau_R = \frac{8\pi^3}{3N_{\text{STP}} \lambda^4} \frac{6 + 3\delta}{6 - 7\delta} \frac{T_{\text{STP}}}{P_{\text{STP}}} (n_{\text{STP}}^2 - 1)^2 \int_{\text{sol}}^{\infty} \frac{P(z)}{T(z)} dz \quad \text{équation 1-23}$$

où $P(z)$ et $T(z)$ sont respectivement la pression atmosphérique et la température à l'altitude z et P_{STP} et T_{STP} la pression et la température dans les conditions standards (Bucholtz, 1995, Bréon 1998, Bucholtz 1998).

La dépendance de l'épaisseur optique en λ^{-4} implique une plus grande influence de la diffusion Rayleigh aux courtes longueurs d'onde, qui devient négligeable aux plus grandes longueurs d'onde.

Lors d'une diffusion, le rayonnement incident est dévié dans une autre direction (sans changement de la longueur d'onde). La probabilité $P_R(\Theta)$ (appelée fonction de phase de diffusion moléculaire) que le photon soit dévié dans la direction Θ (Figure 1-3) s'écrit pour la diffusion Rayleigh :

$$P_R(\Theta) = \frac{2(1-\delta)}{2+\delta} (1 + \cos^2 \Theta) + \frac{3\delta}{2+\delta} \quad \text{équation 1-24}$$

1-2-1-4 Diffusion par les aérosols

Les aérosols sont des particules dont la taille est comprise entre 0,01 et 20 μm . Ces particules proviennent essentiellement du sol et de l'océan. L'atmosphère contient également des cendres (volcans, feux de forêt), des particules d'origine humaine, des pollens... Interviennent aussi les processus de condensation et les réactions chimiques.

Si nous considérons des aérosols sphériques et homogènes, alors la diffusion par les aérosols suit la théorie de Mie qui décrit la diffusion du rayonnement électromagnétique par les particules. La fonction de phase de diffusion $P_a(\Theta)$, les coefficients de diffusion et d'absorption σ_a et K_a dépendent de l'indice de réfraction et de la granulométrie des aérosols. Si la particule est absorbante, l'indice de réfraction est imaginaire et s'écrit $m + ik$, avec k négatif.

Granulométrie

La granulométrie $n(r)$ représente la distribution en taille des aérosols : le nombre de particules de rayon compris entre r et $(r + dr)$ est $n(r)dr$. Plusieurs lois existent pour formuler la granulométrie, nous utiliserons ici la distribution de Junge :

$$\begin{aligned} n(r) &= C \cdot r_0^{-v} && \text{pour } r_{\min} < r < r_0 \\ n(r) &= C \cdot r^{-v} && \text{pour } r_0 < r < r_{\max} \end{aligned} \quad \text{équation 1-25}$$

Le paramètre ajustable v , ou paramètre de Junge est lié au coefficient d'Angström α qui exprime la dépendance spectrale de l'épaisseur optique aérosol :

$$\frac{\tau_a(\lambda)}{\tau_a(\lambda')} = \left(\frac{\lambda}{\lambda'} \right)^{-\alpha} \quad \text{équation 1-26}$$

avec α positif en général.

Nous avons alors :

$$v = \alpha + 3 \quad \text{équation 1-27}$$

La loi de Junge a l'avantage de la simplicité. Les rayons r_{\min} et r_{\max} sont fixés de telle sorte que leurs valeurs ne modifient pas la restitution des propriétés optiques des aérosols : ils définissent un modèle optiquement équivalent jugé suffisant pour notre travail.

1-2-2 Découplage absorption-diffusion

L'absorption gazeuse induit quelques difficultés dans les calculs de transfert radiatif. En effet, les transmissions gazeuses devraient théoriquement être calculées sur *chaque trajet* suivi par la lumière. Cependant, le problème peut être contourné : on peut séparer géométriquement ou spectralement l'absorption gazeuse de la diffusion (Deschamps *et al.*, 1983).

Géométriquement, l'ozone se trouve à haute altitude, où les diffuseurs (aérosols et molécules) sont rares. La diffusion y est donc très faible.

Spectralement, les bandes d'absorption de la vapeur d'eau et du gaz carbonique sont situées à des longueurs d'onde pour lesquelles la diffusion moléculaire devient négligeable. La diffusion par les aérosols étant plus importante en pointe avant, on peut considérer que les trajets lumineux sont peu différents du trajet direct.

L'oxygène, dont l'influence se retrouve principalement vers 750 nm, pourra être négligé, ainsi que le méthane.

Finalement, nous considérerons que la transmission totale gazeuse t_g s'écrit comme le produit des transmissions de chaque gaz $t_{g,i}$:

$$t_g(\theta_s, \theta_v) = \prod_i t_{g,i}(\theta_s, \theta_v) \quad \text{équation 1-28}$$

Nous utiliserons le code 6S (Vermote et al., 1997) pour la calculer.

1-2-3 Équation de transfert radiatif

Dans l'approximation plan-parallèle, l'atmosphère est divisée en couches planes et parallèles. Pour une atmosphère « plan-parallèle » diffusante et non absorbante, caractérisée par un albédo de simple diffusion ω_0 , une fonction de phase P et une épaisseur optique τ , l'équation de transfert radiatif s'écrit (Lenoble,) :

$$\begin{aligned} \mu \frac{d\tilde{L}(\tau, \mu, \varphi)}{d\tau} = & \tilde{L}(\tau, \mu, \varphi) \\ & - \frac{\omega_0}{4\pi} \tilde{P}(\tau, \mu, \varphi, \mu_s, \varphi_s) \tilde{E}_s e^{-\frac{\tau}{\mu_s}} \\ & - \frac{\omega_0}{4\pi} \int_0^1 \int_{-1}^1 \tilde{P}(\tau, \mu, \varphi, \mu', \varphi') \tilde{L}(\tau, \mu', \varphi') d\mu' d\varphi' \end{aligned} \quad \text{équation 1-29}$$

Avec \tilde{L} le vecteur de Stokes de composantes (L, Q, U, V) et \tilde{E}_s le vecteur de composantes ($E_s, 0, 0, 0$).

Le deuxième terme du membre de droite de l'équation 1-29 représente la contribution de la diffusion primaire, le troisième la contribution des diffusions multiples.

1-2-4 Calcul de la diffusion

L'équation du transfert radiatif ne peut être résolue analytiquement. Il existe cependant plusieurs méthodes de résolution numérique, celle que nous utilisons est la méthode des Ordres Successifs de diffusion (Deuzé *et al.*, 1988). Dans cette méthode, les photons sont suivis à chaque diffusion. L'équation de transfert est d'abord décomposée en série de Fourier en fonction de l'azimut relatif $\Delta\varphi$ (équation 1-30).

$$L(\tau, \mu, \varphi) = \sum_{s=0}^N (2 - \tau_{0,s}) L^s(\tau, \mu) \cos(s \times \Delta\varphi) \quad \text{équation 1-30}$$

En diffusion primaire, la source est le Soleil. La luminance TOA s'écrit à l'ordre s :

$$L_s^{(1)}(0, \mu_v) = \frac{E_0}{2\mu_v} \int_0^\tau \exp\left(-t \left(\frac{1}{\mu_s} + \frac{1}{\mu_v}\right)\right) P^{(s)}(t, \mu_s, \mu_v) dt \quad \text{équation 1-31}$$

L'atmosphère est discrétisée en 26 couches élémentaires. À un ordre de diffusion n , la source est la luminance d'ordre $n-1$:

$$L_s^{(n)}(0, \mu_v) = \frac{1}{2} \int_0^1 \int_{-1}^1 e^{-t/\mu_v} P(t, \mu_v, \mu) L^{(n-1)}(t, \mu_v, \mu) d\mu dt \quad \text{équation 1-32}$$

Les éléments de la matrice de diffusion \tilde{P} sont décomposés en polynômes de Legendre, pour la diffusion Rayleigh l'ordre du développement est typiquement de 2, il atteint 80 pour la diffusion par les aérosols.

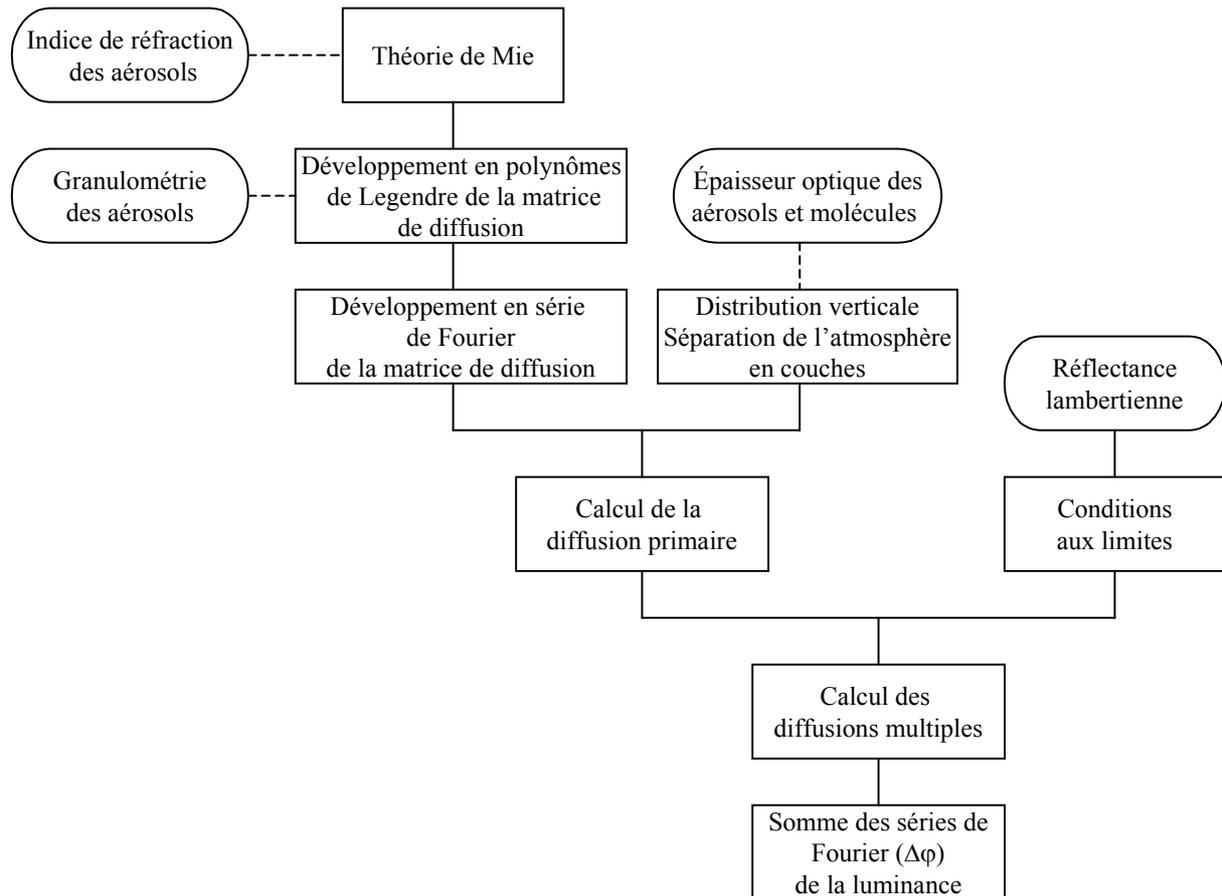


Figure 1-4 : Étapes de calcul dans les Ordres Successifs

1-3 Les entrées des codes pour la simulation du signal TOA

Les codes que nous venons de décrire permettent de simuler le signal TOA à partir de certaines données, relatives à la diffusion Rayleigh, la diffusion par les aérosols, à l'absorption dans l'atmosphère et à la réflectance de surface. Ces données proviennent soit de mesures sur le site, soit sont des données météorologiques.

1-3-1 Diffusion moléculaire

Ainsi que nous l'avons écrit (équation 1-23), l'épaisseur optique de diffusion moléculaire dépend du profil vertical de température et de pression. Cependant, dans l'hypothèse de l'équilibre hydrostatique, nous pouvons écrire :

$$\tau_R = \frac{32 \pi}{34 \lambda^4} \frac{6 + 3 \delta}{6 - 7 \delta} \frac{R^2}{N_A M g} \frac{T_{STP}}{P_{STP}^2} (n_{air} - 1) P_s \quad \text{équation 1-33}$$

avec N_A le nombre d'Avogadro, R la constante des gaz parfaits, M la masse moléculaire de l'air et g l'accélération de la pesanteur, T_{STP} et P_{STP} la température et la pression standards de l'air.

La connaissance des profils de température et de pression n'est alors plus nécessaire, il suffit de connaître la pression atmosphérique de surface P_s pour déterminer τ_R . Elle peut être connue grâce à des données météorologiques. Cependant, si même cette donnée manque, on peut utiliser une valeur constante climatologique de la pression de surface pour l'été ; $P_s^{été}$, et une pour l'hiver ; P_s^{hiver} . On verra dans les bilans d'erreur l'influence de cette approximation.

1-3-2 Quels modèles d'aérosol ?

Le choix *a priori* du modèle de Junge pour décrire les aérosols est à justifier expérimentalement. De même, l'indice de réfraction sera déterminé à partir des mesures.

1-3-3 Les gaz

1-3-3-1 Ozone

La quantité d'ozone présente dans l'atmosphère est une donnée météorologique. Elle est connue en fonction de la saison et du lieu. Le tableau suivant (Tableau 1-1) donne les valeurs de l'épaisseur optique de l'ozone, intégrées dans les bandes de SPOT4. On pourra se référer au § 2-1-3 et à la Figure 1-5 pour la définition des bandes de SPOT4.

Tableau 1-1 : Valeurs de l'épaisseur optique d'absorption de l'ozone le 29/06 à 10h30 TU (modèle Midlatitude Summer) dans les bandes de SPOT4 (HRVIR1)

Bande SPOT4	B1	B2	B3	MIR
Épaisseur optique de l'ozone	0,027	0,021	≈0,000	0,000

1-3-3-2 Vapeur d'eau

La transmission de la vapeur d'eau est déduite des mesures effectuées sur le site. La transmission s'écrit de façon générale (Haltore *et al.*, 1997) :

$$T_{H_2O} = e^{-a(mU_{H_2O})^b} \quad \text{équation 1-34}$$

Il faut déterminer les coefficients a et b en fonction des paramètres instrumentaux, tels que la largeur à mi-hauteur du filtre considéré et sa longueur d'onde centrale.

2 LES CAPTEURS HRV ET HRVIR

Cinq satellites SPOT ont été lancés jusqu'à présent : SPOT1 lancé le 26 février 1986, SPOT2 lancé le 22 janvier 1990, SPOT3 le 26 septembre 1993, SPOT4 lancé le 20 mars 1998 et SPOT5 en 2002. Quatre sont en fonctionnement ; la défection de SPOT3 en fin 1996 a amené la remise en service de SPOT1 en janvier 1997. SPOT1, 2 et 3 sont équipés de capteurs dits HRV, pour Haute Résolution Visible, SPOT4 de capteurs HRVIR pour Haute Résolution Visible et

InfraRouge et d'un radiomètre grand champ appelé VÉGÉTATION. SPOT5 diffère de ses prédécesseurs, entre autres par ses caméras permettant une vue stéréoscopique.

2-1 Caractéristiques

2-1-1 Orbitographie

L'orbite des satellites SPOT est héliosynchrone et quasi polaire (nœud descendant à 10h30 en temps local). Ils se trouvent à une altitude de 822 km et ont un cycle de 26 jours.

2-1-2 Répétitivité

Les miroirs de SPOT permettent une inclinaison de $\pm 27^\circ$ par rapport au nadir, perpendiculairement à la trace et le champ de visée est d'environ 4 degrés (60 kilomètres au sol) (Henry *et al.*, 2001). Ceci permet une répétitivité des mesures d'environ trois jours.

2-1-3 Bandes spectrales

SPOT1 et SPOT2 comportent deux caméras, HRV1 et HRV2, avec chacune leur système de filtres. Deux modes d'observation sont utilisés :

- le mode multispectral, qui comprend les bandes B1 (510 à 610 nm), B2 (610 à 680 nm) et B3 (790 à 890 nm), utilise 3000 détecteurs CCD et a une résolution au sol de 20 mètres
- le mode panchromatique, qui comprend une unique bande (510 à 730 nm), utilise 6000 détecteurs CCD et a une résolution au sol de 10 mètres.

SPOT4 dispose de deux caméras HRVIR et du radiomètre Végétation. Les deux caméras HRVIR utilisent quatre canaux : B1, B2 et B3, semblables à ceux de SPOT1 et 2, et d'un quatrième canal, MIR (pour Mid Infra-Red). Végétation a quatre canaux : B2, B3, MIR, plus un canal B0 centré à 450 nm.

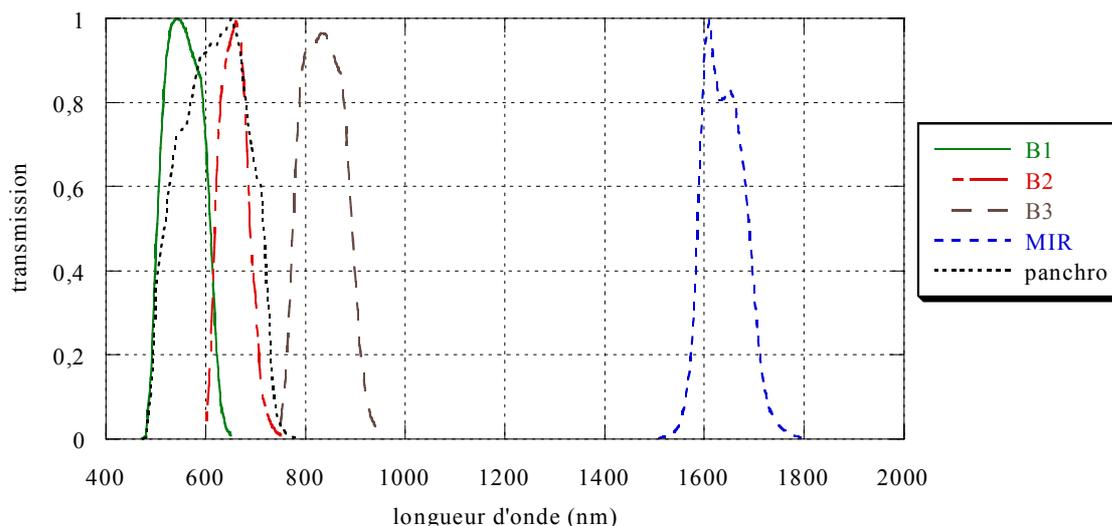


Figure 1-5 : Transmission des bandes de HRVIR1-SPOT4 et de la bande panchromatique de HRV1-SPOT1

La figure précédente (Figure 1-5) représente la transmission des quatre canaux de HRVIR1 sur SPOT4 (Meygret *et al.*, 1999).

2-2 L'étalonnage, méthodes utilisées

Plusieurs méthodes sont employées pour l'étalonnage de SPOT. Certaines fournissent une valeur absolue du coefficient, les autres donnent sa variation temporelle. On utilise aussi l'inter-étalonnage, qui consiste à évaluer le rapport du coefficient d'une caméra à celui d'une autre, qu'elles soient sur la même plate-forme ou sur deux plate-formes différentes.

Le coefficient d'étalonnage absolu A_k (en $CN/(W.m^{-2}.sr^{-1}.\mu m^{-1})$) de la bande spectrale k est défini par :

$$x_{ijmk} = A_k G_m g_{ij} L_{ijk} + C_{ijm} + \varepsilon_{ijk} \quad \text{équation 1-35}$$

où :

- x_{ijmk} est la sortie numérique (en comptes numériques CN) de chaque pixel (i,j) dans la bande spectrale k pour un gain m
- L_{ijk} est la luminance équivalente du point observé au sol
- G_m est le gain de la chaîne d'amplification, $G_m = (1,3)^{m-3}$, $m = 1$ à 8 pour SPOT1 à 3, et $G_m = (1,5)^{m-2}$, $m = 1$ à 6 pour SPOT4
- g_{ij} est la sensibilité relative du pixel j
- C_{ijm} est le signal d'obscurité
- ε_{ijk} est le bruit résiduel

Les termes g_{jk} sont obtenus en mesurant une scène spatialement homogène (sphère intégrante de grande dimension, ou calotte polaire, déserts...), les C_{jkm} sont mesurés en occultant le télescope.

Après égalisation (correction de la sensibilité différentielle des pixels et du signal d'obscurité), on exprime le pixel image corrigé X_{ijmk} (image de niveau 1A) :

$$X_{ijmk} = \frac{x_{ijmk} - C_{ijm}}{g_{ij}} = A_k G_m L_{ijk} + E_{ij} \quad \text{équation 1-36}$$

où E_{ij} est le terme de bruit.

2-2-1 Étalonnage embarqué

À bord de SPOT se trouvent deux systèmes d'étalonnage (Maisonneuve *et al.* 1980) ; une lampe à filament de tungstène, dite « lampe-bord » et un système de fibres optiques permettant de diriger l'éclairage solaire sur les capteurs.

2-2-1-1 Lampe : étalonnage multitemporel

La lampe-bord permet d'évaluer la variation de $A_k(t)/A_k(t_0)$; il s'agit de l'étalonnage *multitemporel*. Les mesures, effectuées une fois par mois, donnent la courbe d'évolution des coefficients, que l'on recale en utilisant les coefficients absolus obtenus par d'autres méthodes (Dinguirard *et al.*, 1998). La question se pose cependant de la stabilité de la lampe-bord, car rien ne permettrait de distinguer son vieillissement de celui des optiques et des capteurs.

2-2-1-2 Fibres optiques

Un second système d'étalonnage (Dinguirard *et al.* 1980) se trouve à bord de SPOT, constitué de 48 fibres optiques projetant l'éclairement solaire hors atmosphère sur les détecteurs. La luminance ainsi mesurée par les détecteurs s'écrit :

$$L_k = \frac{1}{\Omega_k} \frac{\int_0^{\infty} E_{sk}(\lambda) T_F(\lambda) s_k(\lambda) d\lambda}{d^2 \int_0^{\infty} s_k(\lambda) d\lambda} \quad \text{équation 1-37}$$

où :

- Ω_k est un paramètre permettant de convertir l'éclairement reçu par la fibre en luminance. Il est mesuré pour chaque bande spectrale, bien qu'en principe indépendant de la longueur d'onde.
- T_F est la transmission spectrale de la fibre F.

Ces deux paramètres ont été mesurés avant le tir pour toutes les bandes sauf la bande B3, la mesure y étant impossible (caractérisation par une lampe au xénon).

Ce système d'étalonnage est donc partiel, puisqu'il ne fonctionne pas pour toutes les bandes. De plus, l'évolution de la transmission du système après tir n'est pas connue, il n'est donc pas possible de distinguer le vieillissement des fibres de celui des caméras. D'autres méthodes d'étalonnage absolu sont donc nécessaires.

2-2-2 Étalonnage sur les nuages et sur le glitter

L'utilisation des nuages tropicaux de haute altitude est une source d'étalonnage potentielle, si l'on considère qu'ils ont une réflectance spectralement plate, et que les corrections atmosphériques seront faibles. Cependant, cette méthode n'est pas bien adaptée à l'étalonnage de SPOT, à cause d'un problème de saturation du système (Meygret *et al.*, 1999).

L'étalonnage sur le glitter, utilisable surtout pour les capteurs grand champ comme Végétation permet de calculer les coefficients grâce à une visée directe de la réflexion spéculaire sur la mer.

2-2-3 Intercomparaison entre les capteurs

2-2-3-1 Interétalonnage HRV2/HRV1

Afin de réaliser l'intercomparaison entre les capteurs HRV, ceux-ci prennent simultanément une image de la même scène. Le rapport des coefficients A_k^{HRV2}/A_k^{HRV1} est évalué par recalage des histogrammes de différentes scènes de réponses spectrales diverses. L'évolution temporelle du rapport A_k^{HRV2}/A_k^{HRV1} permet alors de valider l'hypothèse de la stabilité de la lampe-bord.

2-2-3-2 Interétalonnage Végétation/HRVIR

Comme pour l'étalonnage inter HRV2/HRV1, les deux instruments Végétation et HRVIR prennent une image presque simultanément de la même scène, permettant d'évaluer $A_k^{HRVIR1}/A_k^{VEGETATION}$. Cette comparaison, possible uniquement sur SPOT4, permet de répercuter sur les coefficients HRVIR l'étalonnage sur le glitter de Végétation

2-2-3-3 Interétalonnage entre différentes plates-formes

Seuls les déserts sont utilisés pour l'étalonnage inter-SPOT, car les visées ne sont pas simultanées, il faut donc des sites très stables temporellement. Il est également nécessaire de prendre en compte les effets directionnels et la dépendance spectrale de la réflectance de surface. Il est en effet indispensable d'éliminer les biais dus aux différences de sensibilité spectrale des différentes versions de SPOT. Les résultats de cet interétalonnage sont en bon accord avec ceux de la lampe-bord.

2-2-4 Étalonnage sur la diffusion Rayleigh

Pour des capteurs grand champ comme Végétation, mais également pour les capteurs HRV, on utilise l'étalonnage sur la diffusion moléculaire (Vermote *et al.*, 1992, Briottet *et al.* 1997, Parada, 1997). Le principe est de viser des zones de mer (avec une faible concentration en pigments), en maximisant les trajets soleil-surface-capteur, sans toutefois se placer en réflexion spéculaire. Le signal mesuré dans les bandes B1 et B2 est alors principalement dû à la diffusion Rayleigh. Le signal provenant des aérosols est évalué dans la bande B3, où la diffusion Rayleigh est négligeable et la réflectance de surface proche de 0. La réflectance marine dépend de la concentration en chlorophylle et la luminance de l'écume dépend de la vitesse du vent (données ECMWF). On obtient donc à partir de données météorologiques (vitesse du vent, contenu en vapeur d'eau, ozone...) les coefficients d'étalonnage absolu, avec une précision de 2,9 et 4,1 % au mieux dans les bandes B1 et B2 (Dilligeard *et al.*, 1996). Pour SPOT4, la dispersion sur les coefficients est de 2,5% pour B1 et 3% pour B2 (Meygret *et al.*, 1999). Cette méthode présente cependant l'inconvénient de requérir un ciel dégagé au-dessus de l'océan, ce qui est peu fréquent (quatre mesures en sept mois pour SPOT4). L'avantage de cette méthode est de pouvoir être appliquée systématiquement sur les zones choisies.

2-2-5 Étalonnage multitemporel sur sites désertiques

Plusieurs zones désertiques ont été reconnues pour leur grande stabilité temporelle, tant au niveau de la réflectance de surface qu'au niveau de l'atmosphère (Holben *et al.* 1990, Kaufman *et al.* 1993), et leur BRDF a été modélisée grâce à des images SPOT et LANDSAT (Cosnefroy *et al.* 1996). On évalue ainsi la perte de sensibilité des capteurs, ce qui permet également de valider l'hypothèse de la stabilité de la lampe-bord.

2-2-6 Étalonnage sur sites test

Deux méthodes sont appliquées pour l'étalonnage sur site test. La première, dite « méthode en réflectance » (Slater *et al.* 1987, et 1996, Dinguirard *et al.*, 1999) s'effectue de la façon suivante : le capteur prend une image du site choisi. Simultanément, des mesures sont faites au sol afin de caractériser la réflectance bidirectionnelle de surface et les propriétés optiques de l'atmosphère. La luminance TOA est alors prédite à partir de ces mesures, à l'aide de modèles de transfert radiatif. Le coefficient d'étalonnage est ensuite calculé en faisant le rapport des comptes numériques moyennés sur la surface du site et du signal TOA. Une méthode en réflectance améliorée par la mesure du rapport de l'éclairement diffus à l'éclairement total a été mise au point et testée sur le site de White Sands (Biggar *et al.*, 1991, Dinguirard *et al.*, 1999).

La seconde méthode, dite « méthode en luminance » (Slater *et al.* 1996) consiste en la mesure de la luminance montante du site en altitude (3000 m environ, donc au-dessus de la contribution des aérosols). Cette luminance est ensuite corrigée des effets atmosphériques restants pour obtenir la luminance TOA.

Plusieurs conditions déterminent le choix des sites test. Tout d'abord, ils doivent avoir une faible couverture nuageuse afin de permettre les visées du capteur, leur surface doit ensuite être homogène spatialement, et enfin leur réflectance doit être élevée et la plus proche possible d'une réflectance lambertienne. Deux sites ont ainsi été choisis, White Sands au Nouveau Mexique, États-Unis, et La Crau, dans le sud de la France.

2-2-6-1 White Sands

Les premières campagnes d'étalonnage sur site test ont été effectuées à White Sands. Ce site est en effet quasiment idéal : composé de sable blanc, sa réflectance est très importante ; 45 à 48 % à 550 nm (Begni *et al.* 1986), ce qui minimise l'impact des effets atmosphériques. L'altitude (1200 m) du site a également pour conséquence de réduire les effets atmosphériques, puisque la couche d'atmosphère traversée est moins grande. Enfin, le site est relativement homogène et ne s'éloigne pas trop du réflecteur lambertien.

2-2-6-2 La Crau

Un second site test a été choisi pour l'étalonnage absolu, il s'agit de la plaine de La Crau, située dans le sud de la France (Bouches-du-Rhône), entre Arles et Salon de Provence. C'est une plaine sèche, avec peu de végétation et beaucoup de cailloux. Du point de vue homogénéité spatiale et accessibilité, il s'agit du meilleur site test que l'on puisse trouver en France. Contrairement au site de White Sands, cependant, la caractérisation de la surface (BRDF) et de l'atmosphère (aérosols...) demandera la plus grande précision.

2-2-2-3 Précision attendue

La précision attendue pour ces coefficients est évaluée à 4,9% (méthode en réflectance) et 2,8% (méthode en luminance) pour White Sands (Dinguirard *et al.*, 1999), et 4% (B1 et B2) et 3% (B3) (méthode en réflectance) à La Crau (Santer *et al.* 1997-b).

Pour White Sands, les postes d'erreur identifiés sont les suivants ; réflectance de surface, épaisseur optique, absorption, aérosols, distribution verticale, sol non lambertien, précision du code, valeur de μ_s .

Pour La Crau, les postes d'erreur sont la valeur de μ_s , la pression de surface, la sensibilité spectrale des capteurs (en particulier de B2), la quantité de vapeur d'eau et d'ozone, les aérosols (épaisseur optique, indice de réfraction, paramètre de Junge), la réflectance de surface (BRDF et inhomogénéités de la surface) et les comptes numériques SPOT.

Le Tableau 1-2 donne l'écart moyen entre les coefficients estimés sur site et les coefficients de référence de la recette en vol de SPOT4 (Meygret *et al.* 1999, Henri *et al.* 2001)

Tableau 1-2 : Écart moyen par rapport à l'étalonnage de référence (pourcentage)

Satellite	Caméra	Bande	White Sands	La Crau
SPOT4	HRVIR1	MIR	1,3	7,9
		B1	9,2	1,0
		B2	5,3	9,0
		B3	0,2	0,6

2-2-7 Étalonnage sur La Crau

Il est vite apparu évident que l'étalonnage sur site test représente un point important de l'étalonnage en vol. Un second site, le site de La Crau a donc été choisi pour compléter les mesures de White Sands. Les travaux de plusieurs équipes (Gu *et al.*, 1992 Santer *et al.* 1992) ont montré que le site était apte à fournir des coefficients d'étalonnage absolu. Dès lors, pendant deux ou trois semaines, tous les ans de 1989 à 1997 s'y sont déroulées des *campagnes d'étalonnage* menées simultanément par plusieurs équipes : LOA (Lille) et LISE (Wimereux).

2-2-7-1 Le site

La plaine de La Crau s'étend sur 60 km² d'Arles à Salon de Provence et jusqu'à Fos-sur-Mer, à une altitude de 20 mètres. Le site d'étalonnage proprement dit est situé au nord de la plaine (4,86° de longitude est et 43,56° de latitude nord). C'est un carré approximatif, de 400 mètres de côté. Comme nous l'avons dit plus haut, le site jouit d'un climat méditerranéen et comporte peu de végétation. Les vents y soufflant en font un site bénéficiant d'une faible couverture nuageuse.

2-2-7-2 Caractéristiques de surface

La végétation qui couvre le site se compose essentiellement d'herbes et de chardons (Figure 1-6 et Figure 1-7). Des monticules de cailloux, souvenirs de la Seconde Guerre Mondiale, sont répartis plus ou moins régulièrement. À une certaine distance du site se trouvent deux bergeries. Les moutons qui paissent contribuent à la diminution de la quantité de végétation sur le site. Les cailloux, très nombreux, réduisent encore la part de végétation.



Figure 1-6 : Vue de la plaine de La Crau, juillet 1998



Figure 1-7 : Vue de la surface de La Crau

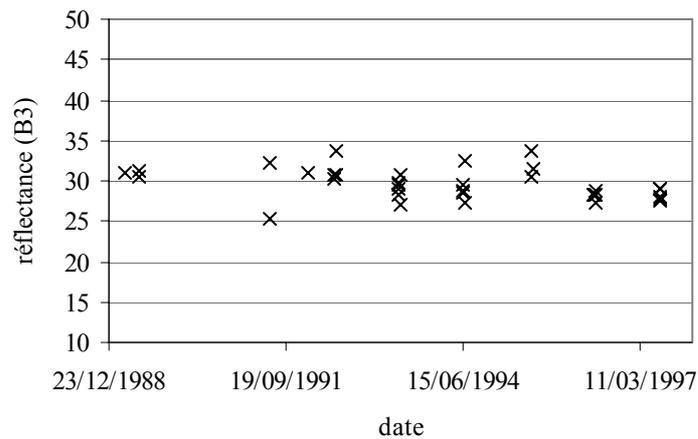


Figure 1-10 : Réflectance (%) du site dans le canal B3 de 1989 à 1997

Nous constatons que la variation maximale de la réflectance est inférieure à 6 points (moyenne 14,15 %) dans la bande B1 et inférieure à 8 points dans les bandes B2 (moyenne 19,13 %) et B3 (moyenne 29,56 %). Nous voyons également (Figure 1-11 à Figure 1-13) que la dispersion reste faible autour de la valeur moyenne. En relatif, ces dispersions sont équivalentes dans les trois canaux. Le site d'étalonnage présente une bonne stabilité temporelle pour la réflectance de surface.

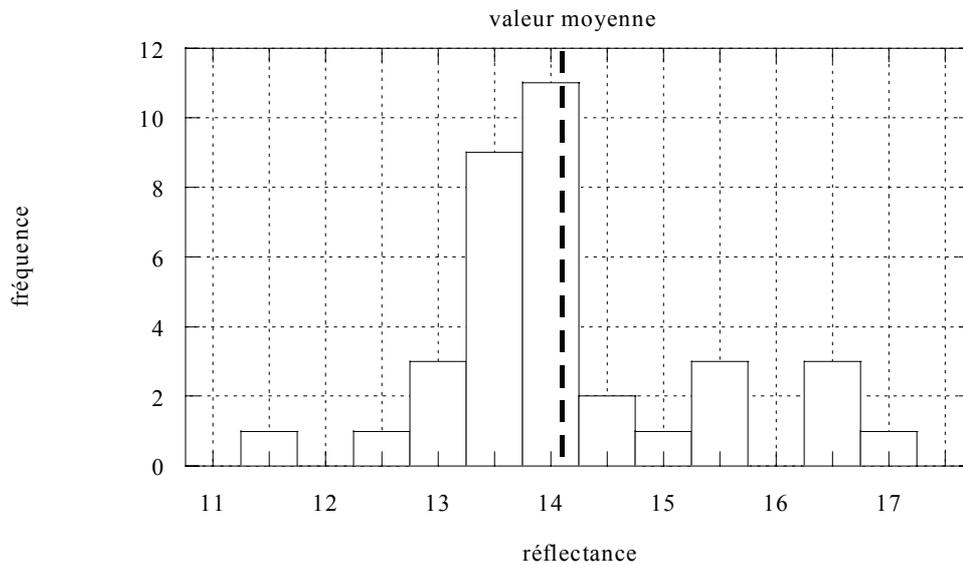


Figure 1-11 : Histogramme des réflectances mesurées dans le canal B1 de 1989 à 1997

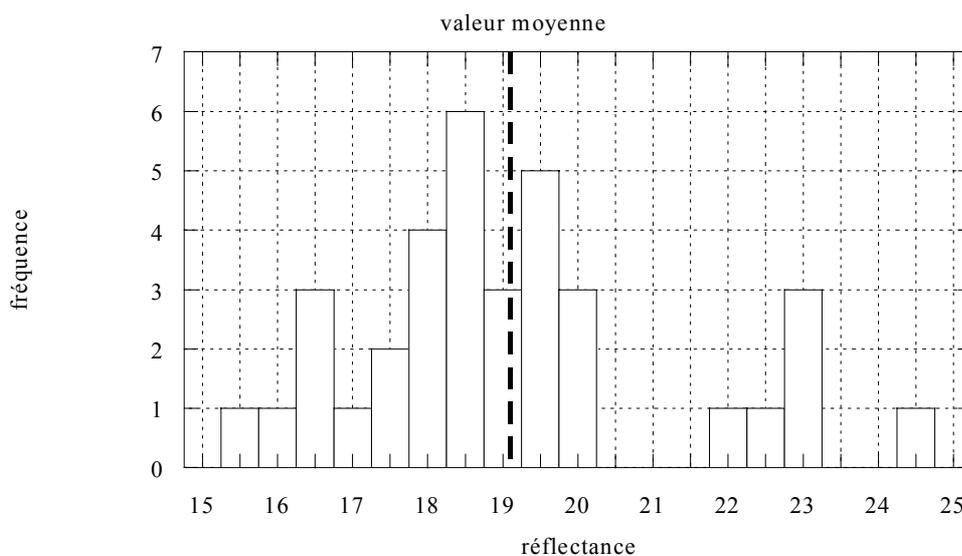


Figure 1-12 : Histogramme des réflectances mesurées dans le canal B2 de 1989 à 1997

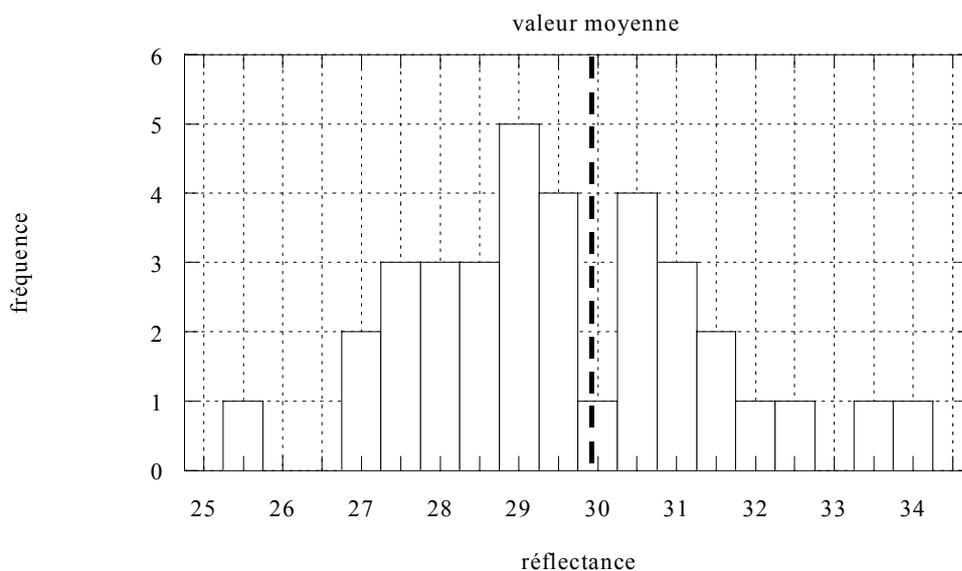


Figure 1-13 : Histogramme des réflectances mesurées dans le canal B3 de 1989 à 1997

La variabilité spatiale du site peut être estimée à partir de la dispersion des mesures de réflectances. Nous donnons dans le Tableau 1-3 les valeurs de réflectances mesurées lors des campagnes d'étalonnage de 1997, 1998 et 1999, ainsi que leur écart-type et le nombre de mesures effectuées. En 1997 et 1998, les mesures ont été effectuées par l'INRA, en 1999 par le LISE. La dispersion est faible pour les campagnes de 1997 et 1998, un peu plus importante en 1999.

Tableau 1-3 : Mesures des réflectances du site, écart-type de ces mesures lors des campagnes de 1997, 1998 et 1999.

date	ρ 550 (%)	σ 550 (%)	ρ 650 (%)	σ 650 (%)	ρ 850 (%)	σ 850 (%)	nombre de points
07/07/97	12,49	1,36	16,10	2,13	26,28	1,84	155
08/07/97	12,38	1,41	15,93	2,12	26,24	1,97	204
06/07/97	11,80	1,45	15,08	2,11	24,93	2,10	147
09/07/97	13,93	1,58	18,06	2,36	29,38	1,98	195
25/04/98	10,54	1,84	13,81	2,66	27,09	6,62	87
07/05/98	12,59	1,22	15,36	1,91	33,38	2,16	150
25/04/98	13,56	1,40	17,03	2,11	33,90	2,30	47
15/06/99	13,65	2,86	17,85	3,70	26,85	3,73	147
19/06/99	11,90	2,19	15,64	2,98	23,62	3,11	182
22/06/99	13,81	2,55	18,15	3,31	26,44	2,81	170

Modèle de BRDF

Les réflectances des figures ci-dessus n'ont pas toutes été mesurées dans les mêmes conditions géométriques. Afin de les comparer, nous les avons ramenées aux mêmes conditions ($\theta_s, \theta_v, \Delta\phi$). Cette opération a été menée grâce au modèle de BRDF de La Crau (Schmechtig *et al.*, soumis). Les mesures ayant servi à la modélisation ont été réalisées en juin 1991 avec l'instrument REFPOL du LOA. Les visées sont faites dans le plan principal (plan perpendiculaire à la surface et contenant le soleil) et dans le plan perpendiculaire ($-80^\circ < \theta_v < 80^\circ$). L'angle zénithal solaire θ_s pour ces mesures varie de 25 à 81 degrés.

On effectue tout d'abord une régression polynomiale en fonction de la variable θ_v . Les données sont ensuite projetées sur les premiers ordres d'une série de Fourier :

$$\rho(\theta_s, \theta_v, \Delta\phi) = \rho^{(0)}(\theta_s, \theta_v) + 2 \sum_{s=1}^S \rho^{(s)}(\theta_s, \theta_v) \cos(s \times \Delta\phi) \quad \text{équation 1-38}$$

avec S fixé à 3. Les coefficients obtenus sont ensuite normalisés par la réflectance extrapolée au nadir. Ils permettent de déduire la réflectance dans une géométrie donnée ($\theta_s, \theta_v, \Delta\phi$) à partir de la réflectance mesurée dans une autre géométrie ($\theta'_s, \theta'_v, \Delta\phi'$). Le modèle obtenu a été validé par comparaison avec des mesures du capteur POLDER aéroporté et les mesures de Gu (1991) puis par Schmechtig *et al.* (soumis à Remote Sensing of Environment). Cette modélisation permet de comparer les réflectances mesurées dans différentes géométries et surtout d'évaluer la réflectance dans la géométrie de visée de SPOT, qui peut être différente de celle de la mesure.

2-2-7-3 Conditions atmosphériques

Turbidité

Comme nous l'avons dit plus haut, le site jouit d'une bonne météo, offrant des conditions satisfaisantes pour l'étalonnage en vol. De plus, les vents y soufflant contribuent à réduire la quantité d'aérosols atmosphériques.

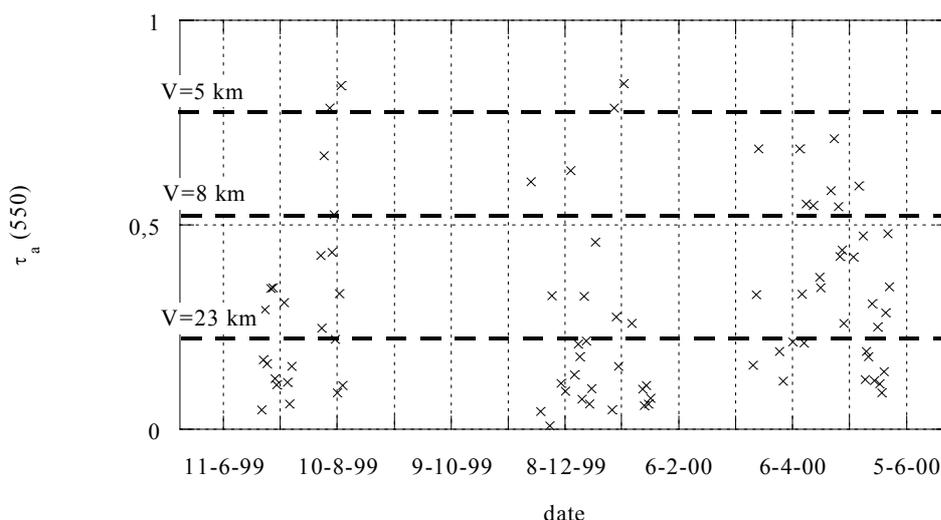


Figure 1-14 : Épaisseur optique aérosol du 01/07/1999 au 25/05/2000
(un point représente la valeur moyenne sur une journée)

Nous avons reporté Figure 1-14 les valeurs de l'épaisseur optique à 550 nm, mesurée sur le site, à l'exclusion des journées ayant une épaisseur optique supérieure à 1 (cela représente environ une dizaine de journées). Nous constatons que quelle que soit la saison (été, hiver ou printemps), le nombre de journées claires est important. Sur le graphique sont indiquées les correspondances en visibilité. Nous voyons que plus de quarante journées ont une visibilité en moyenne supérieure à 23 km. Cela est encore plus évident sur l'histogramme de la Figure 1-15 : cinquante-neuf journées sur soixante-quinze ont une épaisseur optique à 550 nm inférieure à 0,3.

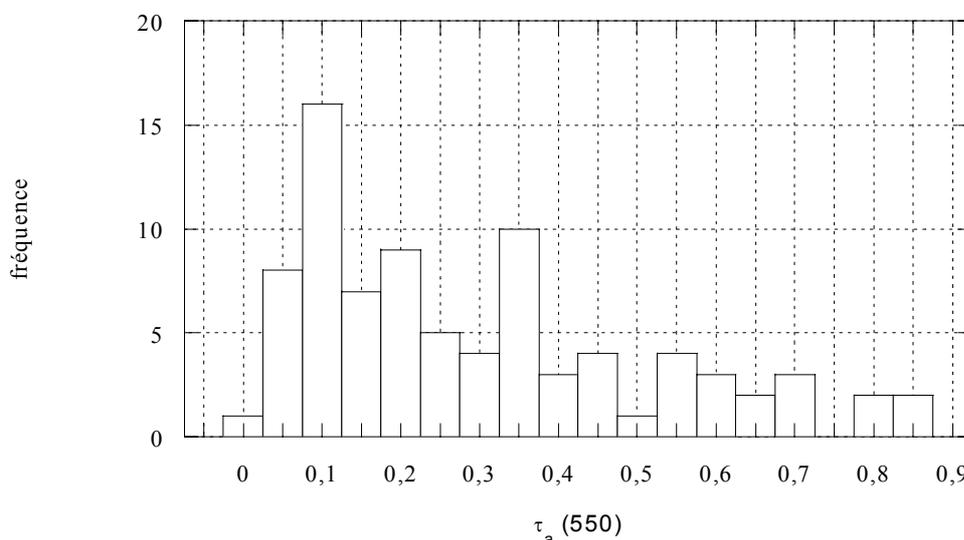


Figure 1-15 : Histogramme de l'épaisseur optique à 550 nm du 01/07/1999 au 25/05/2000

Nature des aérosols

La variation du coefficient d'Angström α mesuré sur le site en fonction du temps est représentée ci-dessous. La variation d'un jour à l'autre est assez importante, la nature et la taille

des aérosols dépendant grandement de l'origine géographique des aérosols (origine marine, continentale, industrielle...) et donc du vent.

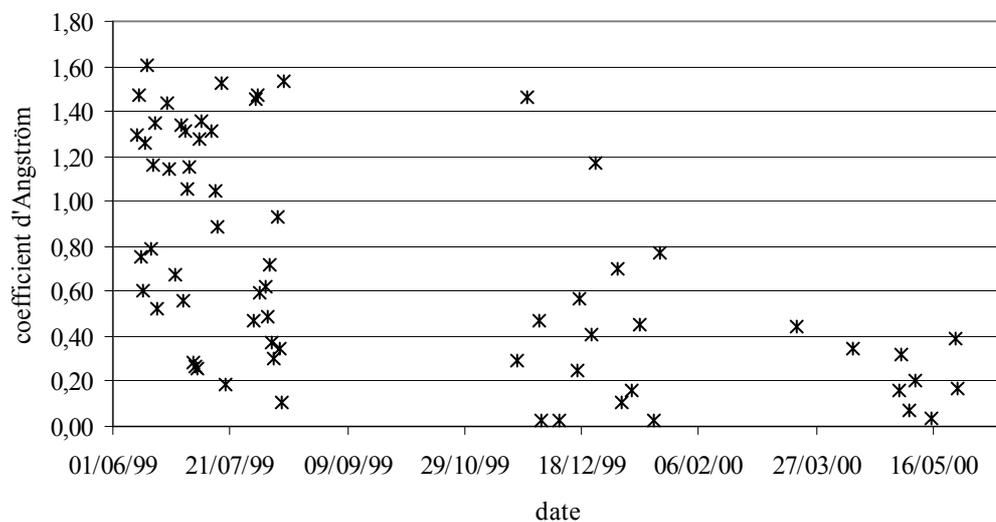


Figure 1-16 : Variations du coefficient d'Angström α en fonction du temps

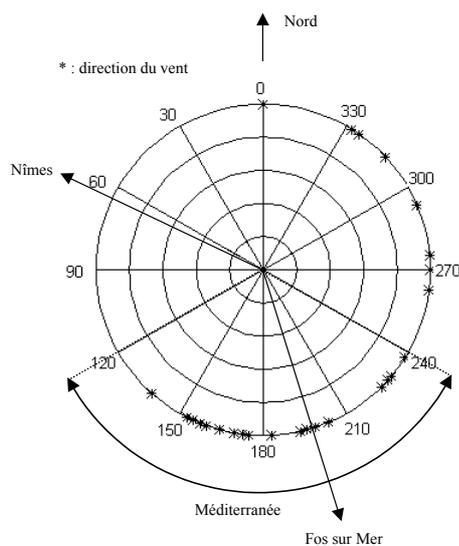


Figure 1-17 : Direction du vent (repérée par une étoile) lors du mois de juin 1999, mesurée sur le site.

La Figure 1-17, qui donne la direction du vent mesurée sur le site de La Crau en juin 1999, indique que le vent dominant de ce mois était un vent d'origine marine. On ne voit cependant pas apparaître de tendance sur la Figure 1-18, qui représente le coefficient d'Angström en fonction de la direction du vent.

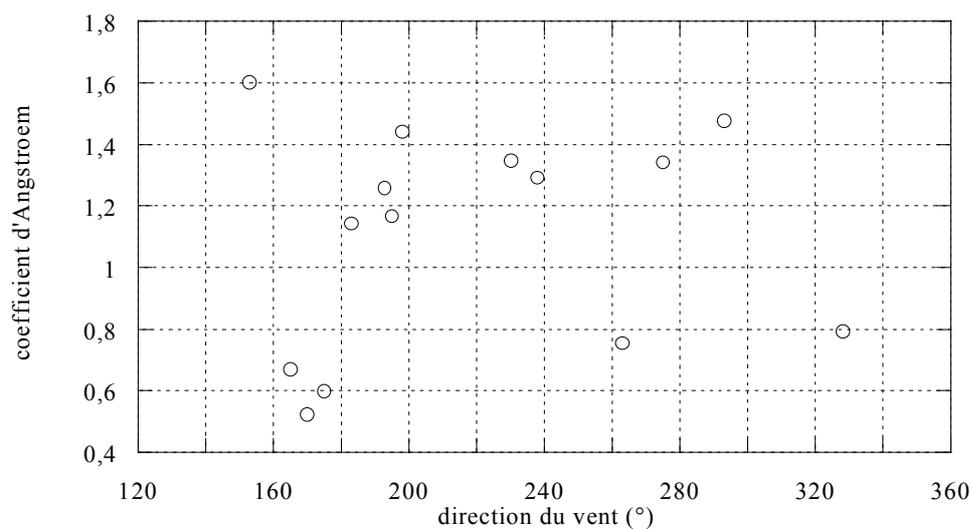


Figure 1-18 : Variations du coefficient d'Angström moyen en fonction du vent (juin 1999)

CONCLUSION DU CHAPITRE

Nous avons abordé dans ce chapitre la théorie qui sous-tend ce travail. Nous avons ensuite décrit les capteurs HRV et HRVIR et les différentes méthodes employées pour leur étalonnage. Enfin, nous avons précisé la méthode que nous utiliserons, c'est-à-dire l'étalonnage sur le site test de La Crau. Ce site a fait l'objet d'une brève description ; les variations, tant des réflectances du sol que des conditions atmosphériques rendent nécessaire une caractérisation expérimentale du site lors du passage du capteur satellitaire. Nous allons ensuite présenter notre instrumentation, ce qui fait l'objet du chapitre suivant.

CHAPITRE 2. LA STATION CIMEL

Nous allons, dans ce chapitre, développer l'instrumentation employée pour la caractérisation de l'atmosphère et de la surface du site de La Crau. Plus particulièrement, nous allons décrire les méthodes d'étalonnage de la station Cimel et la précision de cet étalonnage. Nous ferons ensuite un bref historique de l'installation de la station sur le site, des problèmes et dysfonctionnements rencontrés et des solutions apportées.

1 LA STATION CIMEL ATMOSPHÉRIQUE

Le photomètre Cimel CE-318 est une station de mesures automatiques dédiée à la caractérisation de l'atmosphère. Instrument particulièrement robuste et conçu pour résister aux mauvaises conditions météorologiques, il a été choisi pour édifier le réseau AERONET (Holben et al., 1998) Ce réseau comprenant plus de trente photomètres répartis sur le globe a pour but la surveillance et la caractérisation à long terme des aérosols atmosphériques.

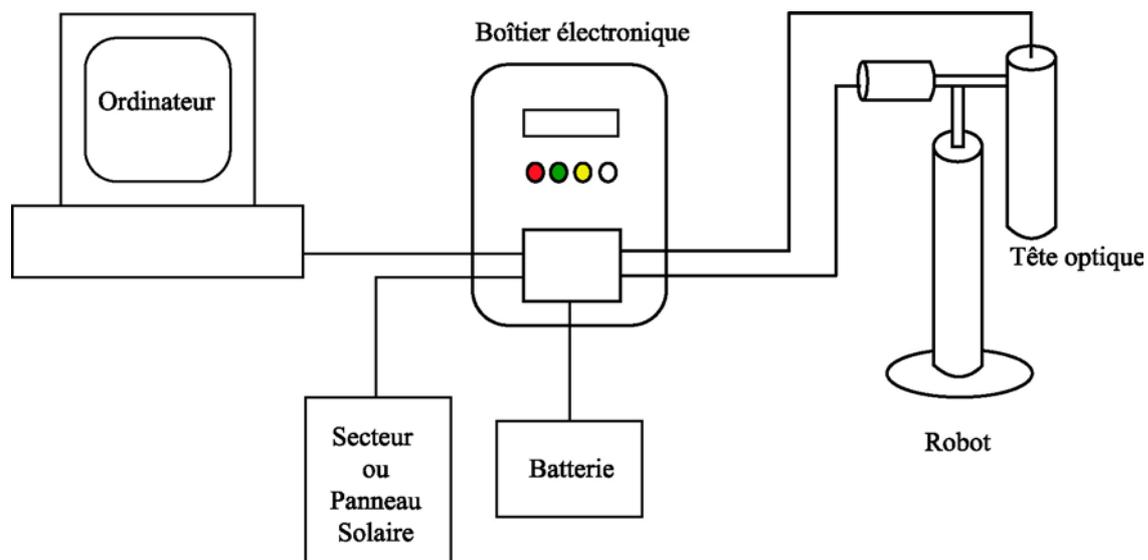


Figure 2-1 : Représentation schématique de la station Cimel CE-318

L'instrument (schématisé Figure 2-1) est composé de trois parties : le boîtier électronique qui contient la programmation des mesures, le robot avec les deux axes de rotation (azimutal et zénithal) et la partie optique, fixée sur le robot.

La partie optique est composée d'une roue porte-filtres, de deux collimateurs (« SUN » et « SKY ») de champ 1° et 3° respectivement et de deux détecteurs Silicium. Le collimateur SUN est utilisé pour les mesures en visée proche du soleil, le collimateur SKY est utilisé pour les mesures de luminances du ciel. Ces deux collimateurs ont des ouvertures angulaires différentes.

Cet instrument est décrit plus précisément sur le site Internet de la société Cimel et sur le site Aeronet.

2 LA STATION CIMEL DE LA CRAU

La station Cimel de La Crau (Figure 2-2) est un prototype, réalisé par la Société Cimel sur les propositions du LISE (PAMOC à l'époque), à la suite d'une demande du CNES (Baklouti *et al.*, 1996). Basé sur le CE-318, ce photomètre est modifié afin de pouvoir caractériser la réflectance de surface ; il est dans ce but perché sur un mât de dix mètres de haut. La seconde modification est l'ajout d'un second détecteur (Germanium) afin de pouvoir étendre les mesures à l'infrarouge moyen. Enfin, les deux collimateurs sont optiquement identiques, chacun collimatant la lumière sur un détecteur (Silicium ou Germanium). Leur champ est de 3° , ce qui représente un angle solide de 2.10^{-3} sr (Six *et al.*, 2001).



Figure 2-2 : La station Cimel de La Crau, juillet 1998

La station effectue quatre protocoles de mesure :

- le protocole « Sun » réalise des mesures d'extinction en visée directe du Soleil,

- le protocole « Plan Principal » consiste à effectuer des mesures de la luminance du ciel dans le plan principal (Figure 2-4),
- le protocole « Almucantar » procède à des mesures pour un angle $\theta_v = \theta_s$, en effectuant une rotation complète en azimut (Figure 2-5),
- le protocole « Sol », qui constitue l'originalité du prototype, sert à caractériser la réflectance du site.

2-1 Bandes spectrales

La station, explicitement dédiée à l'étalonnage sur site des capteurs HRV et HRVIR, comprend plus de canaux que la station CE-318 : 380, 440, 550, 670, 870, 937, 1020 et 1600 nm. À cause du canal à 1600 nm, un détecteur Germanium a été ajouté au détecteur Silicium habituel des photomètres Cimel. On donne (Figure 2-3) les transmissions de ces filtres. Tous les filtres ont une largeur de 10 nm, sauf le filtre 1600 nm, qui a une largeur de 50 nm.

Les canaux 550, 670, 870, et 1600 correspondent aux bandes des capteurs de SPOT4 B1, B2, B3 et MIR. Le canal 440 correspond au canal B0 de Végétation. Les canaux 380 et 440 nm sont utilisés pour l'étalonnage Rayleigh de la station, le canal 937 nm est utilisé pour la détermination du contenu en vapeur d'eau de l'atmosphère. Tous ces canaux (sauf le canal 937) servent à déterminer l'épaisseur optique des aérosols, les flux lumineux.

Les mesures de luminance du sol sont faites dans les bandes 440, 550, 670, 870, et 1600.

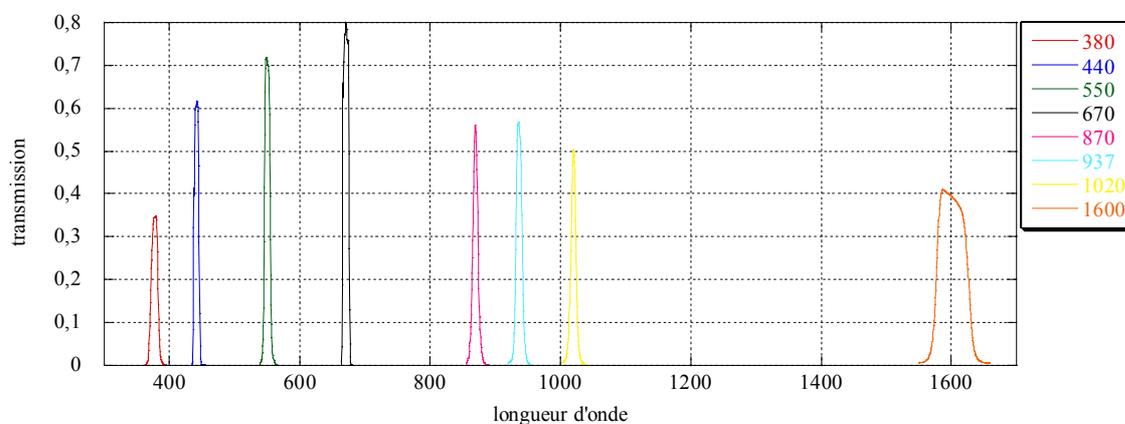


Figure 2-3 : Transmission des filtres de la station

-2 Mode de balayage

Les mesures débutent automatiquement le matin, dès que la masse d'air atteint la valeur de 5 ; à partir de cette valeur, l'atmosphère peut être assimilée à une couche plane parallèle. La position du Soleil est calculée en fonction de l'heure et de la position (longitude et latitude) de l'instrument. La station accomplit dans l'ordre les protocoles Sun, Almucantar, Plan Principal, puis un protocole Sol. Le tout dure environ une heure et trente minutes. Les mesures sont répétées jusqu'au soir quand la masse d'air atteint 5. Selon la saison, nous obtenons par beau temps de trois à huit ensembles complets.

À chaque protocole et à chaque canal correspond un facteur de gain électronique, que l'on ajuste pour maximiser les comptes numériques. Le gain effectif G de la mesure se calcule à partir du facteur de gain F par la formule suivante :

$$G = \frac{1000 \cdot F + 120}{1024} \quad \text{équation 2-1}$$

La linéarité de la réponse des détecteurs a été vérifiée pour des facteurs de gains allant jusqu'à 30.

Détaillons les protocoles :

Protocole Sun

Filtres : 870 Si, 1600 Ge, 670 Si, 1020 Ge, 550 Si, 440 Si, 380 Si, 870 Ge, 1020 Si, 937 Si.

« Si » indique que la mesure est faite par le détecteur Silicium, « Ge » indique le détecteur Germanium. Les mesures, répétées trois fois de suite, sont faites avec un coefficient d'amplification électronique F_U . Elles sont de plus doubles à 870 et 1020 nm, ce qui permet de vérifier que les deux détecteurs donnent des réponses comparables. Le tout dure environ 40 secondes.

Protocole Plan principal

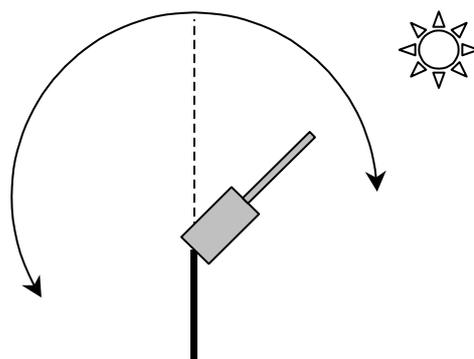


Figure 2-4 : Protocole de mesures Plan principal

Filtres : 870 Si, 1600 Ge, 670 Si, 550 Si, 440 Si, 380 Si.

- Loin du soleil (gain F_K) : 5 points de -20° à -8° ,
- Près du soleil (gain F_A) : 10 points de -6° à -4° et de 4° à 6° ,
- Loin du soleil (gain F_K) : 24 points de 8° à 150° .

Les gains F_A et F_K sont les coefficients d'amplification électronique pour les mesures de luminance respectivement près et loin du soleil. Ce protocole dure approximativement 5 minutes.

Protocole Almuquantar

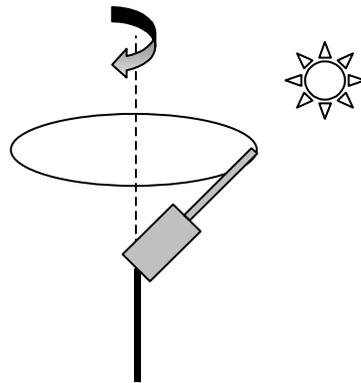


Figure 2-5 : Protocole de mesures Almuquantar

Filtres : 870 Si, 1600 Ge, 670 Si, 1020 Ge, 550 Si, 440 Si, 380 Si

Angles $\Delta\varphi = \varphi_s - \varphi_v$:

- Près du soleil (gain F_A) : 10 points de -6° à -4° et de 4° à 6° ,
- Loin du soleil (gain F_K) : 46 points de 7° à 354° ,
- Près du soleil (gain F_A) : 10 points de 354° à 366° .

Les gains F_A et F_K sont identiques à ceux des plans principaux. Le protocole a une durée d'environ 8 minutes. Un calcul montre que l'angle de diffusion maximum atteint lors d'un almuquantar vaut environ 157° (ce qui correspond à une masse d'air de 5), alors que dans le plan principal, il est limité à 150° par le protocole.

Protocole Sol

Un protocole de caractérisation de surface dit protocole Sol (Figure 2-6), effectue des mesures (gains électroniques F_G) pour les angles suivants : l'élévation h varie de 5° à 60° par pas de 5° ; pour chaque hauteur, une rotation complète en azimut, de 0° à 360° par pas de 5° . Chaque « parapluie » comprend donc 72 mesures de la luminance montant du sol et le protocole complet (pour un canal) comprend 864 mesures de la luminance du sol. Les filtres utilisés sont : 870 Si, 1600 Ge, 670 Si, 550 Si, 440 Si.

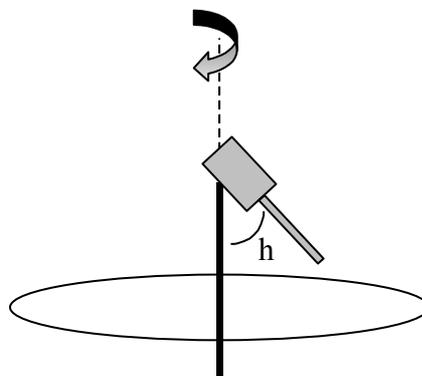


Figure 2-6 : Protocole de mesures Sol

Avant de commencer une série de mesures pour une hauteur h donnée, le photomètre effectue un protocole Sun. Le protocole Sol dure environ 1 heure et 20 minutes.

2-3 Installation

La station est installée sur un mât d'environ 10 mètres de haut, sur le site d'étalonnage de La Crau. Le site d'étalonnage utilisé pour les campagnes classiques est un grand carré de quatre cents mètres de côté, que nous appelons « Grand site » sur la Figure 2-7. Il représente 400 pixels HRVIR. Le « petit site » est la surface couverte par la station.

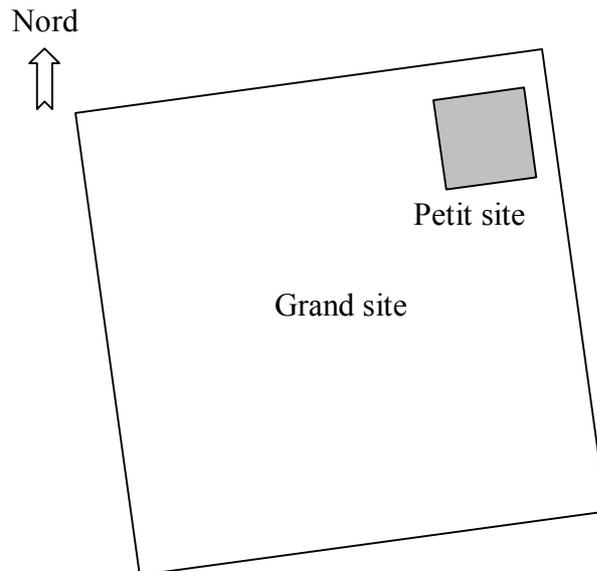


Figure 2-7 : Représentation schématique des sites

2-4 Transmission des données

Pendant les premières campagnes d'installation et de validation de la station, les données étaient récupérées directement par un ordinateur portable. La station devant rester en permanence sur le site, l'émission des données se fait actuellement par GSM. La réception nécessite le logiciel ASTPwin développé par Cimel. Le programme reçoit les données par l'intermédiaire d'un modem et les stocke sous deux formats différents. Le premier comprend des fichiers en format texte, un par type de protocole, le second n'est lisible que par ASTPwin ; il contient tous les paramètres des mesures (gains, température, etc.).

3 ÉTALONNAGE

L'étalonnage radiométrique de l'instrument est une étape cruciale pour la prédiction du signal TOA et donc pour le calcul des coefficients d'étalonnage des HRV. La station Cimel a été conçue de façon à pouvoir être entièrement étalonnée *in situ* en éclairement et en luminance. L'instrument est étalonné en éclairement par la méthode des droites de Bouguer. Aux courtes longueurs d'onde, l'instrument est étalonné sur la luminance de diffusion moléculaire. Le concept de l'instrument nous permet alors de déterminer expérimentalement son champ angulaire. Enfin, aux plus grandes longueurs d'onde, la connaissance du champ angulaire est

utilisée pour calculer les coefficients en luminance à partir des coefficients en éclairement. L'étalonnage en luminance est aussi réalisable en laboratoire, en utilisant une sphère intégrante.

3-1 Étalonnage en éclairement

3-1-1 Principe

L'étalonnage en éclairement est basé sur la loi d'extinction de Bouguer qui s'écrit, pour le canal k :

$$E_k = E_{sk} e^{-m\tau_k} \quad \text{équation 2-2}$$

où E_k est l'éclairement incident au niveau du sol, E_{sk} est l'éclairement incident hors atmosphère (au moment de la mesure), m la masse d'air est définie au chapitre 1, et τ_k est l'épaisseur optique totale.

L'équation 2-2 peut également être écrite sous la forme :

$$\ln(E_k) = \ln(E_{sk}) - m\tau_k \quad \text{équation 2-3}$$

La réponse de l'instrument est en comptes numériques CN ; le coefficient d'étalonnage en éclairement A_k est défini par :

$$CN_k = A_k \times E_k \quad \text{équation 2-4}$$

L'équation 2-3 nous donne alors une relation similaire pour les comptes numériques :

$$\ln(CN_k) = \ln(CN_{0k}) - m\tau_k \quad \text{équation 2-5}$$

Si nous considérons que l'épaisseur optique τ_k est constante au cours d'une demi-journée, nous pouvons alors effectuer la régression linéaire $\ln(CN_k) = f(m)$ (voir Figure 2-8), ce qui nous donne la pente $-\tau_k$ et l'ordonnée à l'origine $\ln(CN_{0k})$.

Le coefficient A_k qui sert à calculer l'éclairement solaire, ou « flux direct », est déduit du coefficient CN_{0k} :

$$A_k = \frac{CN_{0k}}{E_{sk}} \quad \text{équation 2-6}$$

Si l'on prend pour valeur de E_{sk} les valeurs moyennes sur l'année (Kurucz, 1995), on corrige alors de la distance Terre-Soleil d (U.A.) :

$$A_k = \frac{CN_{0k}}{E_{sk}} d^2 \quad \text{équation 2-7}$$

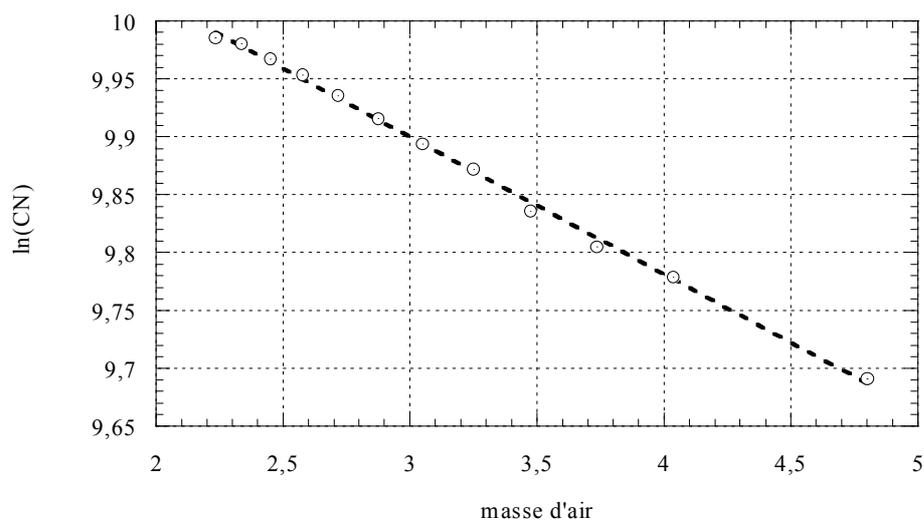


Figure 2-8 : Régression linéaire effectuée pour la matinée du 20/06/1999 dans le canal 670 nm

Le protocole de mesures SUN décrit précédemment donnant une mesure d'extinction toutes les 10 à 15 minutes environ, les journées stables donnent de bonnes évaluations du coefficient CN_{0k} . Ce coefficient, qui est caractéristique de l'instrument, permet de calculer l'épaisseur optique totale τ instantanée (voir Figure 2-9).

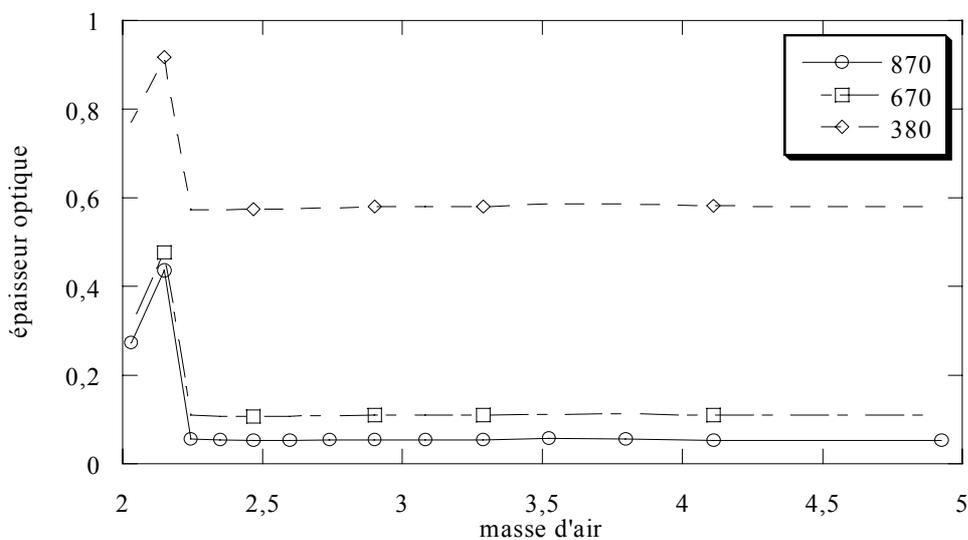


Figure 2-9 : Variation de l'épaisseur optique totale dans le canal à 670 nm, le 20/06/1999 au matin

On voit sur la figure précédente que l'hypothèse de la stabilité de l'épaisseur optique est vérifiée pour la matinée du 20/06/1999 : pour une masse d'air comprise entre 2,5 et 5, la variation est d'environ 3%, elle atteint 10 % au maximum, une fois les deux points de gauche éliminés.

3-1-2 Méthode opérationnelle

Afin d'éviter d'éventuelles variations des critères, et surtout à cause du nombre de mesures à traiter, les coefficients CN_0 sont obtenus en automatique. Nous utilisons pour cela un

code, dont certains critères sont ajustables, et qui permet de visualiser les droites de Bouguer pour les périodes choisies.

Les critères utilisés sont les suivants : le coefficient de corrélation de la régression, l'écart-type de la régression. Afin d'éliminer des points aberrants, pouvant correspondre à un nuage passager, nous appliquons le filtre suivant : une première régression est effectuée puis tous les points éloignés de plus de 1,5 fois l'écart-type de la droite de régression sont éliminés. La régression est de nouveau effectuée et nous donne le logarithme népérien du coefficient CN_0 . Pour qu'un coefficient CN_0 soit validé et conservé, le coefficient de corrélation doit être supérieur à 0,985 et l'écart-type de la régression inférieur à 0,015. De plus, la régression doit être menée sur un minimum de 6 points. Les valeurs de ces paramètres sont modifiables par l'utilisateur. Les valeurs citées, choisies empiriquement, sont celles qui donnent des résultats satisfaisants. Après avoir appliqué le code d'étalonnage à nos données, nous avons appliqué un nouveau filtre : les coefficients éloignés de deux fois l'écart-type de la moyenne sont éliminés. Au maximum deux coefficients ont ainsi été éliminés, la plupart satisfaisant cette condition.

3-1-3 Résultats

Le code d'étalonnage Bouguer a été appliqué aux mesures de 1999 et 2000. Nous donnons dans les tableaux suivants le nombre de journées ayant permis l'étalonnage, les valeurs et la dispersion des coefficients. Ces tableaux ne comportent pas le coefficient $CN_0(1600)$ car l'absence de régulation en température du détecteur au Germanium empêche une utilisation correcte à 1600 nm. L'effet sur les droites de Bouguer est illustré dans la Figure 2-10. L'étalonnage en éclairissement n'est donc pas possible dans le canal à 1600 nm, nous ne disposerons pas de l'épaisseur optique dans ce canal.

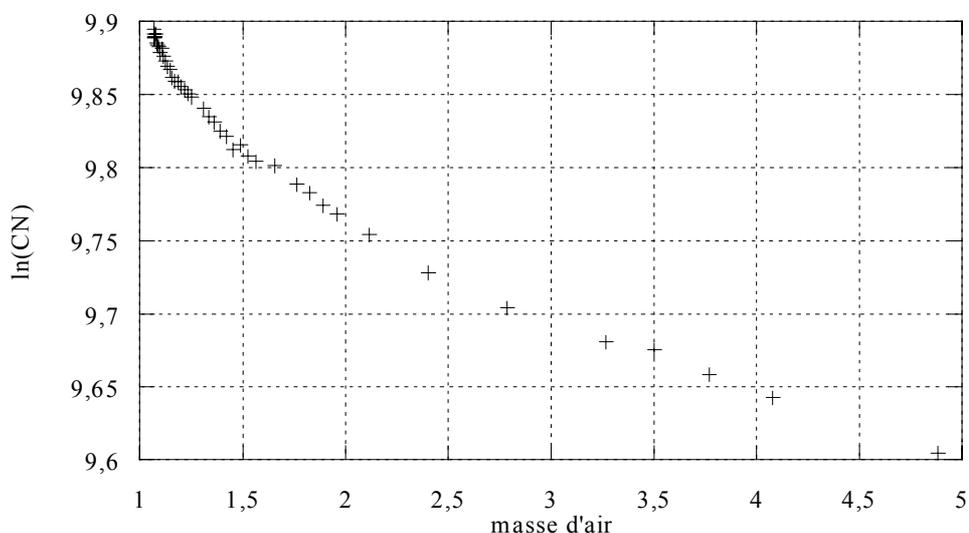


Figure 2-10 : Représentation du $\ln(CN)$ en fonction de la masse d'air à 1600 nm le 12/06/1999

Tableau 2-1 : Coefficients CN_0 moyens et leur dispersion pour l'été 1999 (du 8/06/1999 au 12/08/1999)

canal	380 Si	440 Si	550 Si	670 Si	870 Si	870 Ge	1020 Si	1020 Ge
moyenne	4445	17976	24346	26882	27696	5946	16883	7274
écart-type σ	302	1151	1039	859	630	118	392	127
nombre	9	12	18	21	21	19	19	19
$\Delta CN_0/CN_0$	0,023	0,018	0,010	0,007	0,005	0,005	0,005	0,004

Tableau 2-2 : Coefficients CN_0 moyens et leur dispersion pour l'hiver 1999-2000 (du 20/11/1999 au 23/01/2000). Ces coefficients proviennent uniquement des mesures du matin.

canal	380	440	550	670	870 Si	870 Ge	1020 Si	1020 Ge
moyenne 2	3575	16347	23314	27248	29343	6279	16575	7528
écart-type σ	291	1936	1802	1248	1456	164	367	220
nombre	3	6	8	10	11	6	8	10
$\Delta CN_0/CN_0$	0,047	0,048	0,027	0,014	0,015	0,011	0,008	0,009

Tableau 2-3 : Coefficients CN_0 moyens et leur dispersion pour le printemps 2000 (du 15/03/2000 au 28/05/2000)

canal	380	440	550	670	870 Si	870 Ge	1020 Si	1020 Ge
moyenne	4474	17858	24110	26685	27532	6070	16461	7375
écart-type σ	191	523	495	619	734	157	364	120
nombre	10	10	11	16	20	20	20	19
$\Delta CN_0/CN_0$	0,014	0,009	0,006	0,006	0,006	0,006	0,005	0,004

On définit la dispersion $\Delta CN_0/CN_0$ donnée ci-dessus comme l'estimateur de l'écart-type sur la moyenne. On la calcule de la façon suivante (avec n le nombre de points de la moyenne) :

$$\frac{\Delta CN_0}{CN_0} = \frac{1}{\sqrt{n}} \frac{\sigma}{CN_0} \quad \text{équation 2-8}$$

Les incertitudes $\Delta CN_0/CN_0$ aux faibles longueurs d'onde (380, 440 et 550 nm) sont très certainement artificiellement surévaluées. En effet, le test sur l'écart-type de la régression linéaire (qui est reliée à la variabilité de l'épaisseur optique) élimine beaucoup plus de points à 380, 440 ou 550 nm qu'à 870 nm. Il faudra certainement modifier le code, afin que le test soit basé sur l'écart-type à 870 nm pour tous les canaux.

Les coefficients CN_0 de l'hiver 1999-2000 ont une dispersion plus grande que ceux de l'été 1999 ou du printemps 2000. Nous attribuons cela au faible nombre de journées où le temps a permis un étalonnage. L'écart entre le jeu de coefficients de l'été et celui du printemps est faible (au maximum 2,5 % de variation), alors que l'écart entre le jeu de l'hiver et celui de l'été précédent ou celui du printemps suivant va jusqu'à 20 %. Encore une fois, on attribue cet écart aux mesures trop peu nombreuses, on voit que globalement, la dispersion diminue quand le nombre de mesures augmente. Un autre phénomène est observé en hiver ; les coefficients calculés pour l'après-midi diffèrent de façon importante de ceux calculés pour le matin (Figure

2-11). Nous avons donc écarté les coefficients de l'après-midi dans le calcul des coefficients moyens donnés Tableau 2-2.

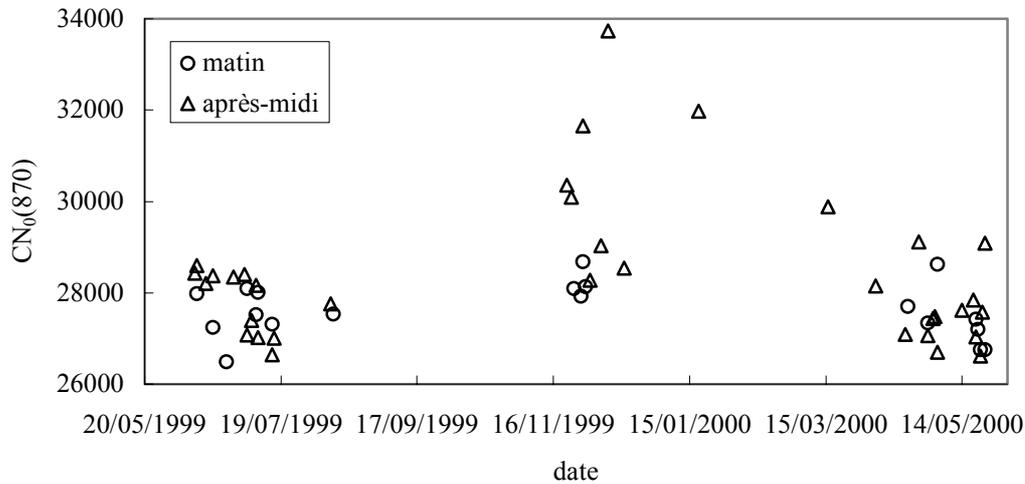


Figure 2-11 : variation du coefficient $CN_0(870)$ de l'été 1999 au printemps 2000

La variation en fonction du temps des coefficients CN_0 montre que la perte de sensibilité de l'instrument au cours d'une année est peu importante, particulièrement si l'on compare les coefficients de l'été 1999 et ceux du printemps 2000. L'écart important entre les valeurs de l'été et de l'hiver, ou de l'hiver et du printemps peut être attribué à la grande dispersion des points l'hiver.

Les coefficients A_k relatifs à l'éclairement direct sont obtenus à partir des CN_{0k} par l'équation 2-7. Ils sont donnés en Annexe 2.

La précision obtenue sur l'épaisseur optique est directement reliée à la précision sur CN_0 . L'équation 2-5 donne :

$$\frac{\Delta CN}{CN} + \frac{\Delta CN_0}{CN_0} = m \Delta \tau \quad \text{équation 2-9}$$

En considérant que $\frac{\Delta CN}{CN}$ est négligeable, on obtient :

$$\Delta \tau = \frac{1}{m} \frac{\Delta CN_0}{CN_0} \quad \text{équation 2-10}$$

On donne dans le tableau ci-dessous l'incertitude sur l'épaisseur optique : pour l'été et le printemps, on a calculé avec $\theta_s = 20^\circ$ ($m = 1,06$), en hiver avec $\theta_s = 50^\circ$ ($m = 1,56$), ce qui correspond au minimum de θ_s , selon la saison. Nous obtenons ainsi une valeur maximale de l'incertitude $\Delta \tau$.

Tableau 2-4 : Incertitude maximale $\Delta\tau$ sur l'épaisseur optique

canal	380	440	550	670	870 Si	870 Ge	1020 Si	1020 Ge
été 1999	0,021	0,017	0,009	0,007	0,005	0,004	0,005	0,004
hiver 1999-2000	0,030	0,031	0,017	0,009	0,010	0,007	0,005	0,006
printemps 2000	0,013	0,008	0,006	0,006	0,006	0,006	0,005	0,004

3-1-4 Validation : campagne du Pic du Midi. Conclusion sur l'étalonnage en éclairement

L'étalonnage en éclairement par la méthode de Bouguer est une méthode confirmée lorsque les mesures sont faites en altitude, sa validité est souvent discutable lorsque les mesures sont faites au niveau de la mer (Shaw, 1976, Nieke *et al.*, 1999). Sur le site de La Crau, d'éventuelles variations de la turbidité atmosphérique peuvent fausser les coefficients tout en restant indécélables. En juin 2000, le laboratoire a mené une campagne au Pic du Midi (2900 mètres), afin d'étalonner plusieurs photomètres Cimel (deux portables, un automatique et la station de La Crau). Le Tableau 2-5 donne les coefficients obtenus au Pic du Midi et ceux obtenus à La Crau. Nous reportons en seconde partie de l'Annexe 1 les comparaisons des épaisseurs optiques évaluées lors de cette campagne.

Tableau 2-5 : Coefficients d'étalonnage déterminés au Pic du Midi, comparaison aux coefficients de La Crau (printemps 2000), écart et incertitude $\Delta CN_0/CN_0$ (en %)

Canal	CN ₀ Pic du Midi	CN ₀ La Crau	Écart (%)	$\Delta CN_0/CN_0$ La Crau	$\Delta CN_0/CN_0$ Pic du Midi
380 Si	4411	4474	1,4	1,4	5,4
440 Si	17495	17858	2,0	0,9	3,0
550 Si	23797	24770	3,9	1,9	2,3
670 Si	26754	26789	0,1	0,7	1,8
870 Si	27952	27644	1,1	0,7	1,6
870 Ge	6224	6092	2,2	0,7	1,7
1020 Si	15699	16508	4,9	0,6	2,1
1020 Ge	7564	7419	2,0	0,5	1,1

L'incertitude plus grande sur les coefficients du Pic du Midi peut s'expliquer par le faible nombre de mesures (5 demi-journées, et seulement 3 pour le canal 1020 Si). Toutefois, cela ne doit pas cacher la dispersion plus grande des coefficients du Pic du Midi par rapport à celle des coefficients de La Crau (pour quatre journées de mesure de suite). Cependant, les conditions de mesures au Pic du Midi n'étaient pas idéales ; le robot de la station de La Crau n'étant pas utilisable au sol, il a fallu partager le robot du photomètre automatique entre les deux instruments, ce qui pouvait causer un déplacement du robot. De plus, les mesures ayant été faites pour des masses d'air très grandes (supérieures à 8), les résultats peuvent être faussés par des effets de sphéricité de l'atmosphère.

Dans le canal 1020 Si, nous avons observé un important effet de température, qui nous a amené à éliminer deux demi-journées dans la détermination du coefficient CN₀. Mis à part ce canal, les coefficients d'étalonnage en éclairement obtenus au Pic du Midi confirment la valeur des coefficients de La Crau aux incertitudes près.

3-2 Étalonnage en luminance

L'étalonnage en luminance de la station peut être effectué sur sphère, en laboratoire. Il est également possible d'étalonner l'instrument, *in situ*, sur la diffusion Rayleigh (aux courtes longueurs d'onde). Par ailleurs, les mesures de luminance et d'éclairement étant faites avec le même canon, nous pouvons utiliser le champ angulaire de l'instrument pour calculer les coefficients d'étalonnage en luminance à partir des coefficients en éclairement. Nous déterminons auparavant une valeur expérimentale du champ.

3-2-1 Étalonnage sur sphère

3-2-1-1 Principe

Les sphères intégrantes sont des systèmes couramment utilisés pour l'étalonnage radiométrique des photomètres. Une sphère intégrante est composée d'une source d'éclairement connu, placé sur l'ouverture d'une sphère dont la surface intérieure est recouverte d'un traitement lambertien (par exemple le spectralon, employable de 250 à 2500 nm). Elle intègre spatialement par de multiples réflexions le flux incident. Le flux mesuré par une ouverture dans la sphère est donc proportionnel au flux incident et indépendant des propriétés géométriques de la lumière source (Cariou, 1998)

Ces sphères sont régulièrement étalonnées, de façon à connaître la luminance L_λ émise par la sphère sur toute la gamme de longueur d'onde. Elles permettent ainsi d'obtenir les coefficients d'étalonnage en luminance B_k associés à chaque canal k (équation 2-11)

$$B_k = \frac{CN_k}{L_k} \quad \text{équation 2-11}$$

avec L_k luminance équivalente sur le canal k . En pratique, nous prenons $L_\lambda = L(\lambda_0)$ (avec λ_0 la longueur d'onde centrale du filtre) et pas L_k , car le pas avec lequel nous connaissons L_λ (10 nm) n'est pas assez fin pour calculer L_k dans les canaux de largeur 10 nm.

3-2-1-2 Résultats

L'instrument a été étalonné par deux fois depuis sa modification en 1999, une fois sur la sphère D (elle-même récemment étalonnée) du LOA en juin 1999, l'autre sur la sphère du DOTA (Onera, Toulouse) en novembre 1999. Nous reportons dans le Tableau 2-6 les coefficients obtenus à ces deux dates, pour un gain électronique de 10. De même que pour les coefficients CN_0 (équation 2-8), les incertitudes associées correspondent à l'écart-type de la moyenne de l'échantillon.

Tableau 2-6 : Coefficients d'étalonnage en luminance pour un gain électronique $g_k = 10$
(en $CN/(W/m^2/sr/nm)$, incertitudes associées et écart entre les sphères.

Canal	LOA	$\Delta B/B$ (%)	DOTA	$\Delta B/B$ (%)	Écart
380 Si	5458	0,186	81996	0,264	93,34
440 Si	15873	0,255	22460	0,255	29,33
550 Si	32617	0,257	37066	2,222	12,00
670 Si	44660	0,200	50793	0,231	12,07
870 Ge	9579	0,231	10278	0,261	6,80
870 Si	44431	0,083	49200	0,235	9,69
937 Si	51227	0,008	56817	0,003	9,84
1020 Ge	15266	0,179	16326	0,264	6,49
1020 Si	34916	0,007	38587	0,008	9,51
1600 Ge	120859	0,041	126200	0,461	4,23

Nous pouvons également, dans le cas de la sphère du LOA, calculer l'erreur à partir de l'incertitude sur la luminance. La sphère a été étalonnée en mai 1999 par la société Labsphere. Nous déduisons du rapport d'étalonnage l'erreur sur la luminance, donc sur le coefficient B (Tableau 2-7).

Tableau 2-7 : Incertitude (%) sur le coefficient B obtenu sur la sphère du LOA.

Canal	$\Delta B/B$ (%)
380 Si	2,35
440 Si	2,27
550 Si	2,23
670 Si	2,28
870 Ge	2,41
870 Si	2,41
937 Si	2,45
1020 Ge	2,50
1020 Si	2,50
1600 Ge	2,87

3-2-1-3 Problèmes associés

Le problème des sphères intégrantes est la faible valeur de leur luminance aux courtes longueurs d'onde. Nous voyons en effet Figure 2-12 que pour $\lambda = 380$ nm la luminance de la sphère du LOA est réduite d'un facteur 100 environ par rapport à la luminance à $\lambda = 550$ nm. Les comptes numériques mesurés pour $\lambda = 380$ nm ou 440 nm sont ainsi de l'ordre du bruit. Dans le cas de la sphère du DOTA (Figure 2-13), la luminance est faible sur toute la gamme de longueur d'onde (en moyenne la luminance est 600 fois plus faible que celle de la sphère du LOA).

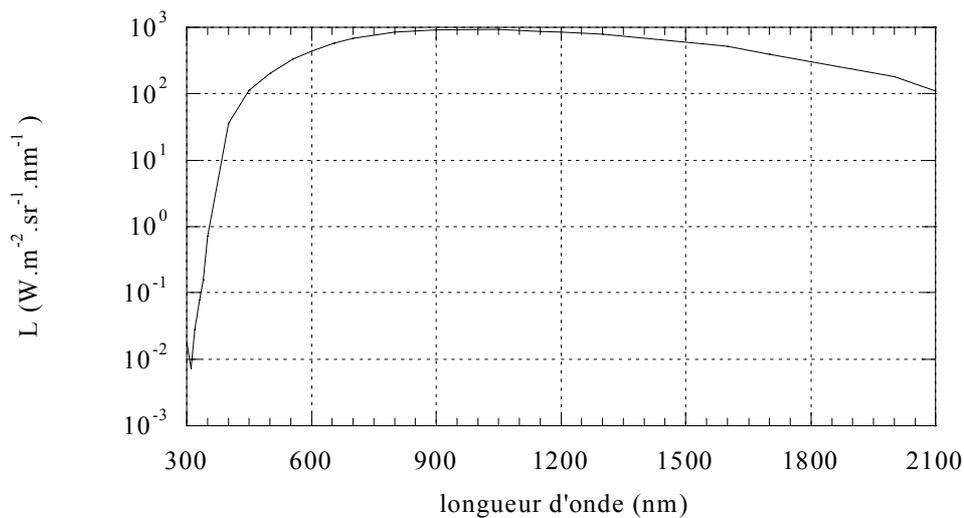


Figure 2-12 : Luminance de la sphère D du LOA en fonction de la longueur d'onde

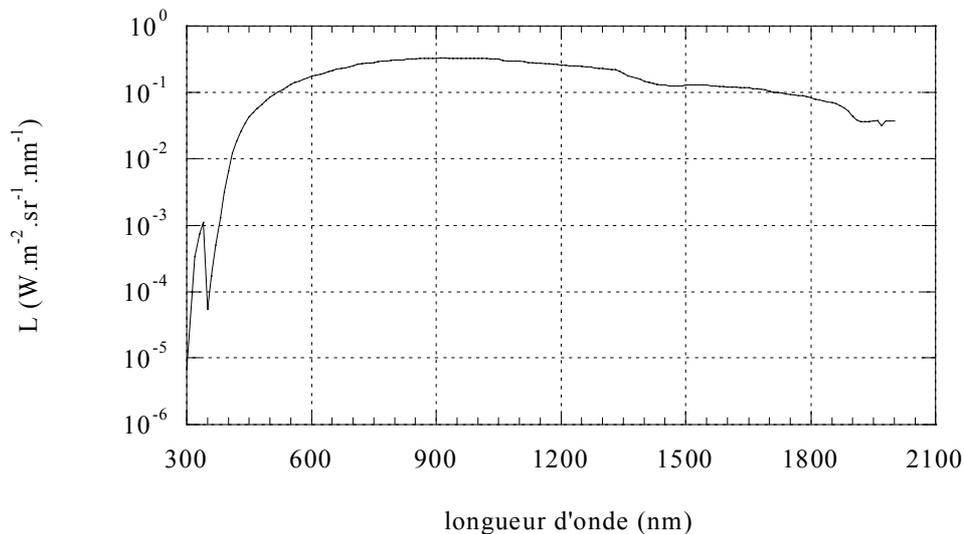


Figure 2-13 : Luminance de la sphère du DOTA en fonction de la longueur d'onde

Nous constatons (Tableau 2-6) qu'à 380 nm, il y a un facteur 18 entre les coefficients calculés au LOA et ceux calculés au DOTA. Il devient donc évident qu'une autre méthode doit être employée pour étalonner l'instrument en luminance aux courtes longueurs d'onde.

3-2-2 Étalonage sur la diffusion moléculaire

3-2-2-1 Principe

Comme nous l'avons écrit précédemment, l'étalonnage sur la diffusion moléculaire, ou diffusion Rayleigh, (Dilligeard *et al.*, 1996, Parada, 1997, Meygret *et al.*, 1998) est basé sur la prédominance de la diffusion Rayleigh aux courtes longueurs d'onde. La station Cimel a été dotée de canaux pouvant servir à l'étalonnage Rayleigh : 380, 440 et 550 nm. Pour l'étalonnage Rayleigh, on utilise les mesures de luminance du protocole Plan Principal. Le code des Ordres Successifs de diffusion nous sert à simuler la luminance atmosphérique descendante dans le plan principal $L_{OS}(\Theta_{Gauss})$. Les paramètres d'entrée du code sont (Figure 2-14) :

- l'épaisseur optique de diffusion Rayleigh dans les bandes 380, 440 et 550 nm,
- trois modèles d'aérosols : Loi de Junge, avec trois indices de réfraction réels $m = 1,33$, $m = 1,45$ et $m = 1,50$, une valeur de l'indice de réfraction imaginaire $k = -0,005$ et le rayon des aérosols compris entre 0,01 et 10 μm ,
- l'épaisseur optique aérosol mesurée dans les bandes 380, 440 et 550 nm,
- la réflectance de surface moyenne dans les bandes 380, 440 et 550 nm.

On ajoute le terme dû aux aérosols comme une correction afin d'améliorer la précision de l'étalonnage. De plus, on fixe une limite τ_a^{max} à la valeur de l'épaisseur optique aérosol au delà de laquelle le calcul du coefficient d'étalonnage n'est pas effectué.

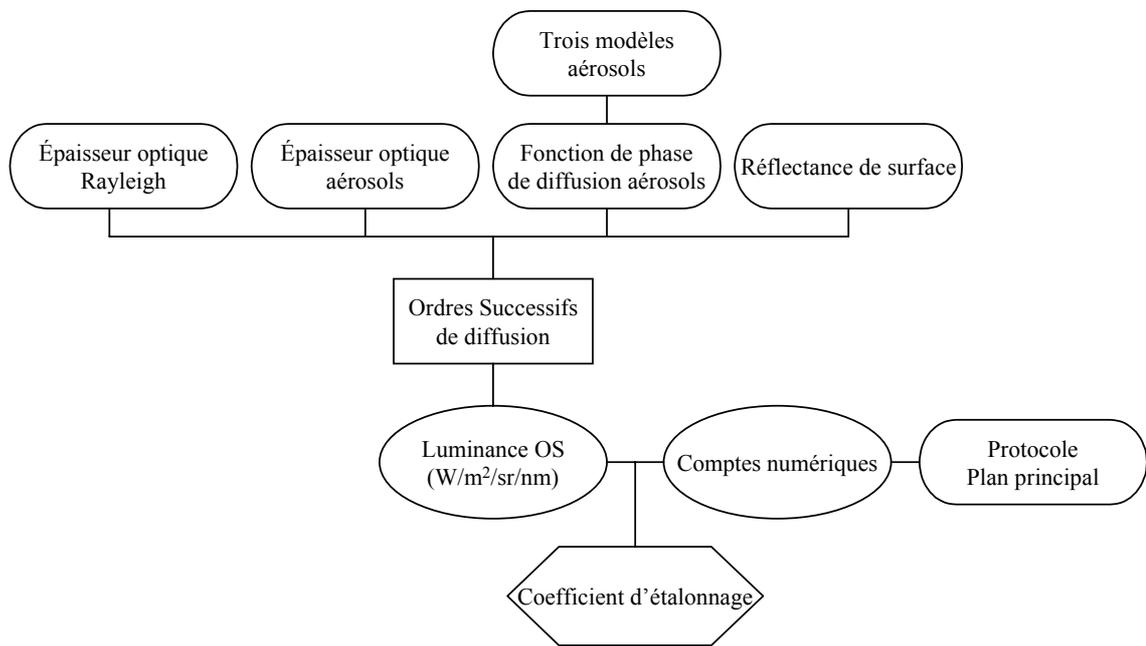


Figure 2-14 : Schéma de la méthode d'étalonnage sur la diffusion moléculaire

Le code des ordres successifs calcule donc la luminance en fonction de l'angle de diffusion pour chaque modèle d'aérosol dans chaque bande. Nous obtenons à ce stade trois jeux de coefficients $B_k(\Theta_{\text{Gauss}})$ pour chaque canal k :

$$B_k(\Theta_{\text{Gauss}}) = \frac{CN_k(\Theta_{\text{Gauss}})}{L_k^{\text{OS}}(\Theta_{\text{Gauss}})} \quad \text{équation 2-12}$$

Les comptes numériques n'étant pas mesurés aux angles de Gauss, on obtient les $CN_k(\Theta_{\text{Gauss}})$ par interpolation linéaire des $CN_k(\Theta)$. Il nous reste ensuite à calculer le coefficient moyen \bar{B}_k :

$$\bar{B}_k = \frac{1}{N} \sum_{\Delta\Theta} B_k(\Theta) \quad \text{équation 2-13}$$

Pour cela, nous devons déterminer l'intervalle $\Delta\Theta$ et le nombre N d'angles sur lequel nous calculerons cette moyenne. Nous choisissons donc $\Delta\Theta$ de façon à minimiser le signal théorique dû aux aérosols. On fait tourner le code des OS avec les entrées précédentes, avec une différence : on fixe l'épaisseur optique Rayleigh à 0 pour calculer le signal dû aux aérosols $L_k^a(\Theta)$. On détermine alors le « pourcentage Rayleigh » $\Psi_k(\Theta)$:

$$\Psi_k(\Theta) = \frac{L_k(\Theta) - L_k^a(\Theta)}{L_k(\Theta)} \quad \text{équation 2-14}$$

Nous fixons ensuite une valeur minimale de $\Psi_k(\Theta)$. Tous les angles Θ pour lesquels $\Psi_k(\Theta)$ est inférieur à la valeur limite sont rejetés, et nous pouvons calculer \bar{B}_k pour les trois modèles d'aérosols. Nous avons choisi de fixer le minimum à 0,75 : cette valeur permet de ne pas trop restreindre le domaine d'angles $\Delta\Theta$.

Enfin, il faut déterminer le modèle d'aérosols qui minimisera l'erreur. Nous calculons pour chaque modèle m un coefficient χ_m défini par :

$$\chi_m = \sum_{\Theta} (\bar{B}_m L_m(\Theta) - CN(\Theta))^2 \quad \text{équation 2-15}$$

Le calcul est donc effectué en éliminant des simulations la pointe avant; ces points introduiraient un biais car aucune mesure n'y est faite. Le coefficient χ_m minimum indique la luminance simulée dont la forme est la plus proche de la courbe $CN(\Theta)$. Nous choisirons donc le coefficient obtenu avec le modèle d'aérosols qui minimise χ_m . Un dernier test est appliqué au coefficient ; si l'écart-type de la distribution de $B_k(\Theta)$ est trop important, le coefficient moyen \bar{B}_k n'est pas retenu. Enfin, un œil critique permet d'éliminer les quelques valeurs aberrantes qui subsistent.

Les temps de calcul du code sont grands, en effet pour un Plan Principal, le code des OS s'effectue deux fois, et surtout, le code Mie (modèles d'aérosols) s'effectue pour les trois indices de réfraction. Multiplions par trois longueurs d'onde, et nous arrivons à des temps de calculs de huit jours pour trois mois de données à traiter. Il nous faut envisager l'emploi de tables pré-calculées pour pallier ce défaut.

Tableau 2-8 : Seuil sur l'écart-type des $B_k(\Theta)$

canal	380	440	550
valeur typique de B_k	6500	16000	30000
valeur maximale de σ	600	1500	3000

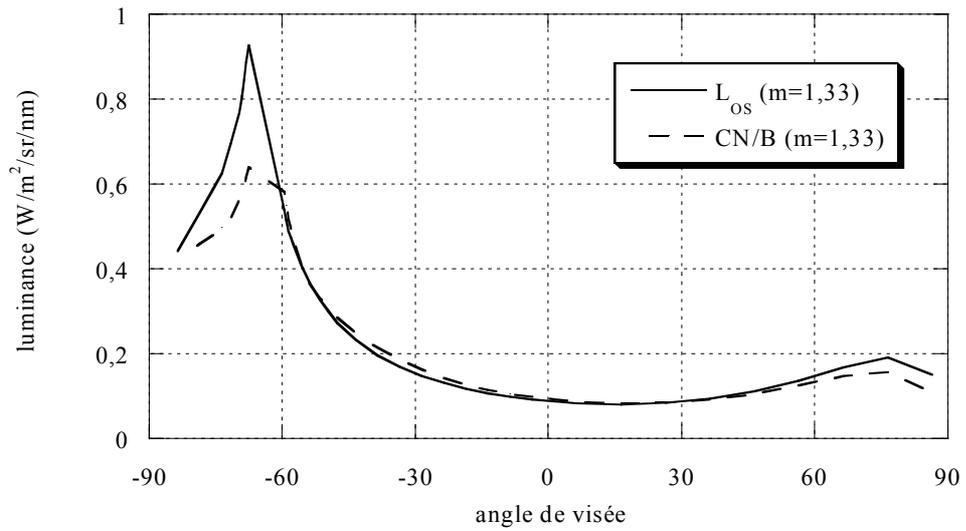


Figure 2-15 : Comparaison entre la luminance mesurée et la luminance simulée avec un indice $m=1,33$

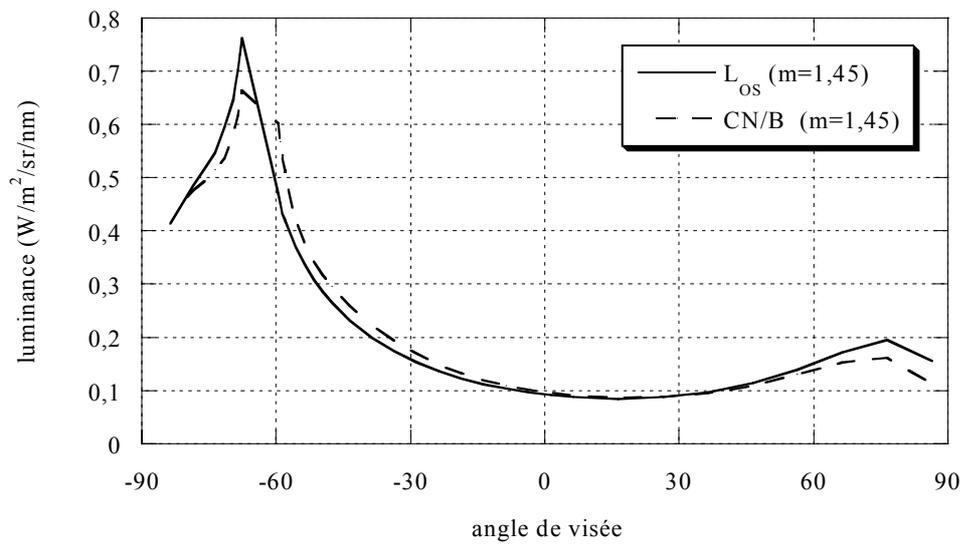


Figure 2-16 : Comparaison entre la luminance mesurée et la luminance simulée avec un indice $m=1,45$

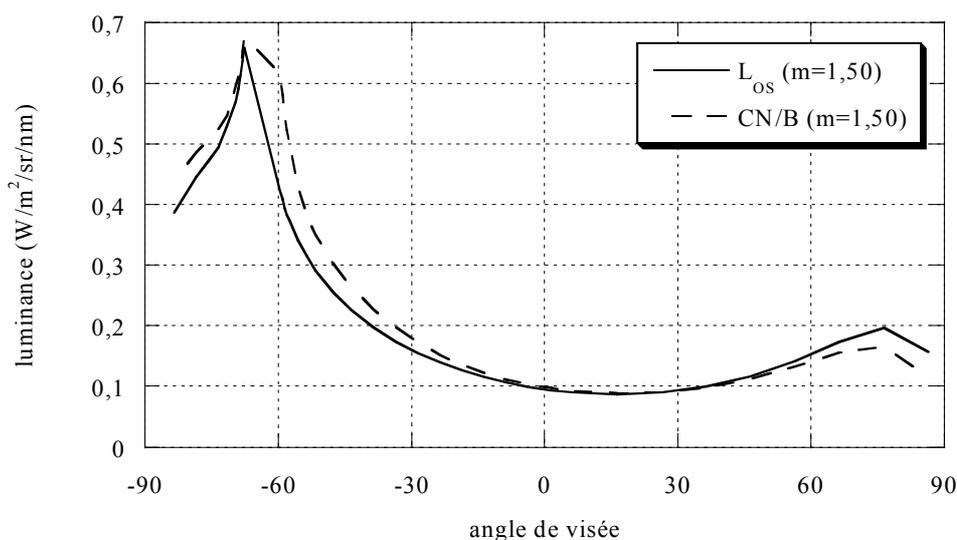


Figure 2-17 : Comparaison entre la luminance mesurée et la luminance simulée avec un indice $m=1,50$

Les figures précédentes (Figure 2-15, Figure 2-16 et Figure 2-17) montrent des exemples de simulations de luminances et les comptes numériques mesurés le 20/01/2001. Pour cet exemple, c'est le modèle $m = 1,45$ qui est retenu.

3-2-2-2 Résultats

Le code d'étalonnage Rayleigh a été appliqué à toutes les mesures disponibles (été 1999, hiver 1999-2000 et printemps 2000). Nous disposons ainsi de très nombreuses estimations des coefficients B_{380} , B_{440} et B_{550} . Les résultats sont reportés dans le Tableau 2-9. Les valeurs données ont été moyennées sur environ vingt-cinq jours, le nombre de points étant le nombre de plans principaux utilisés pour faire cette moyenne.

Les valeurs données ci-dessous correspondent au gain électronique avec lequel les mesures ont été réalisées, c'est-à-dire $g_k = 10$. Elles sont donc directement comparables aux valeurs données Tableau 2-6. À 550 et 440, l'écart entre le coefficient Rayleigh et le coefficient de la sphère du LOA est de 15 % (juin 1999). L'écart maximal entre deux coefficients représente 10 % de la valeur moyenne à 380, 12 % à 440 et 15 % à 550 nm. Si l'on compare ces résultats à ceux obtenus sur sphère (de 3 à 21 % d'écart selon la longueur d'onde, avec une médiane à 9 %), on peut conclure que cette variation reste acceptable.

Tableau 2-9 : Coefficients d'étalonnage Rayleigh B_{380} , B_{440} et B_{550} obtenus en 1999-2000

date	B_{380}	nombre	B_{440}	nombre	B_{550}	nombre
juin 1999	6173	57	15777	57	27639	47
juillet-août 1999	6117	81	16213	71	29364	40
nov-déc 1999	7436	45	18608	43	33022	23
janvier 2000	7012	23	17598	23	29252	20
mars 2000	6716	53	17744	46	32018	33
avril 2000	6727	74	16955	64	29162	44
mai 2000	6339	130	16556	112	29902	67
moyenne	6538	463	16864	416	30056	274

3-2-2-3 Bilans d'erreur

Estimation approchée de la précision de la méthode

Exprimons la luminance descendante en négligeant la réflexion de surface :

$$L = L_R + L_a = \frac{f}{4\mu} [\tau_R P_R + \omega_0 \tau_a P_a] \quad \text{équation 2-16}$$

avec f terme correctif de la diffusion multiple, dépendant peu du modèle exact d'aérosol, P_R la fonction de phase de diffusion des molécules, P_a la fonction de phase de diffusion des aérosols.

Nous allons maintenant calculer l'erreur théorique sur la luminance. En différenciant l'équation 2-16, nous obtenons :

$$\frac{\Delta L}{L} = \frac{[P_R \Delta \tau_R \oplus \omega_0 P_a \Delta \tau_a \oplus \omega_0 \Delta P_a \tau_a \oplus \Delta \omega_0 P_a \tau_a]}{P_R \tau_R + \omega_0 P_a \tau_a} \quad \text{équation 2-17}$$

où \oplus indique une somme quadratique. On prend comme ordre de grandeur $\omega_0 = 0,8$, $P_a = 0,2$ et $P_R = 1$. Nous considérons une erreur de 5 hPa sur la pression atmosphérique, P_s , ce qui donne :

$$\frac{\Delta P_s}{P_s} = 0,005, \text{ donc d'après l'équation 1-33 : } \frac{\Delta \tau_R}{\tau_R} = 0,005.$$

Enfin, nous considérons une erreur sur l'albédo de simple diffusion de 0,1 (Devaux *et al.*, 1998), et nous prenons comme valeur de l'épaisseur optique aérosol la valeur moyenne d'une journée d'étalonnage. Le Tableau 2-10 indique les incertitudes utilisées pour les calculs, l'incertitude $\Delta \tau_a$ (probablement surestimée) est calculée à partir de $\Delta \tau$ (équation 2-10).

Tableau 2-10 : Incertitudes prises en compte pour l'étalonnage Rayleigh

Canal	$\Delta \tau_a$	$\Delta \tau_R$	$\Delta \omega_0$	ΔP_a
380	0,017	0,0023	0,1	0,05
440	0,013	0,0012	0,1	0,05
550	0,008	0,0004	0,1	0,05

L'erreur sur le coefficient d'étalonnage est directement donnée par l'erreur sur la luminance, nous obtenons (Tableau 2-11) une erreur comprise entre 1,7 et 4,1% sur les coefficients B_{380} , B_{440} et B_{550} .

Tableau 2-11 : Erreurs sur l'estimation du coefficient d'étalonnage B_k

Canal	Erreur (%)
380	1,72
440	2,69
550	4,13

Étude de sensibilité à l'épaisseur optique

Nous évaluons maintenant l'influence d'une erreur sur les épaisseurs optiques Rayleigh et aérosols : nous avons simulé la luminance avec le code des OS et transformé cette luminance en comptes numériques avec un coefficient arbitraire B_{k0} . Les simulations ont été effectuées systématiquement pour les trois indices et pour trois valeurs du paramètre de Junge ($\nu=-3,5$; $\nu=-4$; $\nu=-4,5$). Nous avons ensuite utilisé nos comptes numériques simulés en entrée du code d'étalonnage Rayleigh. Nous calculons enfin l'erreur commise en comparant le coefficient retrouvé B_k^i pour chaque poste i avec le coefficient exact B_{k0} (équation 2-18).

$$\Delta B_k^i = \frac{|B_k^i - B_{k0}|}{B_{k0}} \quad \text{équation 2-18}$$

Nous donnons, dans les paragraphes suivants, les écarts moyens des coefficients retrouvés pour toutes les simulations.

Épaisseur optique aérosol

Pour examiner l'influence de l'épaisseur optique aérosol sur la précision de l'étalonnage, nous avons simulé la luminance dans le plan principal en prenant $\tau_a(550)=0,245$ alors que le code prenait une visibilité de 23 km ($\tau_a(550)=0,235$), ce qui correspond à une erreur sur $\tau_a(550)$ de 0,01. Le tableau suivant reporte l'erreur sur le coefficient B_k .

Tableau 2-12 : Propagation de l'erreur(en %) sur l'épaisseur optique aérosol sur le coefficient B_k

Canal	$\Delta B_k/B_k$ moyen
380 nm	0,32
440 nm	0,11
550 nm	4,59

Épaisseur optique Rayleigh

Nous évaluons ici l'erreur introduite dans le calcul du coefficient d'étalonnage si l'épaisseur optique Rayleigh est surestimée. Pour cela, nous simulons la luminance avec τ_R calculé pour une pression de surface de 980 mb ($\tau_R = 0,444$ à 380, 0,232 à 440 et 0,094 à 550 nm) ; le code Rayleigh utilisant des épaisseurs optiques calculées avec une pression de surface de 1013 mb ($\tau_R = 0,460$ à 380, 0,241 à 440 et 0,097 à 550 nm). Nous constatons Tableau 2-13 que le poste d'erreur *a priori* le plus lourd de conséquences entraîne une erreur faible à 380 et 440 nm, qui devient importante à 550 nm.

Tableau 2-13 : Propagation de l'erreur (%) sur l'épaisseur optique Rayleigh sur le coefficient B_k

Canal	ΔB_k moyen
380 nm	1,48
440 nm	2,21
550 nm	6,70

Bilan

L'erreur totale induite par ces facteurs est calculée par :

$$\Delta B_k^{\text{total}} = \sqrt{(\Delta B_k^{\text{aérosol}})^2 + (\Delta B_k^{\text{Rayleigh}})^2} \quad \text{équation 2-19}$$

Tableau 2-14 : Erreur totale sur le coefficient d'étalonnage B_k

Bande k	ΔB_k moyen
380 nm	1,51
440 nm	2,21
550 nm	8,12

3-3-3-3 Bilan d'erreur expérimental

Le code d'étalonnage a été appliqué à toutes les mesures disponibles, nous pouvons donc déterminer la dispersion des mesures sur environ une année. Dans cette dispersion intervient entre autres la perte de sensibilité de l'instrument, mais nous avons vu au § 3-1-3 que la perte de sensibilité est peu importante sur cette période.

Les tableaux suivants reportent les coefficients moyens, l'écart-type de la distribution et la précision. La précision donnée calculée par l'équation 2-20, ce qui permet de la comparer aux valeurs données dans les Tableau 2-11 et Tableau 2-14.

$$\frac{\Delta B}{B} = \frac{\sigma}{B} \quad \text{équation 2-20}$$

Tableau 2-15 : Dispersion sur les coefficients Rayleigh, $\lambda = 380 \text{ nm}$

date	B	σ	$\Delta B/B$ (%)
06 1999	6173	219	3,54
07-08 1999	6117	383	6,26
11-12 1999	7436	731	9,83
01 2000	7012	381	5,44
03 2000	6716	609	9,06
04 2000	6727	489	7,27
05 2000	6339	353	5,57

Tableau 2-16 : Dispersion sur les coefficients Rayleigh, $\lambda = 440 \text{ nm}$

date	moyenne	σ	$\Delta B/B$ (%)
06 1999	15777	713	4,52
07-08 1999	16213	914	5,64
11-12 1999	18608	2338	12,57
01 2000	17598	1492	8,48
03 2000	17744	1445	8,15
04 2000	16955	2176	12,84
05 2000	16556	727	4,39

Tableau 2-17 : Dispersion sur les coefficients Rayleigh, $\lambda = 550 \text{ nm}$

date	moyenne	σ	$\Delta B/B$ (%)
06 1999	27639	1517	5,49
07-08 1999	29364	1600	5,45
11-12 1999	33022	3339	10,11
01 2000	29252	5964	20,39
03 2000	32018	2386	7,45
04 2000	29162	1426	4,89
05 2000	29902	1951	6,53

La précision expérimentale, liée à la dispersion des estimations du coefficient d'étalonnage, est moins bonne que la précision des bilans d'erreur.

3-2-3 Étalonnage interbande

3-2-3-1 Principe

Le radiomètre utilisant les mêmes voies (canons, détecteurs, optiques) pour les mesures de luminance et les mesures d'éclairement, nous pouvons établir un lien entre les coefficients d'étalonnage en luminance B_k et les coefficients d'étalonnage en éclairement A_k . Il suffit pour cela de rappeler que la luminance mesurée par le radiomètre est un flux énergétique par unité d'angle solide et par unité de surface et que l'éclairement est un flux par unité de surface. Avec la définition que nous avons choisie pour les coefficients A_k (équation 2-4) (A_k en $\text{CN.W}^{-1}.\text{m}^2$) et B_k (équation 2-11) (B_k en $\text{CN.W}^{-1}.\text{m}^2.\text{sr}$), nous obtenons donc :

$$\frac{A_k}{g_k^A} = \frac{B_k}{g_k^B} \times \frac{1}{\Omega_k} \quad \text{équation 2-21}$$

où :

- g_k^B est le gain électronique pour les mesures de luminance (voir équation 2-1),
- g_k^A est le gain électronique pour les mesures d'éclairement,
- Ω_k est l'équivalent d'un angle solide, il représente le champ de visée effectif de l'instrument.

Nous pouvons donc déterminer la valeur de Ω_k , en utilisant les coefficients A_k obtenus par l'étalonnage Bouguer et les coefficients B_k obtenus par l'étalonnage Rayleigh (donc pour les canaux 380, 440 et 550 nm). D'autre part, la variation de Ω_k avec la longueur d'onde est très faible. Elle est principalement due à la variation spectrale de l'indice de réfraction des optiques, que nous considérerons comme négligeable dans la plage d'utilisation [380 nm, 1600 nm]. L'écart sur la valeur de Ω_k estimée pour le détecteur Silicium et pour le détecteur Germanium ne semble pas significative ; il est de 0,5 % à 870 nm et de -0,9 % à 1020 nm (en utilisant les coefficients B_k du LOA et les A_k de l'été 1999). Ceci reste dans l'ordre de grandeur de l'écart entre les estimations des différents canaux.

Nous connaissons donc la valeur de $\Omega_k \equiv \Omega$, et ceci va nous permettre de propager l'étalonnage Rayleigh aux plus grandes longueurs d'onde. En effet, nous pouvons écrire :

$$\Omega = \frac{B_k/g_k^B}{A_k/g_k^A} \quad \text{équation 2-22}$$

L'équation 2-22 étant valable quel que soit le canal k, il suit immédiatement la relation :

$$\frac{A_k/g_k^A}{B_k/g_k^B} = \frac{A_i/g_i^A}{B_i/g_i^B} \quad \text{équation 2-23}$$

donc :

$$\frac{B_i}{g_i^B} = \frac{A_i}{g_i^A} \frac{B_k/g_k^B}{A_k/g_k^A} \quad \text{équation 2-24}$$

Connaissant A_i et A_k grâce à l'étalonnage Bouguer et B_k grâce à l'étalonnage Rayleigh, nous obtenons B_i pour les canaux 670, 870, 1020 et 1600 nm.

3-2-3-2 Résultats

En utilisant les coefficients A_k (voir Annexe 2) et les coefficients B_k donnés Tableau 2-9 nous calculons Ω_k pour $k=380, 440$ et 550 nm. Nous pouvons également utiliser les coefficients B_k obtenus sur sphère pour obtenir Ω_k à 670, 870 et 1020 nm.

Les deux tableaux suivants donnent les valeurs de Ω_k obtenues avec les deux types de coefficients B_k . Les coefficients A_k utilisés pour le calcul sont les coefficients moyens pour les trois périodes, été 1999, hiver 1999-2000 et printemps 2000.

Tableau 2-18 : Ω_k calculé avec les coefficients sur sphère. La moyenne et l'écart-type ne prennent pas en compte les valeurs de Ω_k obtenues à 380 et 440 nm

Canal k	Ω_k LOA (juin 1999)	Ω_k DOTA (novembre 1999)
380 Si	0,688	10,212
440 Si	0,768	1,086
550 Si	0,775	0,884
670 Si	0,763	0,869
870 Ge	0,786	0,836
870 Si	0,783	0,870
1020 Ge	0,754	0,801
1020 Si	0,743	0,831
Moyenne	0,767	0,848
Écart-type	0,017	0,031

Tableau 2-19 : Ω_k calculé avec les coefficients Rayleigh

		Ω_k été 1999	Ω_k hiver 1999-2000	Ω_k printemps 2000
380 Si	moyenne	0,78	1,14	0,82
	écart-type	0,035	0,103	0,058
	nombre	136	69	254
	$\Delta\Omega/\Omega$ (%)	0,39	1,09	0,45
440 Si	moyenne	0,77	0,98	0,82
	écart-type	0,036	0,106	0,055
	nombre	125	65	217
	$\Delta\Omega/\Omega$ (%)	0,42	1,35	0,45
550 Si	moyenne	0,67	0,80	0,71
	écart-type	0,042	0,090	0,052
	nombre	86	47	144
	$\Delta\Omega/\Omega$ (%)	0,68	1,64	0,60

Les coefficients A_k de l'hiver 1999-2000 ayant les mêmes problèmes de dispersion que les CN_0 , les Ω_k obtenus pour cette période sont sujets à caution ; nous les écartons donc. De même, les Ω_k obtenus avec la sphère du DOTA ne sont pas retenus, leur dispersion étant significativement plus grande que ceux obtenus avec la sphère du LOA ; ces derniers nous donnent une valeur indicative. L'incertitude plus importante sur Ω_{550} (Tableau 2-19) nous amène à ne considérer que Ω_{380} et Ω_{440} . Enfin, les valeurs obtenues pour le printemps 2000 ont une dispersion plus grande que celles de l'été 1999, nous ne les utiliserons pas. Nous effectuons donc une moyenne sur 261 estimations de Ω .

Finalement, nous arrivons à une valeur unique pour Ω : $\Omega = 0,774 \pm 0,003$.

Cette valeur de Ω correspond à un demi angle d'ouverture du canon de 28° , ce qui n'est bien sûr pas le cas. Ceci est dû aux dynamiques différentes entre l'électronique de la voie luminance et de la voie éclairément : un facteur 200 doit être pris en compte. Nous aboutissons à une valeur « réelle » de Ω de $3,82 \cdot 10^{-3}$. Cette valeur correspond à un demi angle d'ouverture de $2,00^\circ$ bien plus proche de la valeur donnée par le fabricant ; $1,5^\circ$.

Nous pouvons maintenant propager l'étalonnage sur la diffusion Rayleigh aux plus grandes longueurs d'onde pour les canaux 670, 870 Si, 870 Ge, 1020 Si et 1020 Ge. Nous ne pourrions pas calculer le coefficient B_{1600} , puisque A_{1600} nous est inconnu.

Tableau 2-20 : Coefficients B_k (en $CN/(W \cdot m^{-2} \cdot nm^{-1} \cdot sr^{-1})$) en luminance avec les deux méthodes

Canal	Sphère LOA	Interbande été 1999	Interbande printemps 2000
380 Si	5458	6143	6183
440 Si	15873	16007	15902
550 Si	32617	32580	32265
670 Si	44660	45325	44992
870 Ge	9579	9427	9623
870 Si	44431	43908	43648
1020 Ge	15266	15674	15891
1020 Si	34916	36379	35469

Si l'on considère la comparaison avec les coefficients de la sphère du LOA, nous obtenons un écart compris entre 0,1 % et 4,8 % avec une médiane de 1,5 % l'été, et un écart compris entre 0,5 % et 4,2% avec une médiane à 1,3 % au printemps. Ces valeurs confirment la validité de l'étalonnage *in situ* par la méthode interbande.

3-2-3-3 Bilan d'erreur

Il reste à évaluer l'incertitude sur les coefficients interbande. L'équation 2-22 nous donne :

$$\frac{\Delta B_k^I}{B_k^I} = \sqrt{\left(\frac{\Delta \Omega}{\Omega}\right)^2 + \left(\frac{\Delta A_k^I}{A_k^I}\right)^2} \quad \text{équation 2-25}$$

Nous obtenons les incertitudes reportées ci-dessous pour l'été 1999 et le printemps 2000 :

Tableau 2-21 : Incertitude sur les coefficients interbande (en pourcentage)

Canal	550	670	870 Si	870 Ge	1020 Si	1020 Ge
$\Delta B/B$ été	1	0,7	0,5	0,6	0,4	0,6
$\Delta B/B$ printemps	0,7	0,6	0,6	0,7	0,5	0,6

3-2-4 Validation : campagne du Pic du Midi. Conclusion sur l'étalonnage en luminance

3-2-4-1 Étalonnage par mesure de la réflectance d'une plaque de halon.

Le principe est d'utiliser l'éclairement solaire direct, réfléchi par une plaque de halon comme source d'étalonnage. Le photomètre est fixé verticalement au dessus d'une plaque de halon orientable en angle zénithal. Un cache permet d'occulter le Soleil (Figure 2-18). On peut donc mesurer le signal total et le signal diffus réfléchis par la plaque.

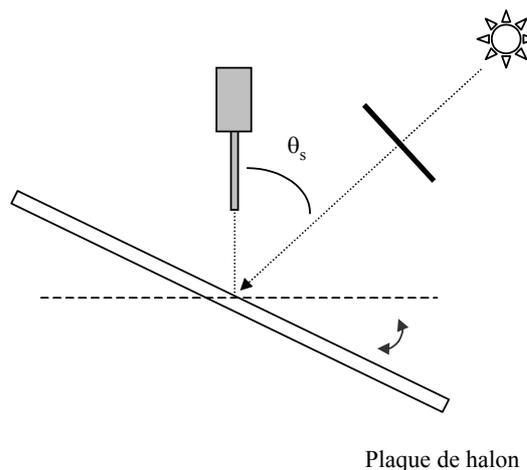


Figure 2-18 : Principe de l'étalonnage en luminance : le radiomètre vise la plaque de halon au nadir, un cache amovible permet d'occulter le soleil

On obtient de la sorte le signal direct :

$$CN_{\text{Direct}} = CN_{\text{Total}} - CN_{\text{diffus}} \quad \text{équation 2-26}$$

La mesure quasi simultanée de l'épaisseur optique τ permet de transférer l'éclairement solaire hors atmosphère au niveau du sol :

$$E_s^0(\theta_s) = E_s^{\text{TOA}}(\theta_s) \cdot e^{-\tau/\mu_s} \quad \text{équation 2-27}$$

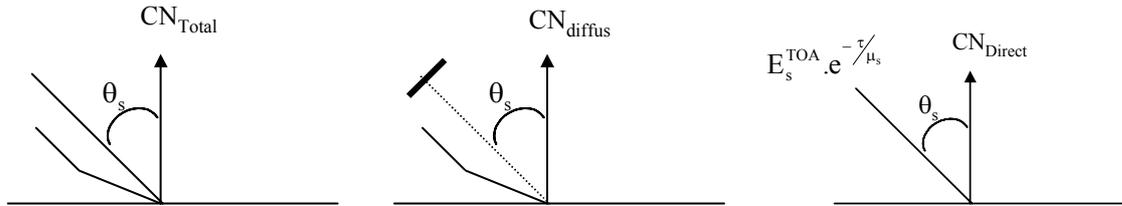


Figure 2-19 : Représentation schématique des quantités connues ou mesurées

La réflectance de la plaque, ρ_{plaque} est considérée comme étant indépendante de l'azimut. Il faut l'évaluer de façon précise en fonction des angles θ_s et θ_v . Pour cela, on utilise le principe de réciprocité : la luminance hémisphérique mesurée par un détecteur se déplaçant est équivalente à la luminance hémisphérique d'une source se déplaçant, mesurée par un détecteur fixe. Si l'on dispose d'un jeu d'angles suffisant, on peut intégrer les CN_{Direct} pour calculer un « $CN_{\text{plaque}}(\text{hémisphérique})$ ». Enfin, en comparant cette valeur à la valeur de réflectance hémisphérique de la plaque (donnée constructeur), nous obtenons un coefficient c qui nous permet de remonter aux réflectances bidirectionnelles. Cependant, les valeurs obtenues pour la réflectance n'étaient pas réalistes, car très peu de mesures ont été effectuées pour des angles rasants. On a donc utilisé les réflectances hémisphériques de plaque de halon déterminées par Cosnefroy (Cosnefroy, 1994).

On calcule ensuite la luminance montante de la plaque à partir de la réflectance :

$$L_{\text{Direct}}(\theta_s, \theta_v) = \frac{\rho_{\text{plaque}}(\theta_s, \theta_v) \cdot \mu_s \cdot E_s^{\text{TOA}} \cdot e^{-\tau/\mu_s}}{\pi \cdot d^2} \quad \text{équation 2-28}$$

Dans l'équation 2-28, $L_{\text{Direct}}(\theta_s, \theta_v)$ est la luminance directe montant de la plaque

Le coefficient d'étalonnage en luminance B_{plaque} est alors obtenu par :

$$B_{\text{plaque}} = \frac{CN_{\text{Direct}}(\theta_s, \theta_v)}{L_{\text{Direct}}(\theta_s, \theta_v)} \quad \text{équation 2-29}$$

Les valeurs des coefficients d'étalonnage ainsi obtenues sont reportées plus loin dans le Tableau 2-23.

3-2-4-2 Étalonnage Rayleigh au Pic du Midi

Quelques mesures de luminance dans le plan principal ayant été réalisées, nous pouvons les employer pour l'étalonnage Rayleigh. Les conditions étant très différentes des conditions définies pour le code Rayleigh, nous n'avons pas employé exactement la même méthode. Nous

avons simulé la luminance en prenant une épaisseur τ_a presque nulle et une épaisseur optique Rayleigh correspondant à l'altitude du Pic du Midi (Figure 2-20). Puis nous avons calculé le coefficient moyen sur le domaine d'angle de diffusion $\Theta \in [40^\circ, 120^\circ]$.

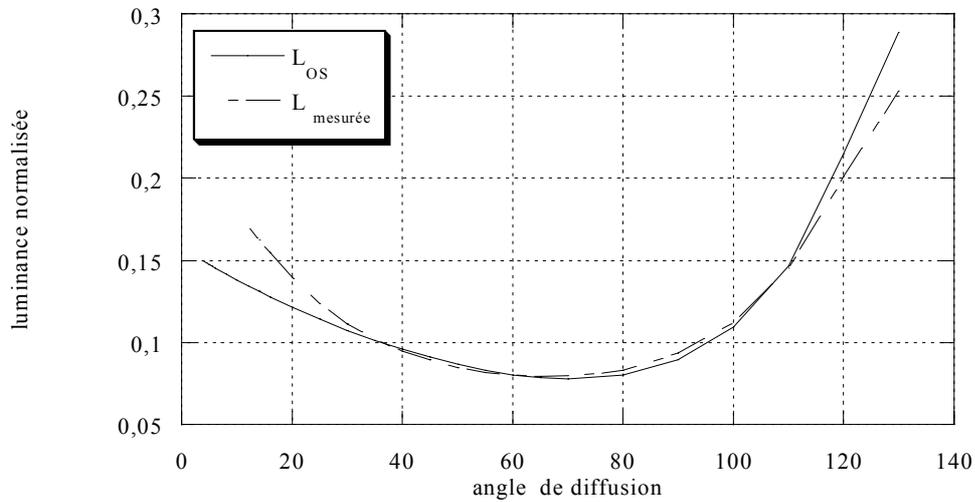


Figure 2-20 : Luminance mesurée et luminance simulée, le 23/06/2000 à 8h45, $\lambda=380 \text{ nm}$

Nous arrivons ainsi à 18 évaluations des coefficients B_{380} , B_{440} et B_{550} que nous reportons dans le Tableau 2-22.

Tableau 2-22 : Coefficients Rayleigh obtenus au Pic du Midi, écart-type et incertitude

Date	θ_s	$B(380)$	$\sigma(380)$	%	$B(440)$	$\sigma(440)$	%	$B(550)$	$\sigma(550)$	%
22/06	73,28	8777	240	0,79	22436	1333	1,72	46519	5652	3,51
	67,06	9341	211	0,65	23889	1062	1,28	48959	4737	2,79
	63,19	9623	247	0,74	24854	1238	1,44	51415	5602	3,15
23/06	52,04	10940	286	0,75	28539	818	0,83	57415	3213	1,62
	44,62	11450	347	0,87	29703	1053	1,02	61044	5713	2,70
	78,63	10902	353	0,94	23294	461	0,57	45628	1675	1,06
	69,89	9021	210	0,67	21688	336	0,45	41536	947	0,66
	74,53	8582	172	0,58	20461	345	0,49	38231	1065	0,80
24/06	82,46	7850	114	0,42	19261	362	0,54	34359	1205	1,01
	75,12	8323	137	0,48	20512	320	0,45	38980	1059	0,78
	70,76	8572	184	0,62	21199	448	0,61	40729	1384	0,98
	65,47	8669	163	0,54	21595	362	0,48	41973	687	0,47
	59,56	8874	174	0,57	22025	443	0,58	42518	1182	0,80
25/06	56,36	8958	183	0,59	22249	450	0,58	42845	1053	0,71
	79,38	7501	176	0,68	18369	613	0,96	34180	1900	1,61
	76,13	7620	141	0,54	18772	484	0,74	35876	1757	1,41
	72,95	7799	210	0,78	19430	818	1,21	39842	5312	3,85
	47,02	8337	105	0,36	20788	187	0,26	40266	1154	0,83
moyenne		8983			22170			43462		
σ		1203			3067			7370		
%		3,16			3,26			4,00		

Nous constatons une très grande différence entre ces coefficients et ceux obtenus par les autres méthodes. Cette différence est suffisante pour disqualifier ces résultats. Nous l'attribuons à un éventuel problème de mesures pour les plans principaux, sans toutefois pouvoir en être certains.

3-2-4-3 Résultats, conclusion sur l'étalonnage en luminance

Le Tableau 2-23 offre un panorama des coefficients en luminance obtenus sur sphère (LOA, juin 1999), des coefficients Rayleigh et interbande obtenus à La Crau, et des coefficients obtenus au Pic du Midi

Tableau 2-23 : Résumé des coefficients issus des différentes méthodes

Canal	LOA (06/99)	Interbande La Crau	Plaque (06/00)	Interbande Pic du Midi	Rayleigh Pic du Midi
380 Si	–	6415	5511	6375	8983
440 Si	–	16499	14238	16294	22170
550 Si	32590	34000	29852	33827	43462
670 Si	44620	47411	41785	47915	–
870 Ge	9572	9984	9188	10320	–
870 Si	44920	45287	41567	46345	–
1020 Ge	15260	16488	14353	17046	–
1020 Si	35320	36801	30369	35378	–

Si les coefficients interbande varient peu (de 0,5 à 3,9 % d'écart), il n'en va pas de même pour les autres coefficients.

Un étalonnage précis et fiable de la station nécessitera à l'avenir un étalonnage régulier sur sphère, telle que celle du LOA. La méthode *in situ* est confirmée par l'étalonnage sur la sphère du LOA. La détermination de Ω étant faite, il suffit de suivre l'évolution des coefficients en éclairissement A_k pour connaître celle des coefficients B_k . C'est en conclusion la méthode « interbande » qui nous paraît la plus fiable et la moins coûteuse en terme d'interventions sur l'instrument.

4 IMPLANTATION SUR LE SITE

4-1 Le site choisi

Une première campagne a eu lieu en 1997 (Santer *et al.* 1997). Son but était double ; installer le prototype et le tester, choisir le « petit site » et caractériser sa représentativité par rapport au « grand site ». L'emplacement du site a été choisi après un examen des comptes numériques des images SPOT, de telle sorte que les comptes numériques des sites soient équivalents.

Le mât est fixé dans une petite base de béton, au milieu du petit site. Ce petit site est situé dans le coin Est du grand site (Figure 2-7). Les deux sites ont été régulièrement échantillonnés avec le radiomètre MIR du LOA, dont les canaux sont centrés à 550, 650, 850 et 1650 nm. Les résultats (reportés au chapitre 4 dans le Tableau 4-3) montrent que le petit site est plus réfléchissant dans ces quatre canaux que le grand site.

Ce résultat est corroboré par les mesures SPOT effectuées pendant cette campagne ; les comptes numériques moyens relevés sur le petit site sont plus grands que ceux relevés sur le grand site, bien que la tendance soit moins nette.

Tableau 2-24 : Valeurs moyennes des comptes numériques SPOT des deux sites.

Canal	CN petit site	CN grand site
B1	115	112
B2	83,5	79
B3	109,5	104

Une fois l'instrument installé sur son mât, il faut vérifier que toutes les mesures prévues sont effectuées et les valider. Les épaisseurs optiques ont été validées par comparaison avec les épaisseurs optiques mesurées par un photomètre Cimel portable ayant des canaux communs, les luminances par comparaison avec des simulations par les OS. Divers problèmes se posent : les mesures de luminances de surface sont incomplètes et l'étalonnage sur sphère est impossible. Du point de vue technique et logiciel, l'instrument ne fonctionne pas correctement.

4-2 Période de fonctionnement et problèmes associés

4-2-1 Campagnes de 1998

4-2-1-1 Campagne d'avril 1998

Parallèlement à la campagne d'étalonnage pour la recette en vol de SPOT4, du 18 au 29 avril 1998, nous avons mené une campagne de validation des mesures de la station (Six *et al.* 1999). L'instrument a été modifié, les gains analogiques des mesures Sol sont notamment accessibles.

Cependant, les conditions météorologiques ne laissent que quatre demi-journées propices aux mesures, et de nombreux problèmes se posent encore. L'étalonnage prévu sur la sphère intégrante du DOTA (Toulouse) n'est pas possible : aucun protocole ne permet l'étalonnage en luminance, de plus les batteries sont vides. Il subsiste de nombreux problèmes de fonctionnement de l'instrument au niveau électronique et au niveau logiciel.

Ces contretemps réduisent les mesures à une demi-journée de mesures, le 25 avril au matin. Nous constatons à ce moment que les protocoles Sol ne sont pas complets, seule la boucle $h=5^\circ$ est effectuée ; les onze boucles suivantes ne le sont jamais pour une raison inconnue. Les données sont toujours récupérées par PC, ce qui est peu pratique. Enfin, les mesures de luminances sont très faibles (de l'ordre du courant d'obscurité) et donc inutilisables. Seules les mesures SUN sont exploitables. Elles nous permettent d'effectuer un étalonnage en éclairage.

Nous constatons (Figure 2-21) que les valeurs de l'épaisseur optique moyenne à 1020 et surtout à 1600 nm contredisent la loi de la décroissance de l'épaisseur optique en fonction de la longueur d'onde exprimée par l'équation 1-26. Ceci est illustré dans la figure suivante.

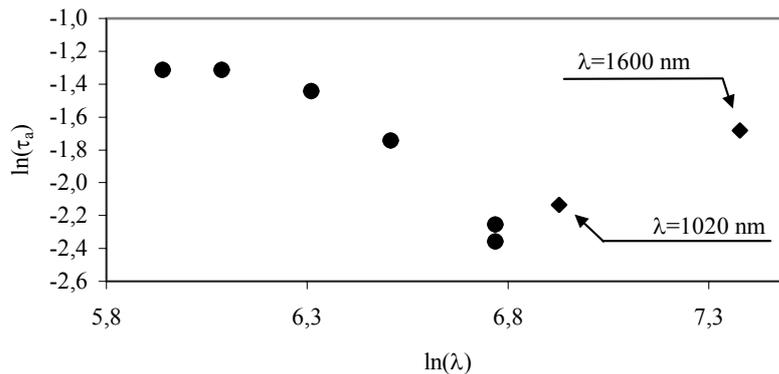


Figure 2-21 : Variation de l'épaisseur optique aérosol moyenne en fonction de la longueur d'onde (25/04/1998)

L'explication de cette surestimation probable de l'épaisseur optique est à chercher du côté des détecteurs. En effet, le détecteur au Silicium nécessite une correction des effets de température à 1020 nm, or celle-ci n'est pas effectuée. À 1600 nm, le problème est plus critique, car on approche de la limite de fonctionnement du détecteur au Germanium, et les effets de températures sont alors impossibles à corriger.

4-2-1-2 Campagne de juin juillet 1998

Après la campagne d'avril, quelques problèmes ont été réglés. Un système de transmission des données par GSM est installé, il est indispensable à une implantation durable sur le site.

La campagne se déroule du 21 juin au 4 juillet. Les premiers essais de transmission des données par GSM ne sont pas satisfaisants, l'instrument est à nouveau modifié. Le 2 juillet, les transmissions des données sont correctes. Par contre, les mesures effectuées les 3 et 4 juillet ne sont toujours pas complètes ; les protocoles sol s'arrêtent après la boucle à 5°. Des problèmes d'alimentation se posent encore. De plus, très peu de mesures ont pu être réalisées car le temps n'était pas favorable ces deux jours. On n'a tout de même pu étalonner l'instrument en éclaircissement avec les mesures du 3 juillet. La station n'est toujours pas opérationnelle, il faut donc la ramener à la société Cimel.

On constate que l'épaisseur optique mesurée à 1020 et 1600 nm, tout comme en avril, semble surestimée. Notons que les coefficients CN₀ obtenus sont différents de ceux de la campagne d'avril, l'instrument ayant été modifié entre-temps.

Courant juillet, l'instrument est réinstallé sur le site après modifications, les problèmes subsistent ; les protocoles Sol sont incomplets, le canal 870 nm (Si) est systématiquement saturé... En août, une partie de ces problèmes est réglée, en particulier le protocole Sol est complet, toutefois l'instrument ne parvient plus à viser le Soleil après les boucles à 20°. En novembre, l'instrument cesse de transmettre ses mesures, il est récupéré en décembre et étalonné en luminance sur la sphère du DOTA.

On constate que l'étalonnage radiométrique sur sphère est peu fiable pour les courtes longueurs d'onde (380 et 440 nm) car la luminance de la sphère est très faible (facteur 100 entre la luminance à 380 et celle à 550 nm).

Finalement, nous avons obtenu un peu plus de trois mois de mesures en 1998. Le Tableau 2-25 indique les périodes de fonctionnement, complet ou incomplet, et les différents événements advenus depuis avril 1998. Les périodes « inexploitable » sont des journées de mauvais temps, les « problèmes de transmission » correspondent aux données manquantes dans les fichiers transmis.

Tableau 2-25: Périodes de fonctionnement en 1998

mois	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	
04																				P	P	P	P	P	e	P	P	P			—	
05																																
06																								P								
07		R	e	P								e	e	e	e	e	e	e	e	e	e	e	e	e	e	T	I	T	e	e	e	s
08	s	I	I	e	e	e	e	e	e	s	e	T	T	T	T	T	T	I	s	s	s	s	s	s	s	s	s	s	s	s	s	s
09	T	s	e	I	e	e	I	e	e	e	T	e	e	e	s	e	T	T	T	T	e	e	e	I	s	s	T	s	e	s	—	
10	e	s	e	I	s	e	e	e	s	e	e	e	e	e	e	e	s	e	s	e	e	s	I	s	I	e	e	e	s	e	s	
11	s	I	I	s	s	s	s	s	s	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	—
12																																

Légende

- E : Journées exploitables
- e : Journées exploitables, fonctionnement incomplet
- S : Journées ensoleillées (ou avec apparitions du soleil)
- s : Journées ensoleillées, fonctionnement incomplet
- I : Journées inexploitable
- R : Périodes d'intervention sur l'appareil.
- : Périodes où l'instrument n'était pas sur le site de la Crau
- T : Problème de transmission
- P : Panne ou mauvais fonctionnement
- : Campagne de mesures

4-2-2 Campagne de 1999

Une quatrième campagne de mesures a lieu du 6 au 25 juin 1999. Nous disposons de plusieurs instruments ; la station, un radiomètre Cimel portable, un radiomètre Cimel CE-318 et un spectromètre de terrain pour caractériser la surface. Divers contretemps (panneau solaire branché à l'envers par le fournisseur, batteries déconnectées...) et la nécessité d'étalonner la station sur sphère réduisent les journées utilisables. Pourtant, les mesures permettront de procéder à un étalonnage de SPOT1, 2 et 4 (Six *et al.*, 1999).

4-2-2-1 Mesures atmosphériques

Le radiomètre automatique CE-318 et le radiomètre portable sont deux instruments commercialisés par Cimel et couramment utilisés pour caractériser l'atmosphère (Holben *et al.*, 1998). Les deux instruments comportent quatre canaux centrés à 440, 670, 870 et 1020 nm en plus d'un ou deux canaux « vapeur d'eau ». Le radiomètre automatique est porté par un robot permettant la visée du soleil et des mesures de luminance dans le plan principal et l'almucantar. Le radiomètre portable permet des visées manuelles du soleil. Les deux instruments étaient présents sur le site lors des campagnes précédentes (Schroeder *et al.*, 2001).

Nous pouvons comparer les mesures atmosphériques des différents instruments. Le problème se posant pour la comparaison des mesures atmosphériques réside dans le fait qu'elles ne sont pas toujours simultanées : les recouvrements se font sur de courtes durées, seulement deux ou trois heures pendant trois journées. Le but de cette comparaison, plutôt que la validation de la méthode de mesure des épaisseurs optiques, est de vérifier le fonctionnement de la station, au niveau du suivi du Soleil en particulier.

Comme on peut le voir sur les figures suivantes (Figure 2-22 à Figure 2-33) l'accord n'est pas très bon entre les instruments (« Station » pour la station d'étalonnage, « Portable » pour le radiomètre portable, « Automatique » pour le radiomètre Cimel « classique »).

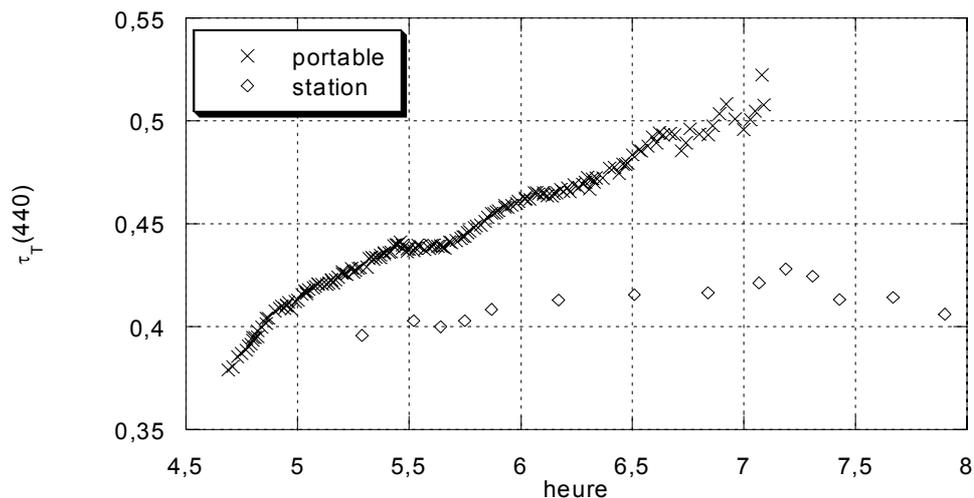


Figure 2-22 : Épaisseur optique totale à 440 nm, mesurée par la station et par le photomètre portable le 12/06/1999 en fonction de l'heure TU

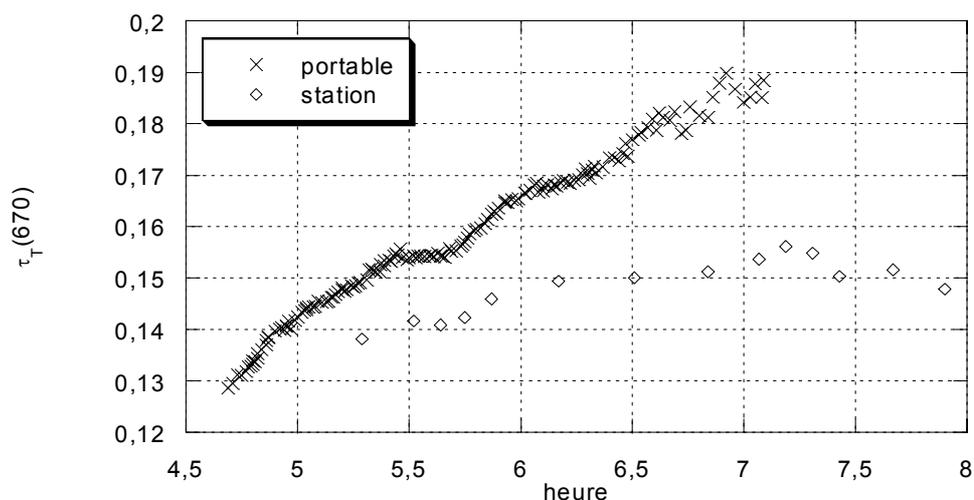


Figure 2-23 : Épaisseur optique totale à 670 nm, mesurée par la station et par le photomètre portable le 12/06/1999 en fonction de l'heure TU

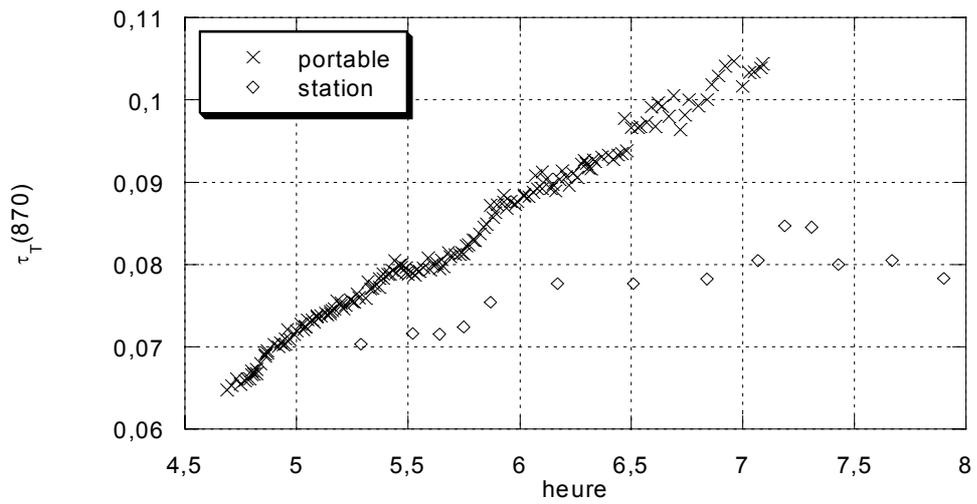


Figure 2-24 : Épaisseur optique totale à 870 nm, mesurée par la station et par le photomètre portable le 12/06/1999 en fonction de l'heure TU

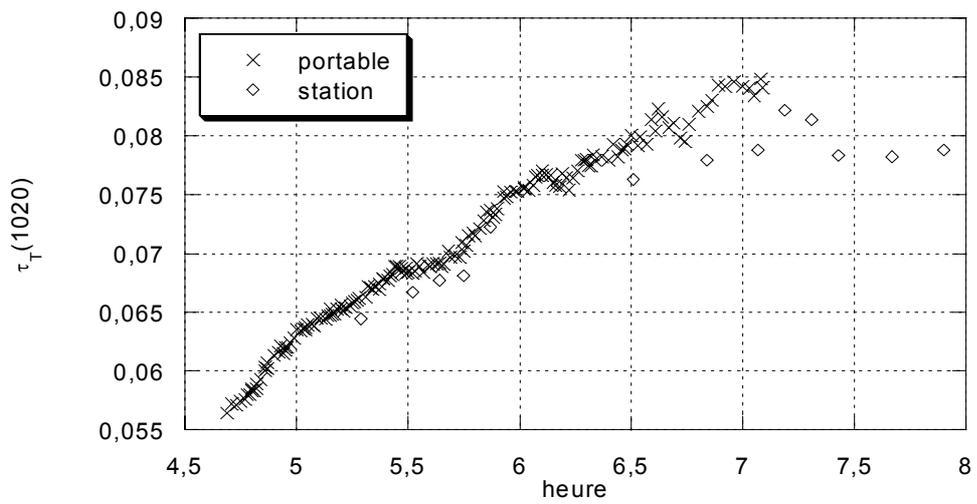


Figure 2-25 : Épaisseur optique totale à 1020 nm, mesurée par la station et par le photomètre portable le 12/06/1999 en fonction de l'heure TU

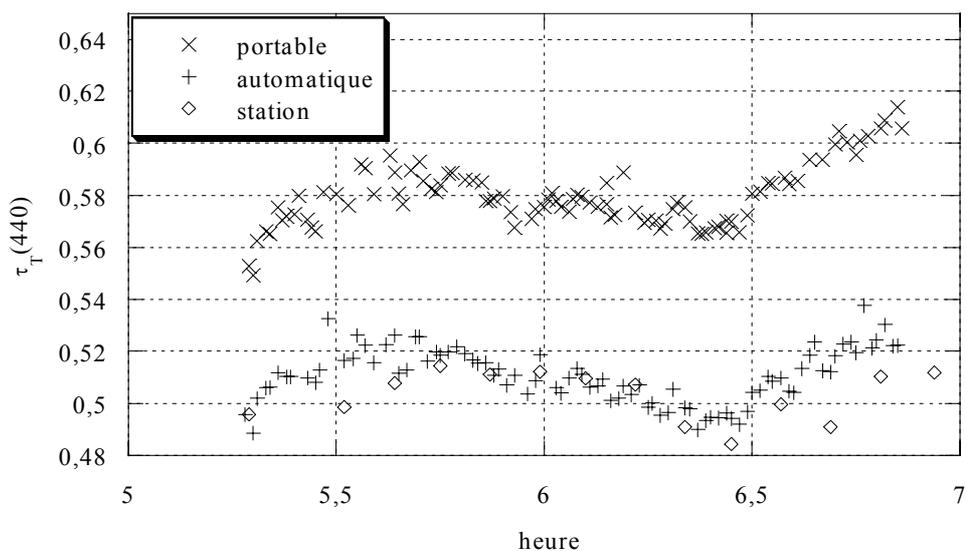


Figure 2-26 : Épaisseur optique totale à 440 nm, mesurée par la station, le photomètre portable et le photomètre automatique le 18/06/99 en fonction de l'heure TU

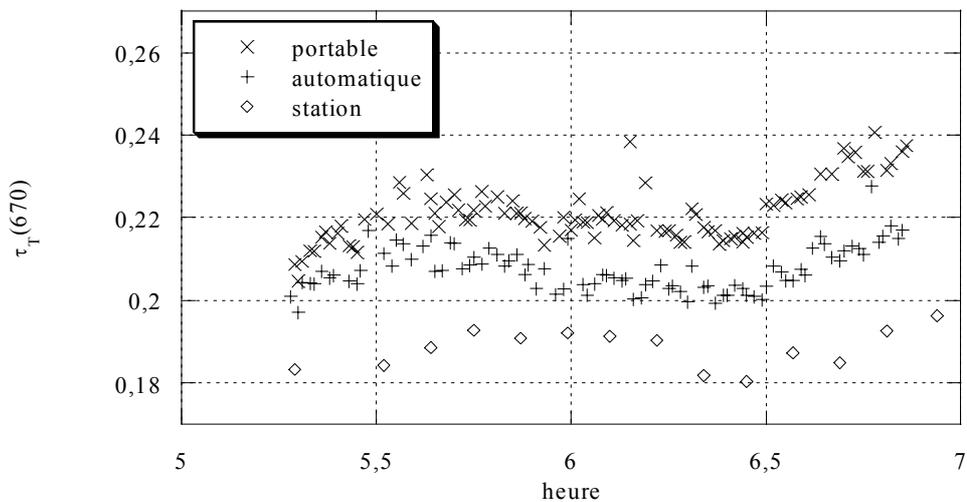


Figure 2-27 : Épaisseur optique totale à 670 nm, mesurée par la station, le photomètre portable et le photomètre automatique le 18/06/99 en fonction de l'heure TU

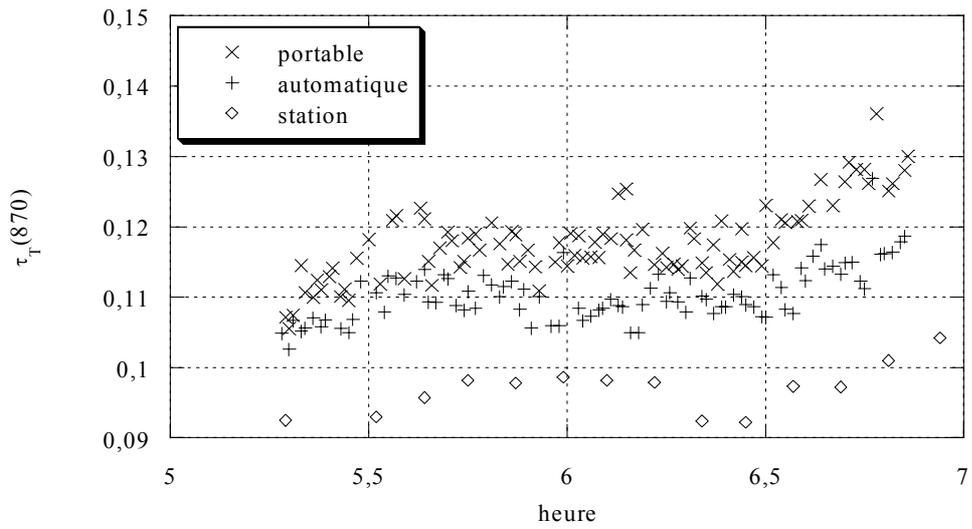


Figure 2-28 : Épaisseur optique totale à 870 nm, mesurée par la station, le photomètre portable et le photomètre automatique le 18/06/99 en fonction de l'heure TU

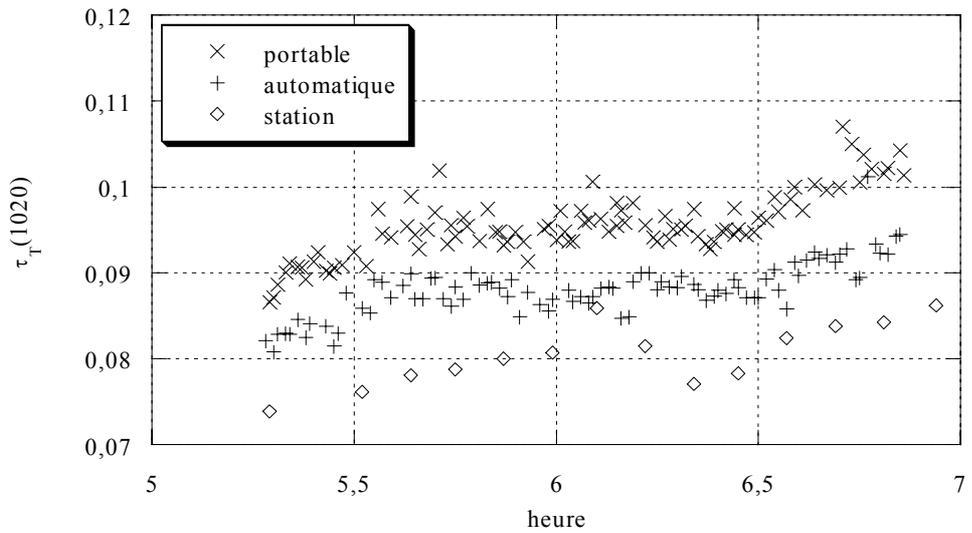


Figure 2-29 : Épaisseur optique totale à 1020 nm, mesurée par la station, le photomètre portable et le photomètre automatique le 18/06/99 en fonction de l'heure TU

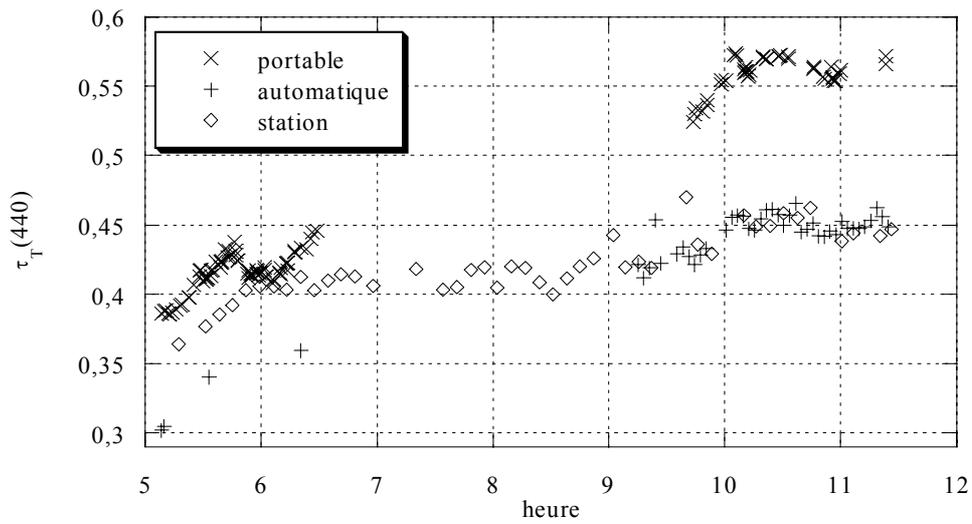


Figure 2-30 : Épaisseur optique totale à 440 nm, mesurée par la station, le photomètre portable et le photomètre automatique le 19/06/99 en fonction de l'heure TU

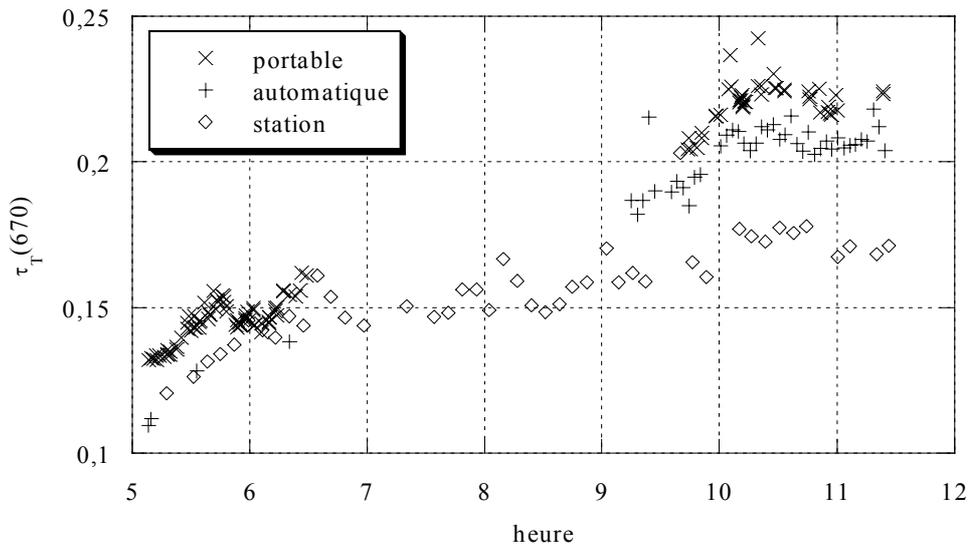


Figure 2-31 : Épaisseur optique totale à 670 nm, mesurée par la station, le photomètre portable et le photomètre automatique le 19/06/99 en fonction de l'heure TU

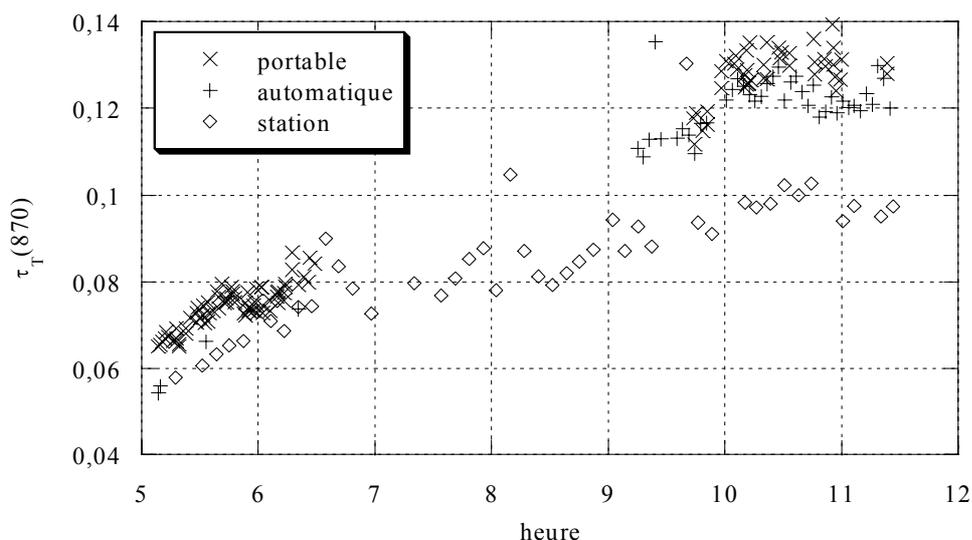


Figure 2-32 : Épaisseur optique totale à 870 nm, mesurée par la station, le photomètre portable et le photomètre automatique le 19/06/99 en fonction de l'heure TU

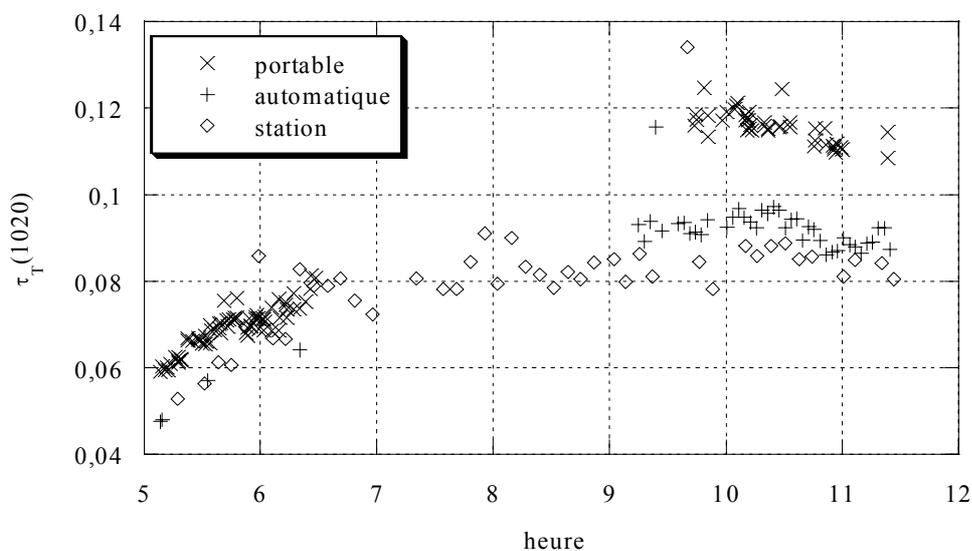


Figure 2-33 : Épaisseur optique totale à 1020 nm, mesurée par la station, le photomètre portable et le photomètre automatique le 19/06/99 en fonction de l'heure TU

Une explication possible à cet écart repose sur une erreur d'étalonnage. Or, comme on l'a vu (équation 2-10) ; l'erreur due au coefficient d'étalonnage est inversement proportionnelle à la masse d'air : elle est minimale le matin, maximale à midi et de nouveau minimale le soir. Donc, quelle que soit la date, l'écart devrait varier de la même façon en fonction de l'heure. Les mesures du 12/06 et du 19/06 semblent conforter cette hypothèse. Celles du 18/06 n'ont pas le même comportement, mais les mesures cessent vers 7 heures (TU) le matin, lorsque la masse d'air est encore élevée. L'étalonnage des trois instruments, réalisé sur le site, a été soigneusement vérifié, toutefois il y a peu de points pour les radiomètres portable et

automatique. Le portable semble surestimer l'épaisseur optique. Par contre, les épaisseurs optiques mesurées par les deux instruments automatiques sont en accord, à l'incertitude près.

4-2-2-2 Mesures de réflectance de surface

Les deux sites, grand et petit, ont été échantillonnés avec un spectromètre de terrain. Le spectromètre permet de déterminer la réflectance du sol par comparaison entre la luminance du sol mesurée à la verticale à hauteur d'épaule et la luminance d'une plaque de halon mesurée dans les mêmes conditions. Le champ de l'instrument est de 8° , le viseur tenu à la hauteur de l'épaule donne un diamètre au sol d'environ 20 cm. Chaque point de mesure résulte en un spectre de réflectance, la longueur d'onde variant de 350 à 2500 nm par pas de 1 nm (Figure 2-34). On voit apparaître sur cette figure des variations brutales de la réflectance, dues à des bandes d'absorption ; elles sont bien sûr hors des bandes de la station (Figure 2-36).

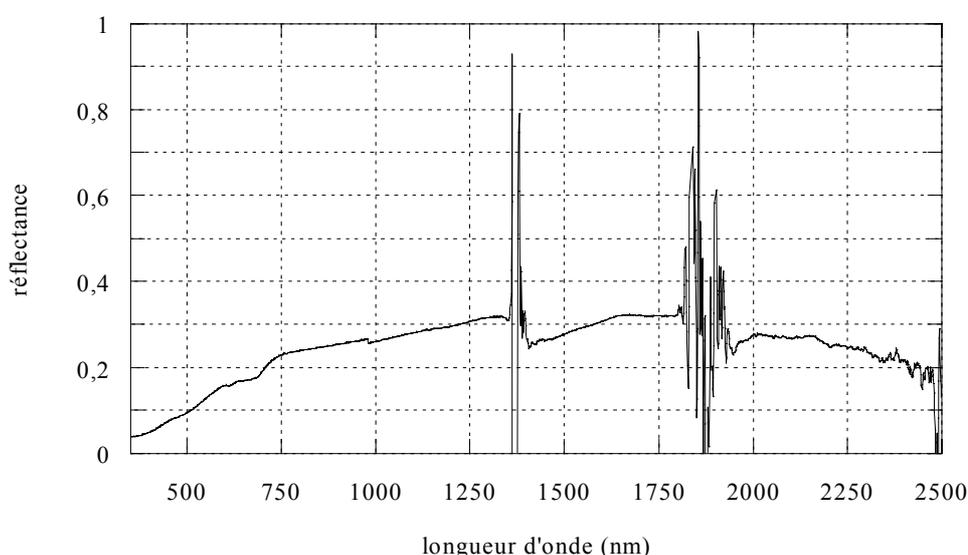


Figure 2-34 : Réflectance d'un point du sol de La Crau en fonction de la longueur d'onde (19/06/1999, 12h06)

L'échantillonnage du grand site est représenté sur la Figure 2-35 : l'opérateur parcourt le site parallèlement au bord. Deux parcours successifs sont distants de plusieurs mètres, les mesures sont effectuées le long du trajet tous les 20 mètres environ, le viseur étant tenu à hauteur d'épaule. On obtient de la sorte entre 100 et 200 points. La méthode d'échantillonnage du petit site est semblable. Les mesures de références sur la plaque de halon sont effectuées après chaque aller-retour.

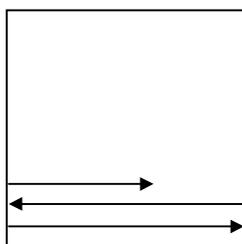


Figure 2-35 : Représentation schématisée de l'échantillonnage des mesures de réflectances

Nous pouvons ensuite convoluer ces réflectances $\rho(\lambda)$ avec les transmissions $s_k(\lambda)$ des bandes SPOT (Figure 2-36) ou de la station d'étalonnage, nous obtenons la réflectance équivalente sur les bandes spectrales, ρ_k :

$$\rho_k = \frac{\int_0^{\infty} \rho(\lambda) s_k(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} s_k(\lambda) d\lambda} \quad \text{équation 2-30}$$

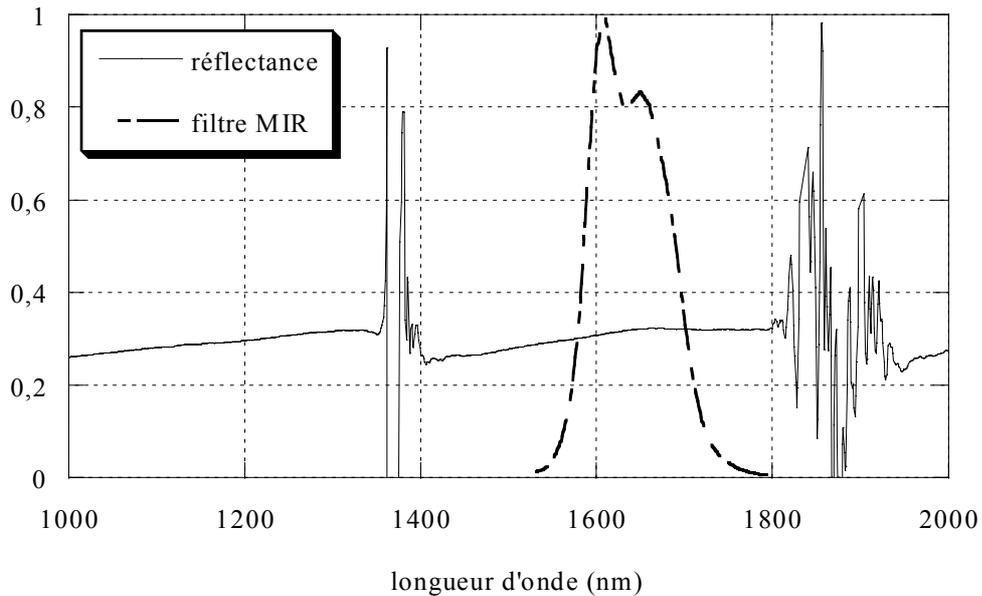


Figure 2-36 : Réflectance d'un point de La Crau et transmission du canal MIR (HRVIR1) de SPOT4 en fonction de la longueur d'onde.

Les tableaux reportés au chapitre 4 (Tableau 4-3) donnent les valeurs moyennes des réflectances correspondant aux canaux de SPOT4, nous constatons comme pour la campagne de 1997, que les réflectances mesurées sur le petit site sont légèrement plus élevées que celles du grand site. La tendance est nette ; en réflectance l'écart atteint un maximum de 9 % (le 19/06/1999 dans la bande B2) avec une médiane à 4 %.

La variabilité spatiale peut être estimée par l'écart-type sur les mesures de réflectances. Nous reportons dans le Tableau 2-26 les réflectances mesurées avec le spectromètre sur le grand site, le petit site, et leurs dispersions respectives. La variabilité des mesures est à peu près équivalente pour les deux sites et pour les trois journées. Les trois journées offraient un temps clair, les mesures ne sont pas affectées par des variations du flux descendant. Par contre, les mesures du grand site durant environ 1h30, contre dix à quinze minutes pour le petit site, leur dispersion est également reliée aux effets directionnels. Ceux-ci restent faibles cependant, car elles ont été faites aux alentours de midi.

Tableau 2-26 : Réflectances mesurées sur le grand site et sur le petit site : valeur moyenne, écart-type et nombre de mesures

	Canal		B1	B2	B3	MIR	nombre
16/06/99	ρ grand site	moyenne	0,1179	0,1563	0,2358	0,3367	95
		écart-type	0,0224	0,0321	0,0334	0,0383	
	ρ petit site	moyenne	0,1229	0,1622	0,2453	0,3403	68
		écart-type	0,0225	0,0306	0,0316	0,0351	
18/06/99	ρ grand site	moyenne	0,1218	0,1627	0,2390	0,3392	102
		écart-type	0,0300	0,0405	0,0384	0,0490	
	ρ petit site	moyenne	0,1189	0,1594	0,2411	0,3393	32
		écart-type	0,0205	0,0293	0,0291	0,0355	
19/06/99	ρ grand site	moyenne	0,1149	0,1516	0,2301	0,3274	182
		écart-type	0,0219	0,0298	0,0311	0,0384	
	ρ petit site	moyenne	0,1227	0,1654	0,2506	0,3404	45
		écart-type	0,0249	0,0354	0,0403	0,0412	

Nous pouvons comparer les mesures du spectromètre avec les mesures de réflectance de la station d'étalonnage. Pour cela, nous utilisons les mesures du 12 et du 19 juin 1999. Nous pourrions donc vérifier la validité des mesures. Les réflectances du spectromètre, datant du 19 juin, sont intégrées sur les filtres de la station. La première valeur donnée correspond aux mesures faites sur le grand site d'étalonnage, la seconde sur le site visé par la station.

Tableau 2-27 : Comparaison des réflectances du spectromètre et de la station le 12 et le 19 juin 1999

	550 nm	670 nm	870 nm
Spectromètre, « grand site »	0,1144	0,1520	0,2378
Spectromètre « petit site »	0,1211	0,1663	0,2578
Station 19/06/99 8h15, (écart)	0,1341 (10,7%)	0,1947 (17,1%)	0,2686 (4,2%)
Station 19/06/99 12h10, (écart)	0,1432 (18,2%)	0,2006 (20,6%)	0,2565 (0,5%)
Station 19/06/99 13h45, (écart)	0,1284 (6,0%)	0,1839 (10,6%)	0,2474 (4,0%)
Station 12/06/99 09h58, (écart)	0,1328 (9,7%)	0,1812 (9,0%)	0,2546 (1,2%)

Les deux estimations de la réflectance ne concordent pas. L'écart moins important à 870 semble indiquer une mauvaise prise en compte du flux lumineux dans le calcul de la réflectance. Il serait utile de valider de nouveau les réflectances par des mesures croisées sur une plaque de halon.

4-3-3 Installation à long terme

Après la campagne de juin 1999, la station est restée sur le site, le fonctionnement (hormis le problème du canal à 1600 nm) étant globalement satisfaisant. La station a fonctionné par intervalles jusqu'à la fin de mai 2000 (deux pannes mécaniques mineures ont interrompu les mesures pendant d'assez longues périodes). Les Tableau 2-28 et Tableau 2-29 donnent ces périodes de fonctionnement, avec la même légende que le Tableau 2-25

Tableau 2-28 : Périodes de fonctionnement en 1999

mois	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31
6						R	R	E	E	E	E	E	E	E	I	E	E	E	E	E	E	R	R	S	E	T	T	E	T	E	
7	E	E	E	E	S	E	E	E	E	T	T	T	E	T	E	E	E	T	S	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	S
8	E	E	E	T	E	E	S	E	S	E	E	E	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	I	I	P	P	P	P
9	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	
10	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P
11	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	S	I	E	E	E	E	E	E	E	E	E	
12	I	E	T	T	T	S	E	E	T	E	S	I	E	T	S	E	E	E	I	E	S	E	I	S	T	T	T	T	T	T	T

Tableau 2-29 : Périodes de fonctionnement en 2000

mois	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31
01	T	S	I	E	S	T	I	I	I	I	I	S	T	I	I	I	I	S	E	E	E	E	E	P	P	P	P	P	P	P	P
02	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	
03	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	R	R	E	T	E	E	I	E	S	I	S	S	E	S	E	E	E	I
04	E	S	I	T	E	E	E	E	I	I	E	E	S	I	I	I	E	E	E	E	E	E	T	T	E	S	I	S	E	E	
05	E	E	S	S	I	I	I	I	I	I	E	T	E	E	E	E	S	E	E	E	E	E	E	E	E	S	S	I			

En juin 2000, l'instrument a été étalonné, en compagnie d'autres photomètres, au Pic du Midi où les effets atmosphériques sont moindres. Il a ensuite été envoyé à la société Cimel en vue de modification. Il était en effet nécessaire de résoudre le problème du canal à 1600 nm, pour lequel les mesures ne sont pas fiables. La solution envisagée est de remplacer le détecteur au Germanium par un détecteur InGaS.

CONCLUSION DU CHAPITRE

Nous avons au cours de ce chapitre décrit la Station d'Étalonnage. L'étalonnage en éclairement et en luminance de l'instrument et la précision attendue sur la luminance, l'éclairement et l'épaisseur optique ont été définis. L'étalonnage en éclairement est satisfaisant, tant au niveau de la précision qu'au niveau de la stabilité. Pour l'étalonnage en luminance, la méthode interbande apparaît fiable. Les mesures de la station sont donc acceptables. Nous allons maintenant utiliser ces grandeurs pour déterminer les propriétés physiques de l'atmosphère et de la surface.

CHAPITRE 3. LES ENTRÉES POUR LA PRÉDICTION DU SIGNAL TOA

Le principe de l'étalonnage sur site test est de prédire le signal « Top Of Atmosphere » à partir de mesures au sol puis de le comparer avec les comptes numériques correspondant au site des images spectrales de SPOT. La prédiction du signal TOA requiert plusieurs paramètres, qu'il est nécessaire de déterminer le plus précisément possible pour chaque canal : pour l'atmosphère, la quantité de vapeur d'eau, l'épaisseur optique Rayleigh et aérosol, la fonction de phase de diffusion des aérosols, pour la surface, la réflectance dans la géométrie de visée de SPOT. Nous décrivons dans ce chapitre les méthodes que nous utilisons pour évaluer ces paramètres.

1 CARACTÉRISATION DE L'ATMOSPHÈRE

1-1 Épaisseur optique

L'épaisseur optique est déterminée à partir des mesures de la station d'étalonnage décrites au chapitre précédent, donc dans les canaux de la station. Les figures reportées au chapitre 4 (Figure 4-5 à Figure 4-8) permettent de comparer les transmissions respectives de HRVIR1 et de la Station. La valeur de l'épaisseur optique aérosol utilisée pour l'étalonnage est obtenue à partir de l'équation 2-5. Les comptes numériques sont corrigés de la transmission des gaz T_{gaz} .

$$\tau_a = \frac{1}{m} \ln \left(\frac{CN_0 T_{\text{gaz}}}{CN} \right) - \tau_R \quad \text{équation 3-1}$$

On fait une moyenne des valeurs de τ_a sur une période de 30 à 45 minutes autour de l'heure de passage du satellite au-dessus de La Crau.

1-2 Flux diffus

Le flux diffus descendant est donné par l'intégration de la luminance descendante sur l'hémisphère :

$$\Phi_d(\mu_s) = \int_0^1 \int_0^{2\pi} L(\mu_s, \mu_v, \Delta\varphi) \mu_v d\mu_v d(\Delta\varphi) \quad \text{équation 3-2}$$

Nous avons vu que les mesures de luminances ne couvrent pas tout l'hémisphère. Il nous faudra donc reconstituer les luminances pour $\Delta\varphi \cdot \theta_v = 2\pi$ sr. Pour ce faire, nous considérons l'approximation de la diffusion primaire, qui nous permet d'exprimer la luminance :

$$L(\Theta) = \frac{\tau P(\Theta)}{4\pi\mu_v} E_s$$

équation 3-3

La fonction de phase de diffusion $P(\Theta)$ étant une fonction continue, nous en déduisons que $\mu_v.L(\Theta)$ est également continue. L'intégration sera donc menée de la façon suivante :

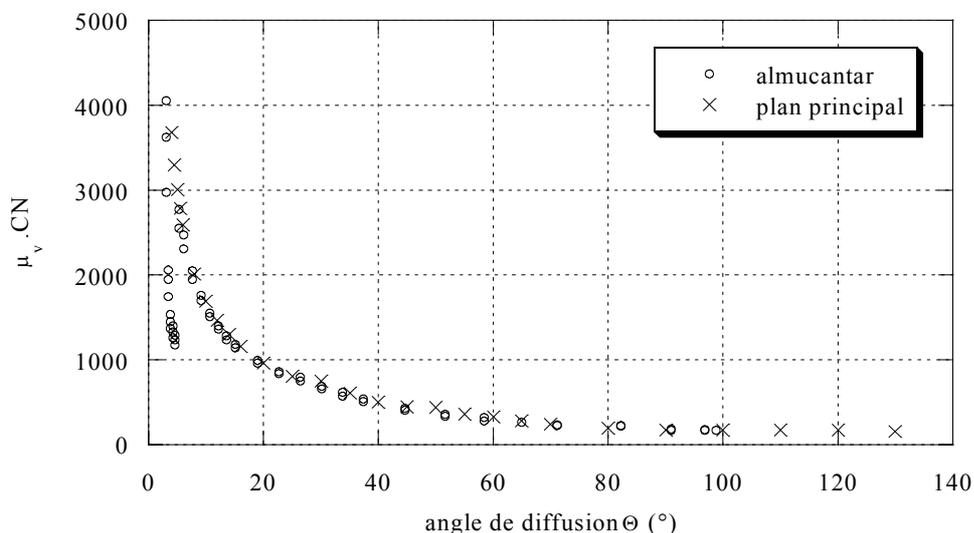


Figure 3-1 : Luminance mesurée dans le plan principal et l'almucantar le 15/05/2000 à 8h11

Pour tous les couples $(\theta_v, \Delta\varphi)$ avec θ_v variant de 0° à 90° et $\Delta\varphi$ de 0° à 360° la valeur de $\mu_v.L$ est interpolée entre les points de mesures de l'almucantar et du plan principal (Figure 3-1) soit près de 1600 angles de diffusion.

Le flux est ensuite calculé en intégrant la luminance par la méthode des trapèzes. Une première intégration est effectuée sur θ_v (équation 3-4) puis une seconde sur $\Delta\varphi$ (équation 3-5) :

$$\phi_j = \phi(\Delta\varphi_j) = \frac{1}{2} \sum_i ((\mu_{i+1} - \mu_i) (\mu_{i+1} L(\mu_{i+1}, \Delta\varphi_j) + \mu_i L(\mu_i, \Delta\varphi_j))) \quad \text{équation 3-4}$$

$$\Phi_d = \frac{1}{2} \sum_j ((\varphi_{j+1} - \varphi_j) (\phi_{j+1} + \phi_j)) \quad \text{équation 3-5}$$

Nous avons testé le calcul du flux par la méthode des trapèzes en utilisant le code des OS. Nous avons simulé pour plusieurs canaux les luminances dans le plan principal et l'almucantar, aux mêmes angles que ceux des mesures. Nous calculons le flux diffus à partir de ces simulations, et comparons ensuite le résultat au flux diffus calculé par les OS.

Tableau 3-1 : Flux simulé et calculé par la méthode des trapèzes, $\lambda=550 \text{ nm}$, $\tau_a=0,230$

θ_s	flux simulé	flux calculé	écart (%)
20	0,2028	0,1997	1,53
30	0,1968	0,1923	2,30
40	0,1875	0,1810	3,49
50	0,1739	0,1666	4,16
60	0,1539	0,1476	4,05
70	0,1238	0,1123	9,23
80	0,0749	0,0482	35,63

Le Tableau 3-1 donne les flux simulé et calculé et leur écart en %. Aux angles solaires nous intéressant, l'erreur reste faible (inférieure à 4 %), à plus forte raison si l'on considère que le flux diffus est d'un ordre de grandeur plus petit que le flux direct.

1-3 Modèle d'aérosol

Le modèle d'aérosols (granulométrie, indice de réfraction réel et imaginaire) détermine la fonction de phase des aérosols et donc leurs propriétés radiatives. D'Almeida *et al.* (1991), Shettle et Fenn (1979) décrivent les modèles d'aérosols que nous avons cités au premier chapitre. En particulier, la loi de Junge est souvent utilisée ; elle restitue correctement les propriétés optiques des aérosols, si l'on choisit convenablement les paramètres tels que leur rayon et leur indice de réfraction.

1-3-1 Loi de Junge

Nous avons donc choisi d'utiliser comme granulométrie la loi de Junge décrite au chapitre 1. Le paramètre de Junge ν est déterminé à partir du coefficient d'Angström α (équation 1-26 et équation 1-27).

1-3-1-1 Coefficient d'Angström

Le coefficient d'Angström est déterminé par la régression linéaire menée sur $\tau_a(\lambda)$, pour les canaux 870 Ge, 870 Si, 670, 550, 440, 380. Le canal 1600 n'est pas utilisable, et les deux canaux 1020 ne sont pas corrigés en température, ils ne sont donc pas pris en compte. En pratique, α est déterminé pour chaque mesure d'extinction à partir de l'épaisseur optique aérosol.

Comme pour l'épaisseur optique, on fait une moyenne du coefficient d'Angström sur une période de 30 à 45 minutes autour de l'instant du passage. Cette moyenne permet d'éliminer les variations instantanées du coefficient (Figure 3-2).

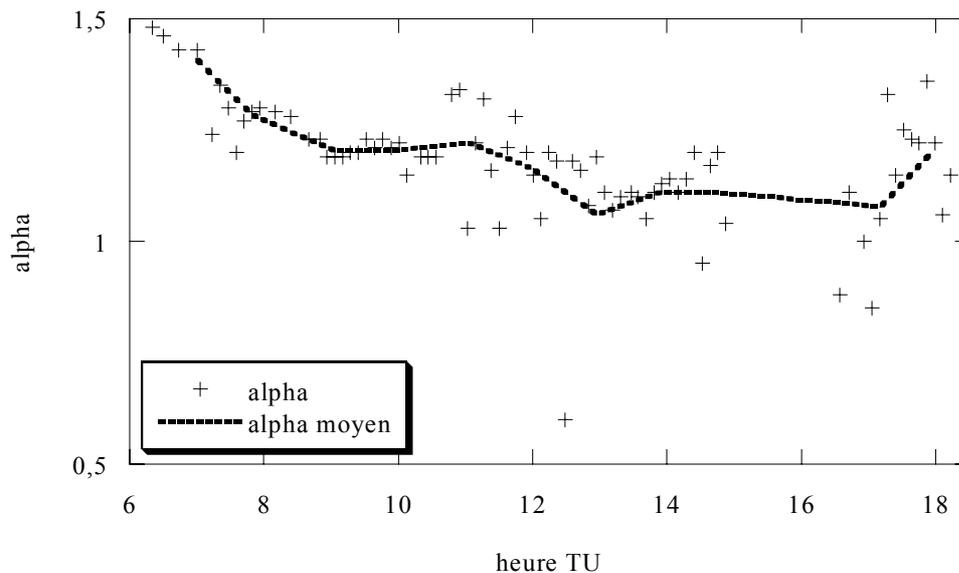


Figure 3-2 : Variation du coefficient d'Angström le 15/05/2000, le coefficient α moyen est la valeur moyennée du coefficient « instantané » sur des périodes de 30 minutes

L'incertitude sur le coefficient d'Angström est estimée à 0,2 à partir des incertitudes sur l'épaisseur optique aérosol.

1-3-1-2 Indice de réfraction ; partie réelle et imaginaire

Principe

Le principe est, comme pour l'étalonnage Rayleigh, de simuler les luminances et de les comparer aux mesures dans le plan principal. Un code basé sur le code d'étalonnage Rayleigh (Figure 2-14) permet de simuler la luminance à 870 nm pour trois indices de réfraction réels ($m = 1,33$, $m = 1,45$ et $m = 1,50$) et deux indices de réfraction imaginaires ($k = -0,005$ et $k = 0$). Contrairement au code Rayleigh, cependant, la gamme d'angles de diffusion est fixée entre 20° et 140° dans la comparaison.

Enfin, le minimum du coefficient χ_m (équation 2-15) nous donne l'indice de réfraction réel et imaginaire que nous utiliserons pour la restitution du signal hors atmosphère.

Résultats

Nous avons appliqué ce code à toutes les mesures disponibles. Nous donnons dans les Tableau 3-2 à Tableau 3-5 les indices de réfraction réels m et imaginaires k résultants pour quelques journées. Nous indiquons en outre le rapport « B/B_{870} », qui est la moyenne du rapport $L_{\text{mesurée}}/L_{\text{OS}}$, l'écart-type σ sur la distribution de $L_{\text{mesurée}}/L_{\text{OS}}$ et χ défini précédemment.

Tableau 3-2 : Indice réel et imaginaire restitué le 12 juin 1999.

Heure	m	k	B/B ₈₇₀	σ	χ
5,48	1,33	0,000	1,11	0,043	0,0013
6,36	1,33	0,000	1,17	0,039	0,0017
6,70	1,33	0,000	1,19	0,043	0,0027
7,03	1,33	-0,005	1,34	0,070	0,0067
7,86	1,33	-0,005	1,28	0,048	0,0029
9,23	1,33	-0,005	1,23	0,048	0,0051
10,80	1,33	-0,005	1,19	0,046	0,0057
12,23	1,33	-0,005	1,26	0,042	0,0016
12,57	1,33	-0,005	1,25	0,054	0,0055
14,13	1,33	-0,005	1,34	0,052	0,0050
15,83	1,33	-0,005	1,35	0,066	0,0094
17,53	1,33	0,000	1,11	0,040	0,0018

Tableau 3-3 : Indice réel et imaginaire restitué le 19 juin 1999.

Heure	m	k	B/B ₈₇₀	σ	χ
5,48	1,50	-0,005	0,97	0,034	0,0014
7,16	1,50	-0,005	1,11	0,055	0,0080
7,53	1,33	-0,005	1,24	0,081	0,0177
9,10	1,33	-0,005	1,30	0,051	0,0040
9,73	1,50	-0,005	1,02	0,023	0,0011
10,23	1,33	-0,005	1,36	0,063	0,0052
11,07	1,33	-0,005	1,36	0,051	0,0020
11,40	1,33	-0,005	1,37	0,054	0,0025
13,00	1,33	-0,005	1,49	0,120	0,0119
16,23	1,45	0,000	0,99	0,017	0,0011
17,90	1,50	0,000	0,96	0,014	0,0001

Tableau 3-4 : Indice réel et imaginaire restitué le 4 juillet 1999.

Heure	m	k	B/B ₈₇₀	σ	χ
5,55	1,50	-0,005	1,66	0,160	0,0697
7,25	1,50	-0,005	2,38	0,158	0,0077
8,78	1,50	-0,005	1,93	0,123	0,0102
10,37	1,50	-0,005	1,72	0,089	0,0050
11,93	1,50	-0,005	1,98	0,111	0,0047
13,50	1,50	-0,005	1,90	0,107	0,0042
15,07	1,50	-0,005	1,98	0,128	0,0068
16,75	1,50	-0,005	2,16	0,172	0,0187

Tableau 3-5 : Indice réel et imaginaire restitué le 1^{er} avril 2000.

Heure	m	k	B/B ₈₇₀	σ	χ
7,20	1,50	-0,005	4,01	0,184	0,0005
8,85	1,50	-0,005	3,98	0,191	0,0014
10,45	1,33	-0,005	4,89	0,281	0,0057
12,02	1,50	-0,005	3,82	0,466	0,0017
14,40	1,33	-0,005	4,43	0,588	0,0166
15,98	1,50	-0,005	3,30	0,129	0,0005

L'examen de toutes les données montre que l'indice réel $m=1,50$ est le plus représenté (dans 84% des cas, contre 5% pour 1,45 et 11% pour 1,33). Il en va de même pour l'indice imaginaire $k=-0,005$ (dans 87 % des cas), ce qui implique une absorption par les aérosols. Toutefois, il est difficile de penser que l'indice réel puisse varier de 1,33 à 1,50 comme on le voit le 19 juin. Dans ce cas, cela indique que les luminances mesurées ne permettent pas de déterminer l'indice de réfraction des aérosols. L'impact d'une erreur sur l'indice est évaluée dans le bilan d'erreur.

1-3-2 Validation

Afin de valider le choix de la loi de Junge, nous comparons les luminances mesurées à celles que nous simulons avec le code des OS. Les comparaisons sont menées pour $\lambda = 870$ nm, afin de se placer dans une zone où le signal aérosol est important par rapport au signal Rayleigh, et pour plusieurs indices de réfractifs réels et imaginaires des aérosols.

Les figures suivantes (Figure 3-3 à Figure 3-6) montrent quelques exemples de comparaisons de luminances simulées et mesurées. Nous avons utilisé les indices de réfraction réel et imaginaire donnés dans les Tableaux 3-2 à Tableau 3-5.

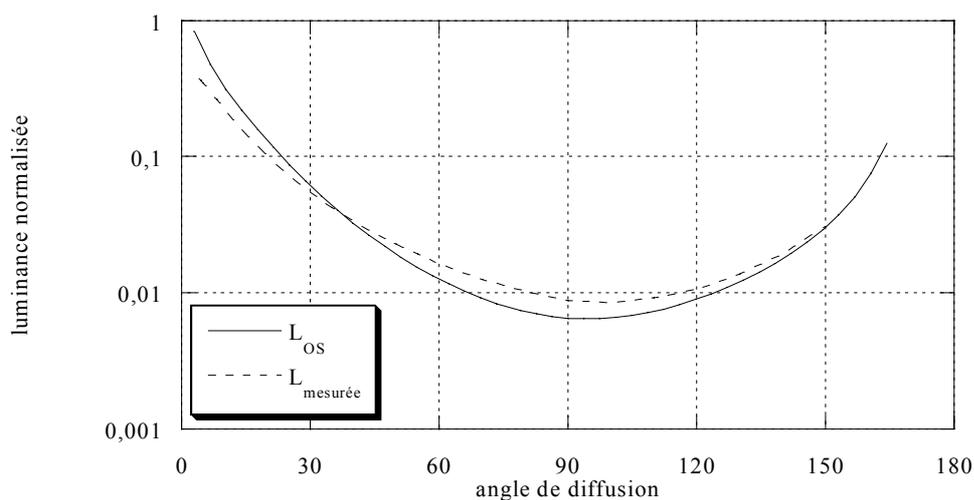


Figure 3-3 : Luminance mesurée le 12/06/99 à 5h25 et luminance simulée avec un indice $m= 1,33$, $k=0$, un paramètre de Junge de 4,526, une épaisseur optique aérosol de 0,0462 pour un angle zénithal solaire de 76,2° à 870 nm.

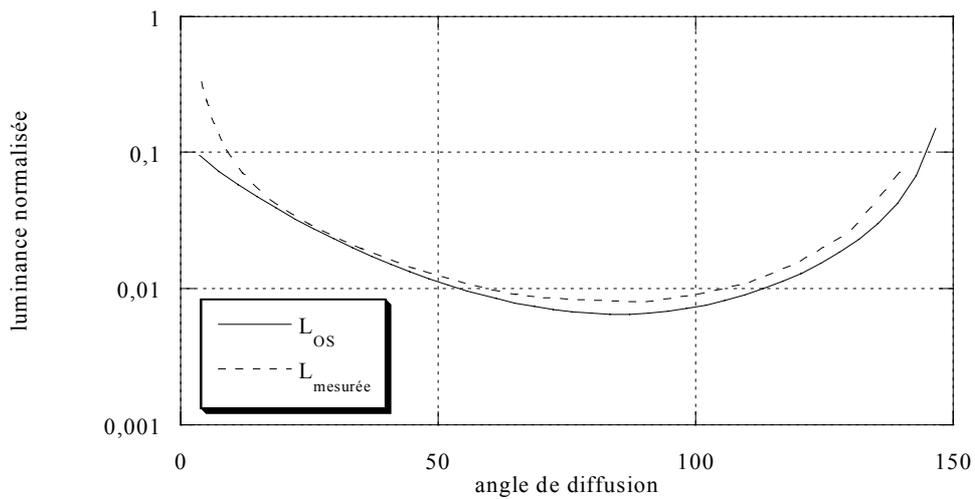


Figure 3-4 : Luminance mesurée le 19/06/99 à 16h10 et luminance simulée avec un indice $m=1,45$, $k=0$, un paramètre de Junge de 4,883, une épaisseur optique aérosol de 0,0170 pour un angle zénithal solaire de $58,5^\circ$ à 870 nm

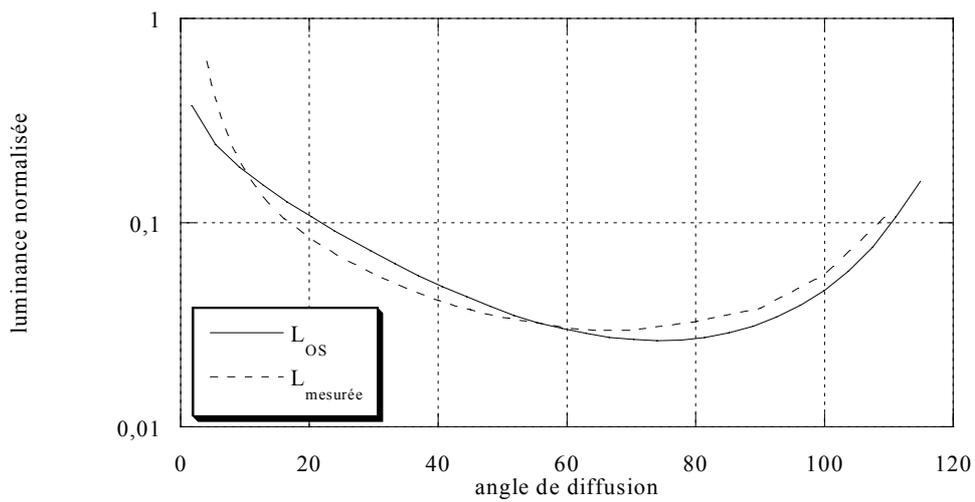


Figure 3-5 : Luminance mesurée le 4/07/99 à 10h19 et luminance simulée avec un indice $m=1,50$, $k=-0,005$, un paramètre de Junge de 4,537, une épaisseur optique aérosol de 0,0859 pour un angle zénithal solaire de $26,8^\circ$ à 870 nm

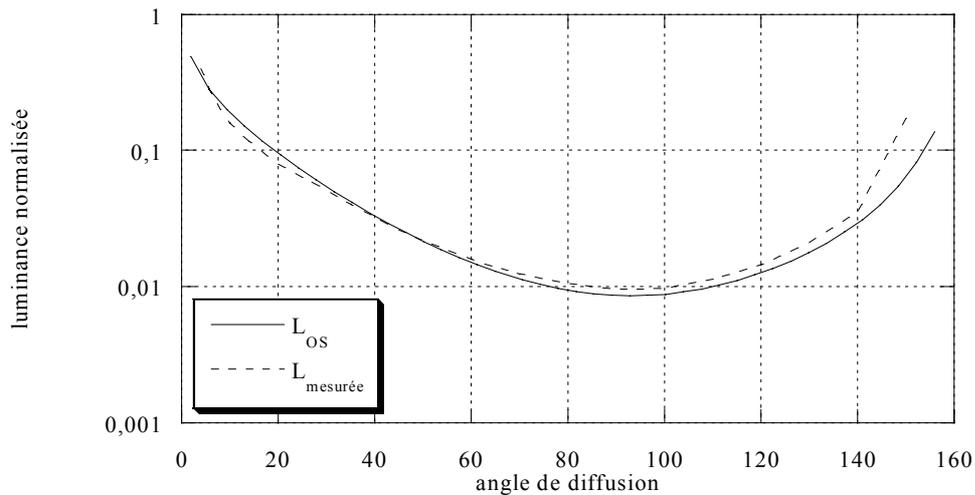


Figure 3-6 : Luminance mesurée le 4/07/99 à 15h59 et luminance simulée avec un indice $m= 1,50$, $k=-0,005$, un paramètre de Junge de 4,490, une épaisseur optique aérosol de 0,0505 pour un angle zénithal solaire de $67,8^\circ$ à 870 nm

Le modèle de Junge restitue l'allure générale de la luminance.

1-4 Vapeur d'eau

1-4-1 Principe

Le calcul de la quantité de vapeur d'eau est mené par la méthode donnée au Chapitre 1. Nous avons écrit la transmission de la vapeur d'eau sous la forme :

$$T_{\text{H}_2\text{O}} = e^{-a(m \cdot U_{\text{H}_2\text{O}})^b} \quad \text{équation 1-34}$$

L'équation 1-34 peut être écrite sous la forme :

$$\ln\left(\ln \frac{1}{T_{\text{H}_2\text{O}}}\right) = \ln(a) + b \cdot \ln(m U_{\text{H}_2\text{O}}) \quad \text{équation 3-6}$$

En utilisant le code Game (Dubuisson *et al.*, 1996), nous pouvons simuler la transmission pour plusieurs valeurs de la quantité de la vapeur d'eau et de la masse d'air ($0,5 \leq U_{\text{H}_2\text{O}} \leq 5,2$ et $1 \leq m \leq 5,7$) en incluant les caractéristiques du filtre « vapeur d'eau » à 937 nm . Nous pouvons alors effectuer une régression linéaire de $\ln(\ln(1/T))$ en fonction de $\ln(m \cdot U_{\text{H}_2\text{O}})$.

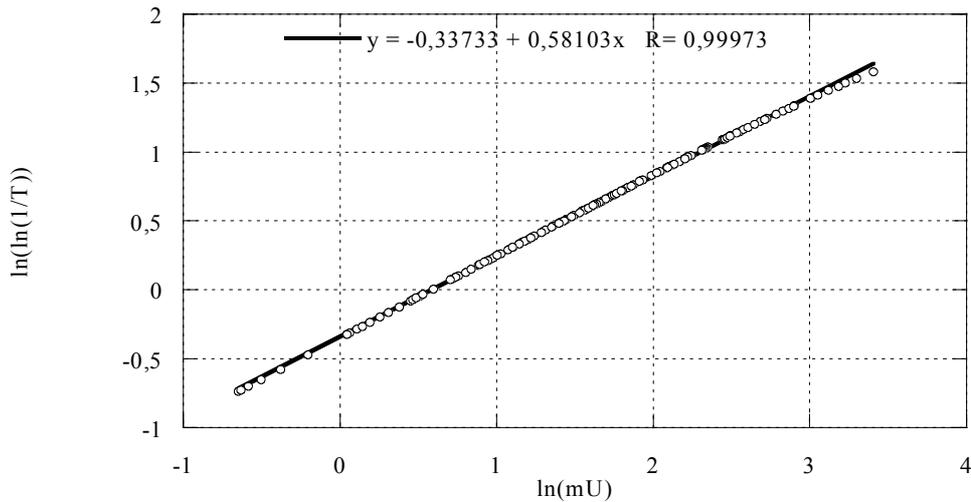


Figure 3-7 : Régression de $\ln(\ln(1/T))$ en fonction de $\ln(m.U_{H20})$

La régression linéaire de la Figure 3-7 a pour pente b et pour ordonnée à l'origine $\ln(a)$.

Nous obtenons donc les valeurs suivantes pour les coefficients a et b :

- a = 0,7137
- b = 0,5810

La connaissance de ces deux coefficients va nous permettre de retrouver la quantité de vapeur d'eau.

On ne peut accéder par la méthode des droites de Bouguer au coefficient $CN_0(937)$, mais la méthode de l'inter-étalonnage permet de le calculer : le coefficient B_{937} déterminé par l'étalonnage sur sphère est utilisé afin d'estimer le coefficient A_{937} (coefficient en éclaircissement), on obtient :

Tableau 3-6 : Coefficient d'étalonnage en luminance, en éclaircissement et CN_0 à 937 nm

Coefficients	juin 1999
$B_{937} (g_{937}^B = 10)$	51227
$A_{937} (g_{937}^A = 10)$	33485
$CN_0 (g = 5)$	28663

Nous pouvons également évaluer ce coefficient en utilisant une méthode de Bouguer modifiée (Bruegge et al. 1992) : une fois a et b connus, on peut écrire la loi de Bouguer sous la forme suivante :

$$\ln(CN(937)) + m(\tau_R(937) + \tau_a(937)) = \ln(CN_0(937)) - a(U_{H2O})^b m^b \quad \text{équation 3-7}$$

Dans l'équation 3-7, $\tau_R(937)$ est connue, $\tau_a(937)$ est déterminée par l'équation 3-9. Nous traçons alors le membre de gauche de l'équation 3-7 en fonction de m^b . Nous obtenons comme ordonnée à l'origine $\ln(CN_0(937))$. Cette méthode est très dépendante de la précision de l'étalonnage en éclaircissement, pour la détermination de l'épaisseur optique aérosol à 670 nm et du coefficient d'Angström. De plus, elle implique que la quantité de vapeur d'eau soit constante au cours d'une demi journée, ce qui est rarement vrai.

Nous avons appliqué cette méthode aux mesures de 1999 et 2000. Pour comparaison, nous utilisons les coefficients CN_0 du canal 870 Si, qui ont un ordre de grandeur semblable.

Tableau 3-7 : Coefficients $CN_0(937)$ obtenus par la méthode de Bouguer modifiée, comparaison avec les $CN_0(870 Si)$. L'écart maximum en % correspond à l'écart maximum divisé par le CN_0 moyen

	été 1999 canal 937 Si	été 1999 canal 870 Si	printemps 2000 canal 937 Si	printemps 2000 canal 870 Si
CN_0 moyen	37521	27696	34571	27532
Écart-type	6361	630	4691	734
Incertitude (%)	2,23	0,50	1,66	0,60
Écart maximum	25253	2111	23473	2508
Écart maximum (%)	67,30	7,62	67,90	9,11

Les résultats reportés dans le Tableau 3-7 sont peu satisfaisants ; écart-type important, très grande dispersion des mesures en comparaison avec les résultats de l'étalonnage de Bouguer classique (à 870). L'écart est de 30% avec le coefficient CN_0 interbande. La condition de stabilité de la vapeur d'eau n'est pas vérifiée (Figure 4-13 et Figure 4-14).

La connaissance de $CN_0(937)$ permettra de déterminer directement la transmission de la vapeur d'eau :

$$T_{H_2O}(937) = \frac{CN(937)}{CN_0(937) e^{-m(\tau_a(937) + \tau_R(937))}} \quad \text{équation 3-8}$$

L'épaisseur optique aérosol $\tau_a(937)$ est calculée grâce au coefficient d'Angström à partir de l'épaisseur optique aérosol à 670 nm, ce canal n'étant pas contaminé par la vapeur d'eau :

$$\tau_a(937) = \tau_a(670) \left(\frac{937}{670} \right)^{-\alpha} \quad \text{équation 3-9}$$

L'équation 3-8 nous donne une valeur de la transmission de la vapeur d'eau à 937 nm, que nous utilisons dans l'équation 1-34 pour calculer la quantité de vapeur d'eau. Celle-ci nous permet de calculer la transmission dans les canaux SPOT.

La transmission obtenue par l'équation 3-8 est comparée à la transmission des modèles « midlatitude summer » et « midlatitude winter » de 6S pour trois journées de mesure (Figure 3-8 à Figure 3-10), l'allure et la valeur de la transmission sont correctes.

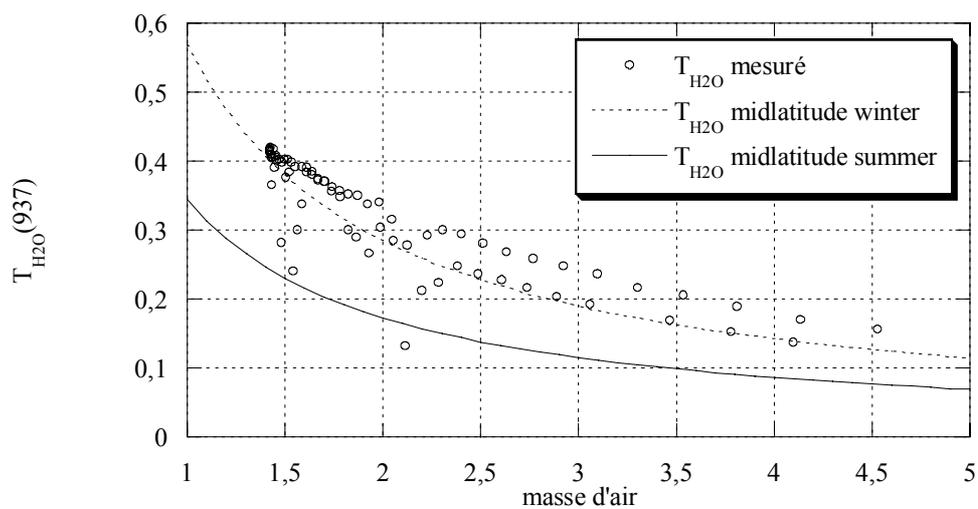


Figure 3-8 : Transmission de la vapeur d'eau mesurée le 16 mars 2000, comparée aux transmissions des modèles « midlatitude summer » et « midlatitude winter » de 6S

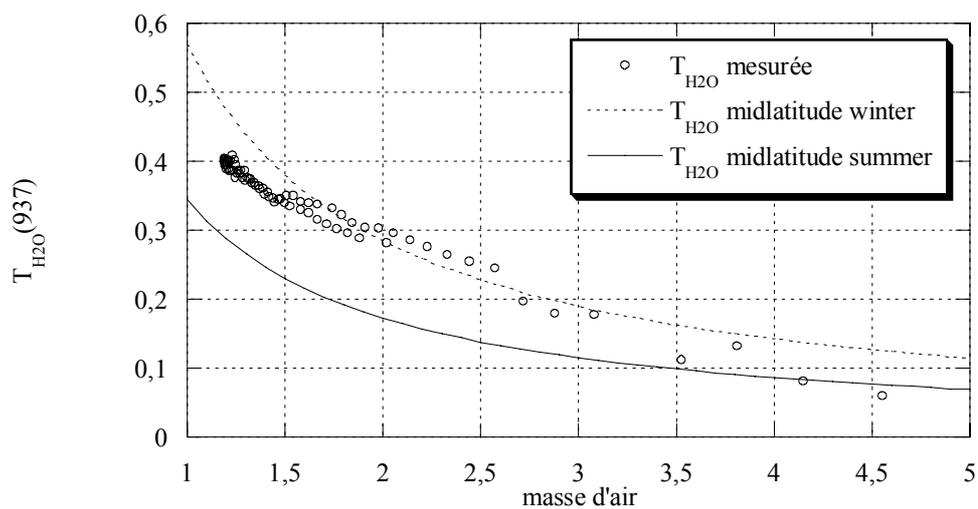


Figure 3-9 : Transmission de la vapeur d'eau mesurée le 18 avril 2000, comparée aux transmissions des modèles « midlatitude summer » et « midlatitude winter » de 6S

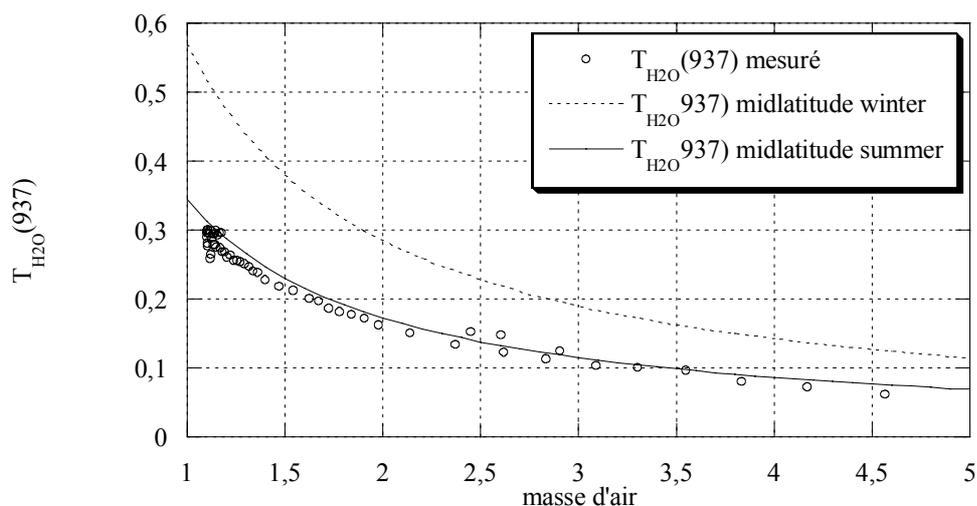


Figure 3-10 : Transmission de la vapeur d'eau mesurée le 15 mai 2000, comparée aux transmissions des modèles « midlatitude summer » et « midlatitude winter » de 6S

1-4-2 Résultats

Nous avons donc calculé la quantité de vapeur d'eau sur les périodes de l'été 1999 (juin, juillet et août) et pour le printemps 2000 (mars, avril et mai), avec le coefficient $CN_0(937)$ calculé à partir de l'étalonnage sur sphère de juin 1999 (les coefficients de novembre 1999 étant apparus moins fiables). On donne les valeurs moyennes mensuelles obtenues dans le Tableau 3-8.

Tableau 3-8 : Quantité moyenne de vapeur d'eau

Mois	U_{H_2O} (g/cm ²)
Juin 1999	1,8
Juillet 1999	2,2
Août 1999	2,7
Mars 2000	1,1
Avril 2000	1,3
Mai 2000	2,4

Les résultats (non moyennés) sont montrés sur les figures suivantes. On peut y voir à la fois l'étendue des valeurs au cours d'une journée et l'évolution au cours de la saison. Les valeurs obtenues sont très dispersées, cependant le seul filtre appliqué aux mesures est d'éliminer les valeurs très évidemment aberrantes (supérieures à 10 g/cm²).

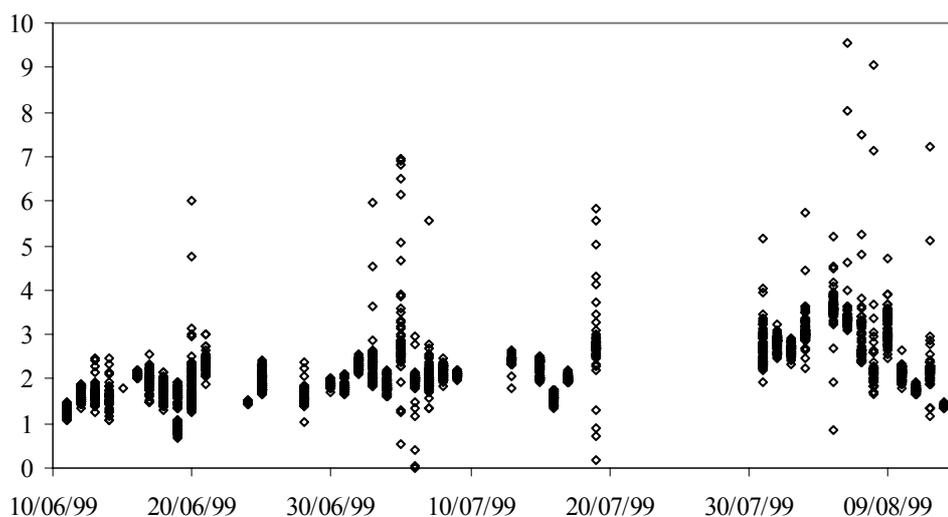


Figure 3-11 : Variation de la quantité de vapeur d'eau à La Crau pendant l'été 1999

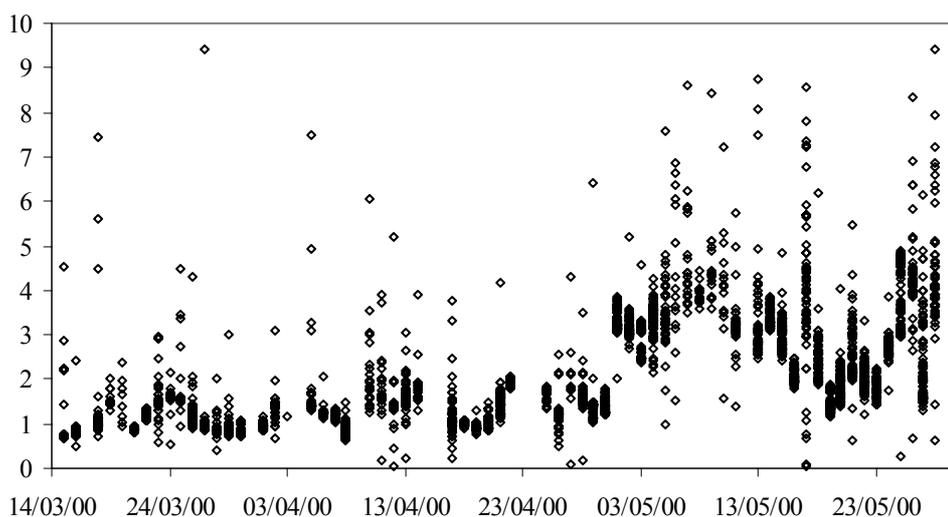


Figure 3-12 : Variation de la quantité de vapeur d'eau à La Crau pendant le printemps 2000

Nous pouvons comparer les résultats obtenus par cette méthode aux résultats des radiosondages effectués à Nîmes lors de la campagne de mesures de juin 1999. Le problème de cette comparaison est bien sûr que Nîmes et La Crau sont éloignées de 45 kilomètres et cela peut entraîner d'importantes différences.

De plus, M. Lecharpentier, de l'INRA d'Avignon, nous a aimablement fourni les mesures effectuées pendant le mois de juin 1999 par la station météorologique située à une centaine de mètres du site de La Crau. Ces mesures comprennent entre autres la température, l'humidité relative, la vitesse du vent (une mesure par heure) et la direction du vent (une mesure par jour).

L'humidité relative H (%) est reliée à la pression de vapeur d'eau par :

$$H = \frac{P_{\text{H}_2\text{O}}}{P_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{sat}}} \times 100$$

équation 3-10

$P_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{sat}}$, la pression de vapeur saturante de l'eau, est fonction uniquement de la température. Nous pouvons donc la calculer en utilisant les données fournies par l'IAPWS (1997). Nous accédons ainsi à la pression de vapeur d'eau. Finalement, si nous considérons que la vapeur d'eau est un gaz parfait, nous pouvons calculer la densité de vapeur d'eau $d_{\text{H}_2\text{O}}(z=0)$ au niveau du sol.

Nous aurons besoin d'une hypothèse supplémentaire pour retrouver la quantité de vapeur d'eau intégrée sur la colonne atmosphérique ; en effet nous ne connaissons pas le profil vertical de la vapeur d'eau. Nous prendrons donc le profil « midlatitude summer » (Vermote *et al.*, 1997), que nous ajusterons proportionnellement à la densité au niveau du sol. Ainsi, nous obtenons une valeur de la quantité de vapeur d'eau, que nous pouvons comparer aux mesures de la station.

Les résultats (quantités de vapeur d'eau estimées à Nîmes, à La Crau par la station Cimel et par la station météorologique) sont présentés dans le Tableau 3-9. Nous donnons ensuite les écarts (en %) entre les valeurs de La Crau et de Nîmes (LC/N) et de La Crau et de la station météorologique (LC/S).

Tableau 3-9 : Valeurs de la quantité de vapeur d'eau (en g/cm^2) estimées lors de la campagne de 1999

Date	11/06	12/06	15/06	18/06	19/06	24/06	25/06	28/06	30/06
Nîmes	–	1,86	2,15	–	1,08	1,56	–	–	–
Station Cimel	1,88	2,52	2,66	2,73	2,23	2,76	3,05	2,52	3,12
Station météo	1,64	2,06	2,37	3,14	1,49	1,79	1,54	1,92	2,71
Écart LC/N (%)	–	26,2	19,2	–	51,6	43,5	–	–	–
Écart LC/S (%)	12,8	18,3	10,9	-15,0	33,2	35,1	49,5	23,8	13,1
Écart N/S (%)	–	9,7	9,3	–	27,5	12,8	–	–	–

Les écarts entre les différentes mesures sont importants. La comparaison des ces trois jeux de mesures n'est pas très probante. Les mesures de Nîmes présentent deux inconvénients : la distance à laquelle elles sont réalisées et le fait qu'elles correspondent à un unique radiosondage. Les mesures de la station météorologiques sont données toutes les heures et surtout sont faites sur le site de La Crau, ce qui permet une meilleure comparaison avec les mesures de la station, cependant les hypothèses effectuées pour calculer la quantité de vapeur d'eau sont sujettes à caution.

Nous pouvons encore comparer nos résultats aux mesures Aeronet (Holben *et al.* 1998) d'Avignon, obtenues sur le site (<http://aeronet.gsfc.nasa.gov>) avec l'aimable autorisation de M Verbugge (INRA, Avignon). La quantité de vapeur d'eau est évaluée par la même méthode que celle que nous utilisons (Halthore *et al.*, 1997). Nos données se recoupent sur les mois de mars, avril et mai 2000. Les mesures Aeronet sont disponibles sous la forme d'une valeur à une heure précise par jour, cette heure différant d'un jour à l'autre. Nous avons donc choisi la mesure de La Crau à l'heure la plus proche (différente d'une demi-heure au maximum) (Figure 3-13).

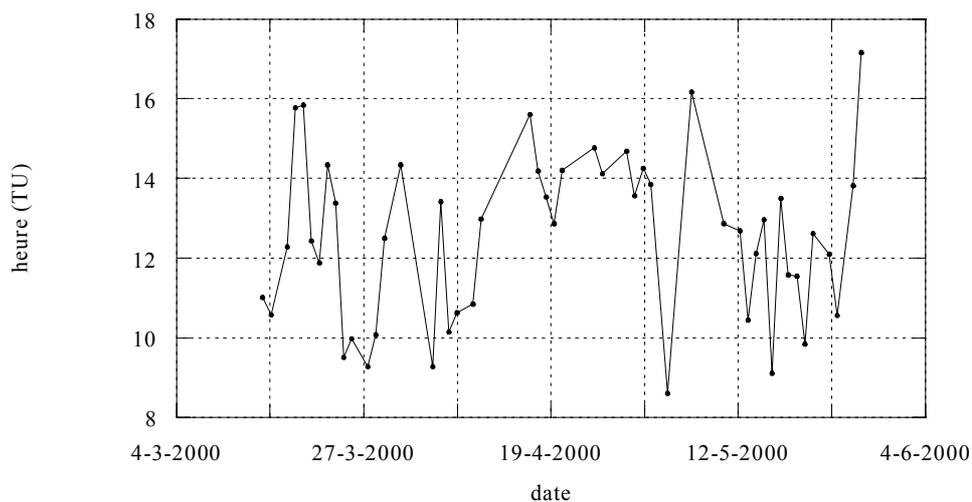


Figure 3-13 : Heure de la mesure de U_{H_2O} à La Crau correspondant au mieux avec la mesure d'Avignon.

Nous obtenons ainsi 49 paires de valeurs de la quantité de vapeur d'eau, que nous reportons sur la Figure 3-14.

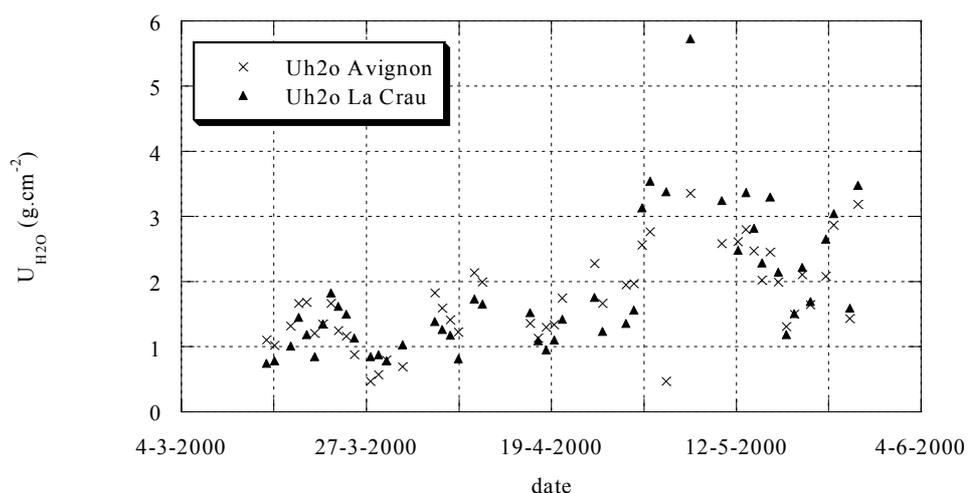


Figure 3-14 : Quantité de vapeur d'eau (en $g.cm^{-2}$) restituée à La Crau et à Avignon.

L'accord est globalement correct. Les valeurs retrouvées ne sont pas identiques mais elles ont le même ordre de grandeur. L'écart médian (Tableau 3-10) est relativement faible, compte tenu de la variabilité de la vapeur d'eau.

Tableau 3-10 : Écart entre les estimations de la quantité de vapeur d'eau de La Crau et d'Avignon

Écart minimum (%)	0,14
Écart maximum (%)	86,14
Écart médian (%)	21,77
nombre	49

En conclusion, la méthode de détermination semble surestimer la quantité de vapeur d'eau. De nouvelles estimations du coefficient $CN_0(937)$ sont indispensables pour confirmer l'unique détermination fiable dont nous disposons. Les valeurs obtenues sont cependant acceptables, la précision de l'estimation de la quantité de vapeur d'eau est d'environ 20%.

2 CARACTÉRISTIQUES DE LA SURFACE

La principale caractéristique de la station d'étalonnage est qu'elle permet à la fois de caractériser l'atmosphère et la surface ; en effet, la luminance montante du sol est mesurée pour 864 géométries différentes (72 mesures en azimut de 0 à 360° pour 12 hauteurs de 5 à 60°). Ces luminances sont transformées en réflectances de surface et nous permettront d'établir un modèle de BRDF spécifique.

2-1 Transformation de la luminance en réflectance

La réflectance de surface $\rho_k(\theta_s, \theta_v, \Delta\varphi)$ est donnée par l'équation suivante :

$$\rho_k(\theta_s, \theta_v, \Delta\varphi) = \frac{\pi L_k^\uparrow(\theta_s, \theta_v, \Delta\varphi)}{\Phi_k^\downarrow(\theta_s)}$$

où $L_k^\uparrow(\theta_s, \theta_v, \Delta\varphi)$ est la luminance montante au niveau du sol et $\Phi_k^\downarrow(\theta_s)$ est le flux total descendant, soit la somme du flux direct $E_k(\theta_s)$ et du flux diffus $\Phi_{dk}(\theta_s)$ calculés précédemment.

Nous obtenons la réflectance, pour un protocole complet, pour une hauteur h comprise entre 5° et 60°, et pour $\Delta\varphi$ compris entre 0° et 360°. Il convient de noter que pendant la durée d'un protocole (environ 70 minutes), la position du soleil varie d'une dizaine de degrés. Mis à part la variation de l'azimut solaire au cours d'une rotation (ce qui représente quelques minutes), toutes ces variations sont connues et prises en compte dans les calculs de BRDF.

2-2 Le modèle de BRDF historique

Le modèle utilisé jusqu'à présent pour évaluer la réflectance dans la géométrie de visée de SPOT est décrit au chapitre 1. Appliqué aux mesures de réflectances de la station d'étalonnage, il permet de les « redresser » :

$$\rho_k(\theta'_s, \theta'_v, \Delta\varphi') = \frac{a_k(\theta'_s, \theta'_v, \Delta\varphi')}{a_k(\theta_s, \theta_v, \Delta\varphi)} \times \rho_k(\theta_s, \theta_v, \Delta\varphi) \quad \text{équation 3-11}$$

Les coefficients $a_k(\theta_s, \theta_v, \Delta\varphi)$, correspondant aux coefficients $\rho(\theta_s, \theta_v, \Delta\varphi)$ de l'équation 1-38, sont calculés pour chaque valeur de θ_s , θ_v et $\Delta\varphi$:

$$a_k(\theta_s, \theta_v, \Delta\varphi) = \sum_{i=0}^{i=2} a_{i,k}(\theta_s, \theta_v) \cdot \cos(s \cdot \Delta\varphi) \quad \text{équation 3-12}$$

Les coefficients $a_i(\theta_s, \theta_v)$ sont tabulés, pour 24 valeurs de θ_s et θ_v (angles de Gauss) et pour les canaux B1, B2, B3 et panchromatique. Une interpolation permet de calculer $a_i(\theta_s, \theta_v)$ pour la valeur exacte de θ_s et θ_v .

2-3 Le modèle de BRDF de La Crau

Le modèle de BRDF que nous venons de décrire a été établi à partir de mesures de réflectances faites dans le plan principal et dans le plan qui lui est perpendiculaire. Or les mesures de la station Cimel couvrent un champ beaucoup plus grand ; l'équivalent de soixante-douze plans verticaux. Nous disposons donc d'un grand nombre de mesures, tant du point de vue géométrique que du point de vue temporel ; nous avons en effet de trois à huit protocoles de mesures complets par jour clair, sur plusieurs mois. L'établissement d'un nouveau modèle de BRDF du site de La Crau apparaît alors essentiel.

2-3-1 Modélisation de la réflectance à 870 nm sur une journée de mesures.

La première hypothèse que nous serons amenés à utiliser pour modéliser la réflectance bidirectionnelle est sa symétrie par rapport au plan du soleil, c'est-à-dire le plan ($\Delta\varphi=0^\circ, \Delta\varphi=180^\circ$). Elle doit donc être vérifiée. Un examen des données du 04/07/1999 montre que sur cette journée, la réflectance suit un comportement semblable à celui de la Figure 3-15 et plus rarement de la Figure 3-16. L'Annexe 3 présente l'évolution de la réflectance pour deux protocoles Sol.

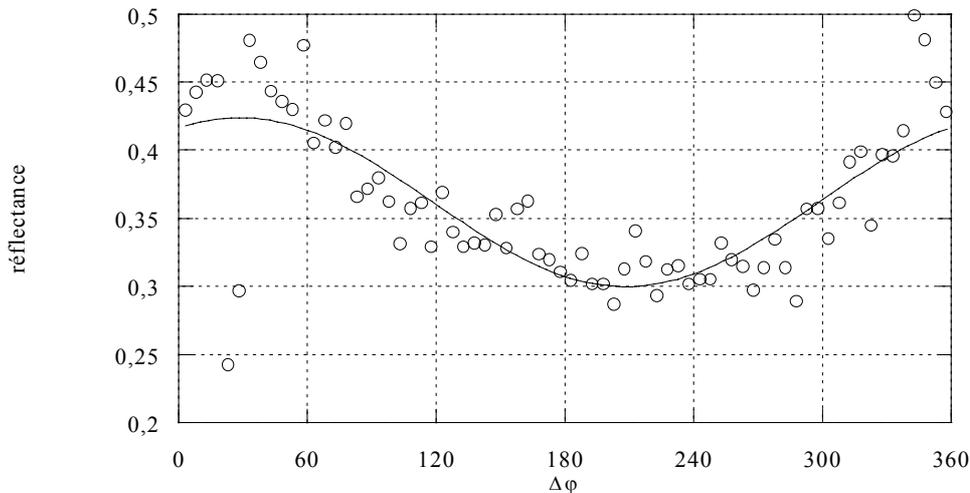


Figure 3-15 : Variation de la réflectance en fonction de $\Delta\varphi$ ($\theta_v = 30^\circ$, $\theta_s = 69,9^\circ$)

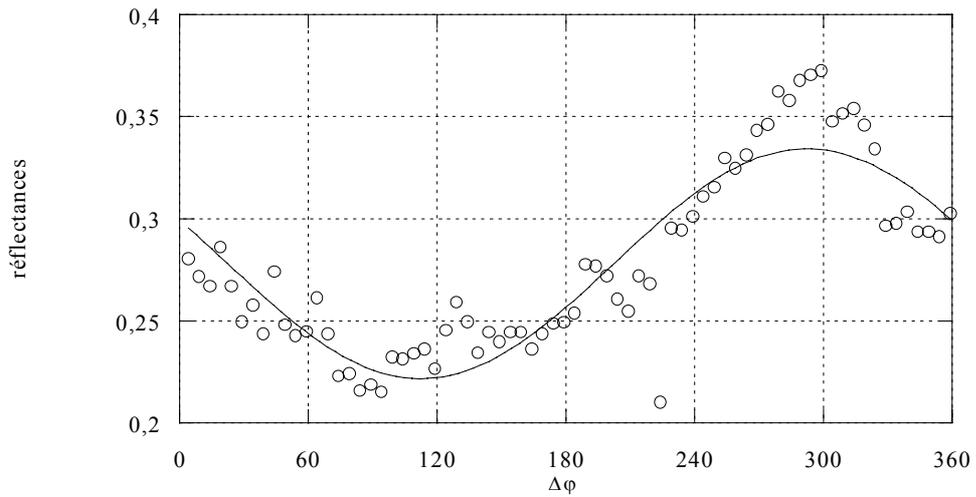


Figure 3-16 : Variation de la réflectance en fonction de $\Delta\varphi$ ($\theta_v = 45^\circ$, $\theta_s = 31,9^\circ$)

La symétrie par rapport au plan du Soleil paraît donc une hypothèse raisonnable. De plus, au vu de l'allure de la réflectance, une régression en cosinus de la différence d'azimut doit être applicable (Figure 3-15, Figure 3-16 et Figure 3-17).

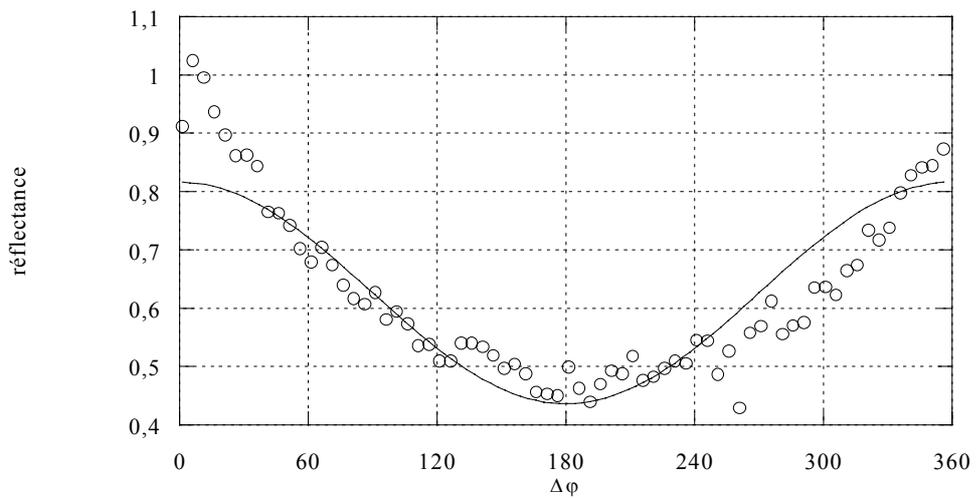


Figure 3-17 : Variation de la réflectance en fonction de $\Delta\varphi$ ($\theta_v = 60^\circ$, $\theta_s = 62,3^\circ$)

La régression appliquée est de la forme donnée par l'équation 3-13, les coefficients obtenus sont reportés dans le Tableau 3-11.

$$\rho = m_1 + m_2 \cdot \cos(\Delta\varphi + m_3)$$

équation 3-13

Tableau 3-11 : Résultats de la régression de la Figure 3-17

Coefficient	Valeur
m_1	0,626
m_2	0,193
m_3	349,1
R^2	0,917

Nous avons donc décidé d'établir un modèle test, basé sur les mesures de réflectances de la journée du 4 juillet 1999. Nous avons choisi cette journée car elle présente l'avantage de mesures *sans aucune interruption* de 5h21 à 18h06, ce qui nous donne huit protocoles complets.

En premier lieu, les comptes numériques sont transformés en luminances, puis les luminances en réflectances. Il est important de noter que le flux diffus utilisé pour calculer la réflectance est évalué avant le début du protocole Sol. Par conséquent, sa variation au cours de la mesure des réflectances (environ une heure) n'est pas prise en compte.

Ensuite, nous menons sur chaque jeu de mesures une régression de ρ en fonction de $\cos(\Delta\varphi)$. Nous obtenons de cette façon les coefficients $m_1(\theta_s, \theta_v)$ et $m_2(\theta_s, \theta_v)$ définis dans l'équation 3-14, où nous prenons comme hypothèse la symétrie par rapport au plan du soleil :

$$\rho = m_1 + m_2 \cdot \cos(\Delta\varphi) \quad \text{équation 3-14}$$

Il nous reste enfin la dépendance en θ_s et θ_v de m_1 et m_2 . Nous allons supposer que deux ajustements linéaires successifs (équations 3-15 et équations 3-16) l'exprimeront de façon satisfaisante.

$$\begin{aligned} m_1(\theta_s, \theta_v) &= m_{11}(\theta_v) + m_{12}(\theta_v) \cdot \theta_s \\ m_2(\theta_s, \theta_v) &= m_{21}(\theta_v) + m_{22}(\theta_v) \cdot \theta_s \end{aligned} \quad \text{équations 3-15}$$

L'ajustement linéaire en fonction de θ_s est mené avant l'ajustement en fonction de θ_v bien que cela ne semble pas logique au premier abord. Cependant, la variation de θ_s au cours d'un protocole peut atteindre une dizaine de degrés, il faut donc éliminer d'abord la dépendance en θ_s . La procédure inverse (en θ_v puis en θ_s) laisserait subsister une dépendance en θ_s dans le jeu de coefficients m_{ij}

$$\begin{aligned} m_{11}(\theta_v) &= m_{111} + m_{112} \cdot \theta_v \\ m_{12}(\theta_v) &= m_{121} + m_{122} \cdot \theta_v \\ m_{21}(\theta_v) &= m_{211} + m_{212} \cdot \theta_v \\ m_{22}(\theta_v) &= m_{221} + m_{222} \cdot \theta_v \end{aligned} \quad \text{équations 3-16}$$

Nous avons donc mené cette étude sur les réflectances mesurées le 4 juillet dans le canal à 870, où les effets atmosphériques sont faibles. Nous présentons ci-dessous quelques exemples de régression.

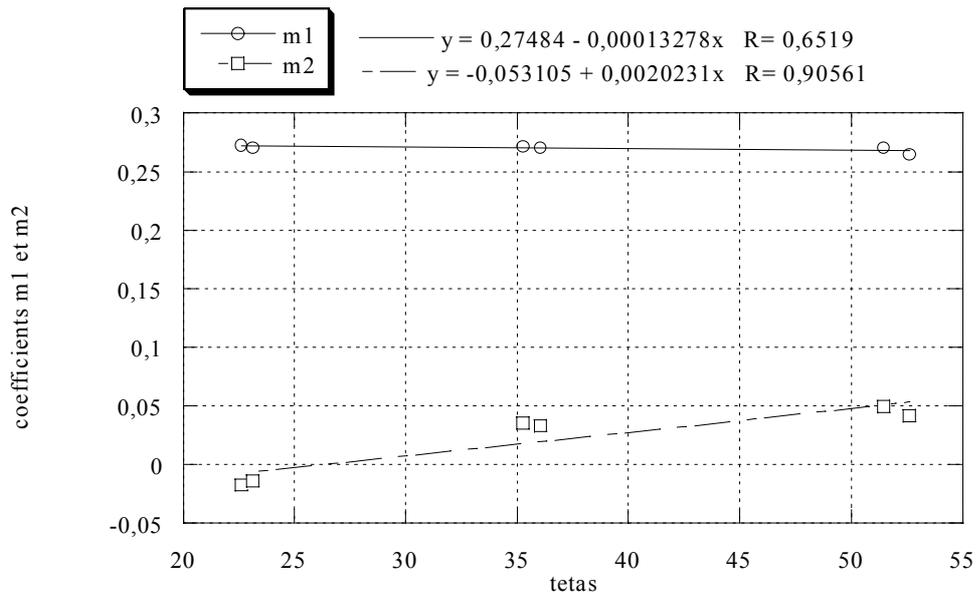


Figure 3-18 : Régression linéaire des coefficients m_1 et m_2 obtenus pour $\theta_v=30^\circ$, en fonction de θ_s .

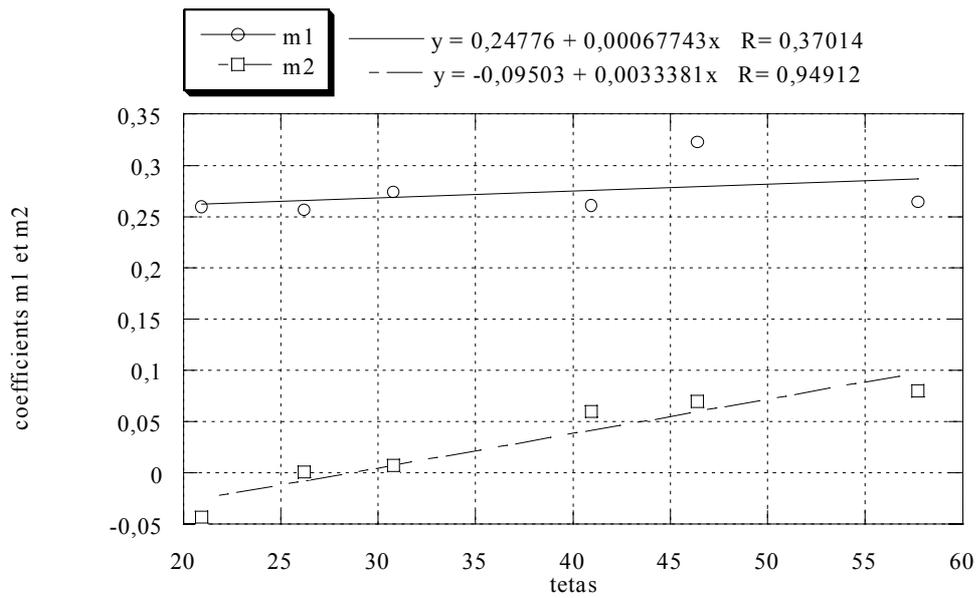


Figure 3-19 : Régression linéaire des coefficients m_1 et m_2 obtenus pour $\theta_v=50^\circ$, en fonction de θ_s .

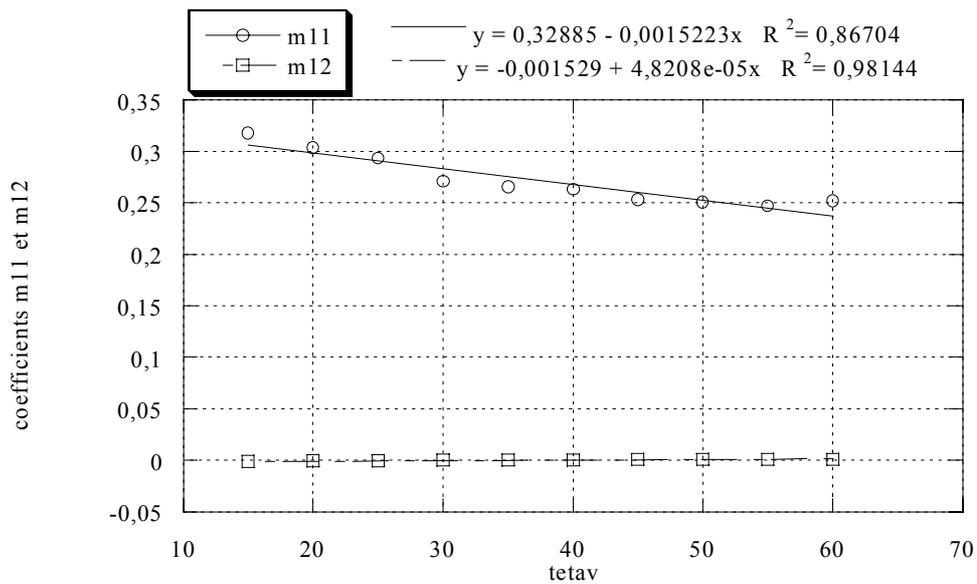


Figure 3-20 : Régression linéaire des coefficients m_{11} et m_{12} en fonction de θ_v .

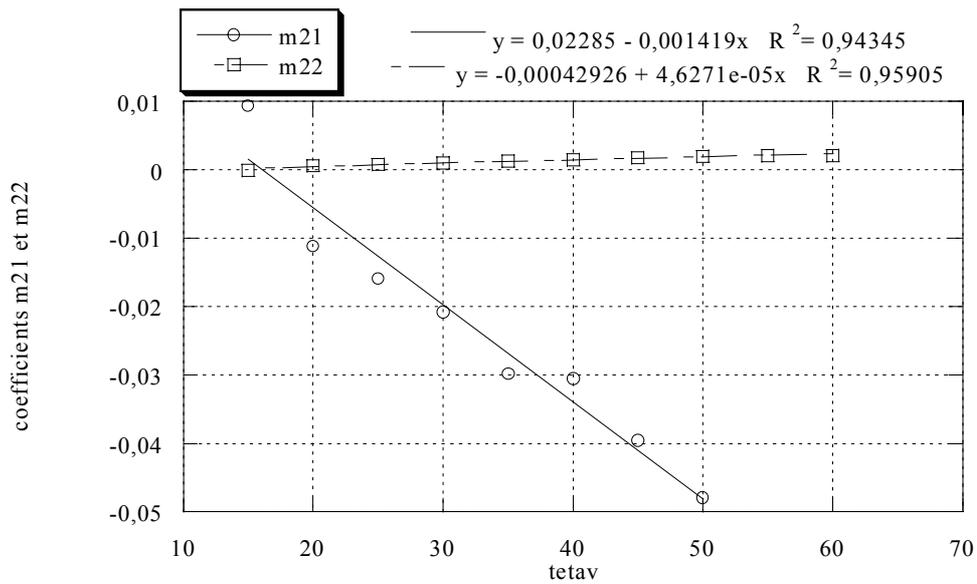


Figure 3-21 : Régression linéaire des coefficients m_{21} et m_{22} en fonction de θ_v .

Nous obtenons au final 8 coefficients permettant de reconstituer la réflectance modélisée à partir uniquement des angles solaires et des angles de visée.

Tableau 3-12 : Coefficients de la régression linéaire en fonction de θ_v .

coefficient	mxx1	mxx2
m11	$3,3918 \cdot 10^{-01}$	$-1,7913 \cdot 10^{-03}$
m12	$-1,5064 \cdot 10^{-03}$	$4,3140 \cdot 10^{-05}$
m21	$1,7429 \cdot 10^{-02}$	$-2,2797 \cdot 10^{-03}$
m22	$6,0873 \cdot 10^{-05}$	$6,0717 \cdot 10^{-05}$

2-3-2 Application du modèle

Une première étape dans l'application du modèle est de redresser dans une géométrie donnée les mesures ayant servi à l'établir. Il s'agit ici de vérifier que notre modélisation des effets directionnels permet effectivement d'estimer la réflectance moyenne dans une géométrie donnée. Nous avons donc redressé toutes les réflectances ($\lambda=870$ nm) mesurées le 4 juillet dans une unique géométrie, ici celle du passage de SPOT4 le 19/06. Les Figure 3-22 à Figure 3-25 montrent l'effet de la correction sur les réflectances mesurées lors des protocoles 3 et 4 le 4/7/1999.

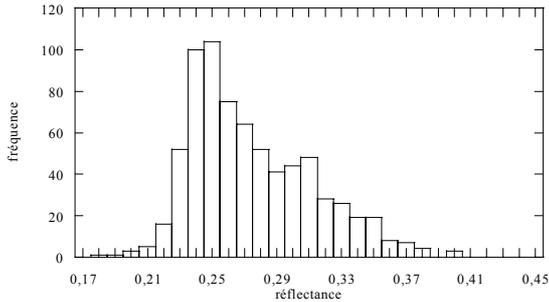


Figure 3-22 : Réflectance, protocole n° 3
le 4/7/1999

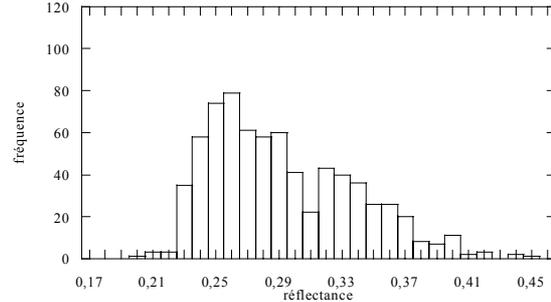


Figure 3-23 : Réflectance corrigée, protocole n° 3
le 4/7/1999

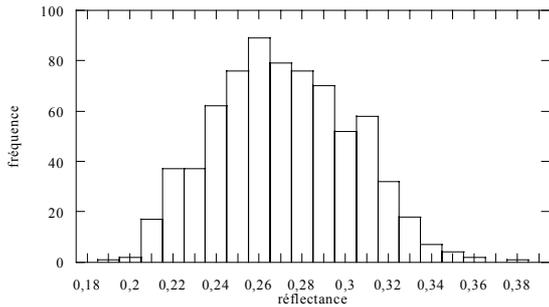


Figure 3-24 : Réflectance, protocole n° 4
le 4/7/1999

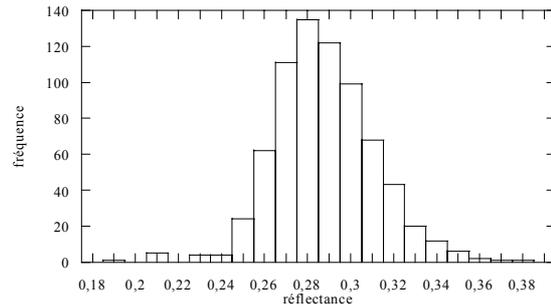


Figure 3-25 : Réflectance corrigée, protocole n° 4
le 4/7/1999

Examinons de plus près les protocoles 3 et 4, qui sont les plus proches de la géométrie du soleil utilisée pour la correction. Les Tableau 3-13 et Tableau 3-14 donnent la réflectance moyenne, redressée et brute en fonction de l'angle de visée.

Tableau 3-13 : Réflectance moyenne, avec et sans correction en fonction de l'angle de visée θ_v , pour le protocole n° 3

θ_v	Sans correction		Avec correction	
	réflectance moyenne	écart-type	réflectance moyenne	écart-type
15	0,2746	0,0278	0,2873	0,0392
20	0,2710	0,0262	0,2834	0,0389
25	0,2728	0,0320	0,2859	0,0457
30	0,2715	0,0420	0,2854	0,0549
35	0,2788	0,0458	0,2942	0,0573
40	0,2803	0,0435	0,2971	0,0523
45	0,2779	0,0445	0,2965	0,0504
50	0,2736	0,0396	0,2944	0,0418
55	0,2710	0,0381	0,2946	0,0365
60	0,2742	0,0361	0,3021	0,0308
moyenne	0,2746		0,2921	
écart-type	0,0380		0,0456	

Tableau 3-14 : Réflectance moyenne, avec et sans correction en fonction de l'angle de visée θ_v , pour le protocole n° 4

θ_v	Sans correction		Avec correction	
	réflectance moyenne	écart-type	réflectance moyenne	écart-type
15	0,2938	0,0264	0,2932	0,0289
20	0,2885	0,0254	0,2909	0,0269
25	0,2824	0,0316	0,2880	0,0305
30	0,2724	0,0298	0,2813	0,0259
35	0,2715	0,0297	0,2844	0,0223
40	0,2697	0,0286	0,2869	0,0185
45	0,2636	0,0306	0,2851	0,0188
50	0,2593	0,0342	0,2851	0,0174
55	0,2571	0,0293	0,2887	0,0165
60	0,2552	0,0261	0,2929	0,0207
moyenne	0,2714		0,2876	
écart-type	0,0317		0,0233	

Le résultat est mitigé : pour le protocole n° 4, la dispersion est diminuée par la correction des effets directionnels, au contraire du protocole n° 3, ce qui confirme l'impression donnée par les histogrammes (Figure 3-22 à Figure 3-25).

De plus, un effet indésirable apparaît lors de l'utilisation du modèle : comme on l'observe sur la Figure 3-26, l'application du modèle semble *ajouter* un effet géométrique. Il n'en va pas de même sur la Figure 3-27

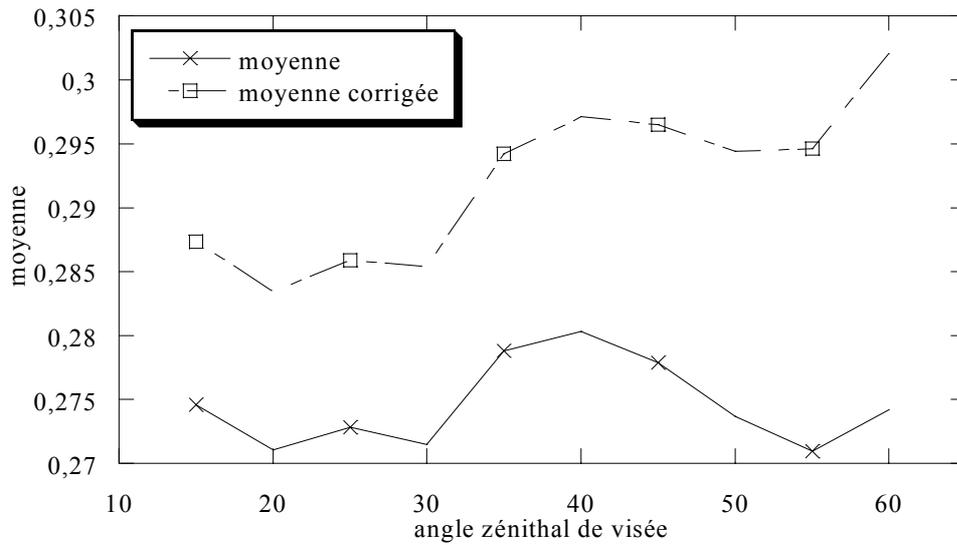


Figure 3-26 : Réflectance moyenne en fonction de θ_v , protocole n° 3. Chaque point est la moyenne des réflectances mesurées à θ_v donné.

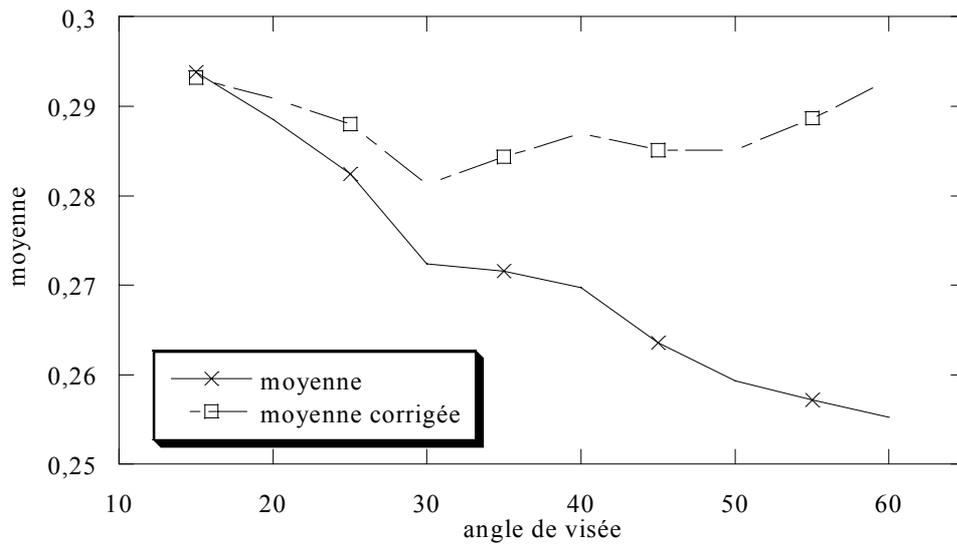


Figure 3-27 : Réflectance moyenne en fonction de θ_v , protocole n° 4.

L'étape la plus importante consiste bien sûr à redresser la réflectance d'un protocole dans la géométrie de visée de SPOT. Nous utiliserons les mesures du 12/06/99 et du 19/06/1999. Ces journées correspondent à des visées de SPOT sur La Crau. Il n'y a cependant pas de protocole complet correspondant exactement à l'heure de passage des satellites, nous examinerons la réflectance des protocoles les plus proches.

Tableau 3-15 : Réflectances moyennes et corrigées dans la géométrie de visée de SPOT le 12 et le 19 juin

Date	ρ moyenne	Écart-type	ρ corrigée	Écart-type
12/06/99, 09h58	0,2561	0,0305	0,2707	0,0317
19/06/99, 08h16	0,2670	0,0307	0,2810	0,0196
19/06/99, 12h08	0,2591	0,0298	0,2727	0,0190

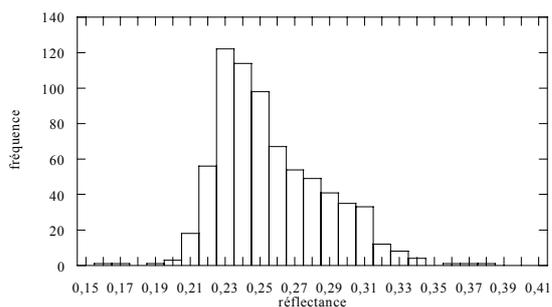


Figure 3-28 : Réflectances brutes, le 12/06/99, protocole de 09h58

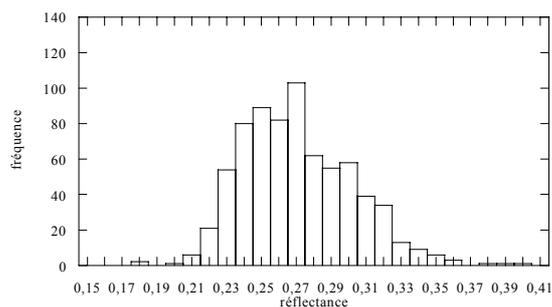


Figure 3-29 : Réflectances corrigées dans la géométrie de visée de SPOT2, le 12/06/99, protocole de 09h58

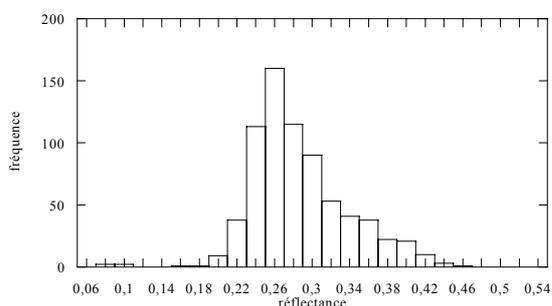


Figure 3-30 : Réflectances brutes, le 19/06/99, protocole de 8h16

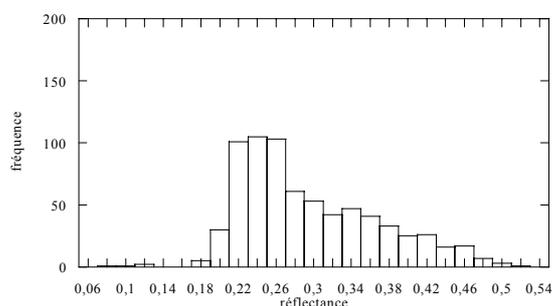


Figure 3-31 : Réflectances corrigées dans la géométrie de visée de SPOT4, le 19/06/99, protocole de 8h16

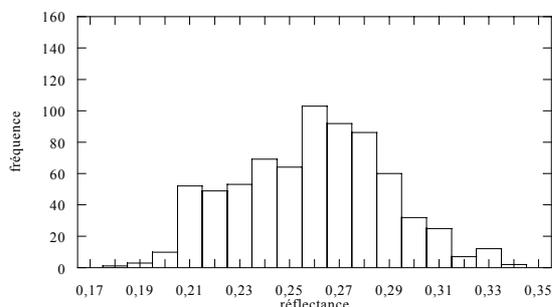


Figure 3-32 : Réflectances brutes, le 19/06/99, protocole de 12h08

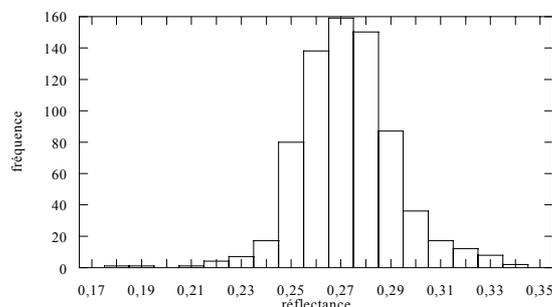


Figure 3-33 : Réflectances corrigées dans la géométrie de visée de SPOT4, le 19/06/99, protocole de 12h08

Les quelques résultats présentés ci-dessus ne valident pas la démarche suivie. Ils ne sont cependant pas négatifs. Pour réaliser un modèle de BRDF, nous devons considérer avec plus d'attention l'hypothèse de la symétrie par rapport au plan du Soleil. Il nous faudra également séparer d'éventuels effets atmosphériques de la variabilité spatiale de la réflectance.

Il sera nécessaire, pour l'étalonnage de SPOT, d'utiliser le précédent modèle de BRDF qui, s'il est plus ancien, donne des résultats plus satisfaisants.

CONCLUSION DU CHAPITRE

Nous réunissons, à la fin de ce chapitre, tous les paramètres nécessaires à la prédiction du signal TOA. Nous connaissons en effet les réflectances de surface, l'épaisseur optique aérosol, la quantité de vapeur d'eau et nous disposons d'un modèle d'aérosol. Nous pouvons donc aborder l'étalonnage des capteurs SPOT.

CHAPITRE 4. ÉTALONNAGE EN RÉFLECTANCE

Nous avons rappelé au premier chapitre les différentes méthodes d'étalonnage des capteurs SPOT. Après avoir décrit la station de La Crau, son étalonnage et la précision des mesures, nous avons utilisé ses mesures pour décrire l'atmosphère et la surface. Il reste à prédire le signal TOA pour mettre en œuvre l'étalonnage des capteurs SPOT.

1 MÉTHODOLOGIE

Le principe de l'étalonnage sur site test a été décrit au chapitre 1. Nous allons maintenant détailler sa méthodologie.

1-1 Comptes numériques des sites

La première étape consiste à repérer le « grand site » sur les images SPOT prises sur La Crau. Nous disposons d'images de niveau 1A (image après égalisation) (Figure 4-1). La plaine de La Crau est aisément identifiable : une étendue à peu près uniforme, avec quelques parcelles de cultures très géométriques qui se démarquent nettement. Le site d'étalonnage est facile à repérer à partir des chemins qui parcourent la plaine. Le coin Nord-Ouest du site est proche de la convergence de six chemins (Figure 4-2).

Les images sont livrées sur CD-rom, en format entrelacé ; les différents canaux (quatre dans le cas de SPOT4, trois dans le cas de SPOT1 et 3) sont contenues dans un seul fichier. Après séparation des images, on peut les visualiser avec des logiciels tels que Sphinx (développé par le LOA) ou Seadas. Ces logiciels vont nous permettre de repérer le site d'étalonnage sur l'image SPOT et de calculer les comptes numériques moyens sur le site. De plus, un code développé au laboratoire permet de calculer les comptes numériques moyens du grand site et du petit site à partir des coordonnées en pixels du coin Nord-Ouest du grand site. Le petit est repéré de façon approximative (Figure 4-3)

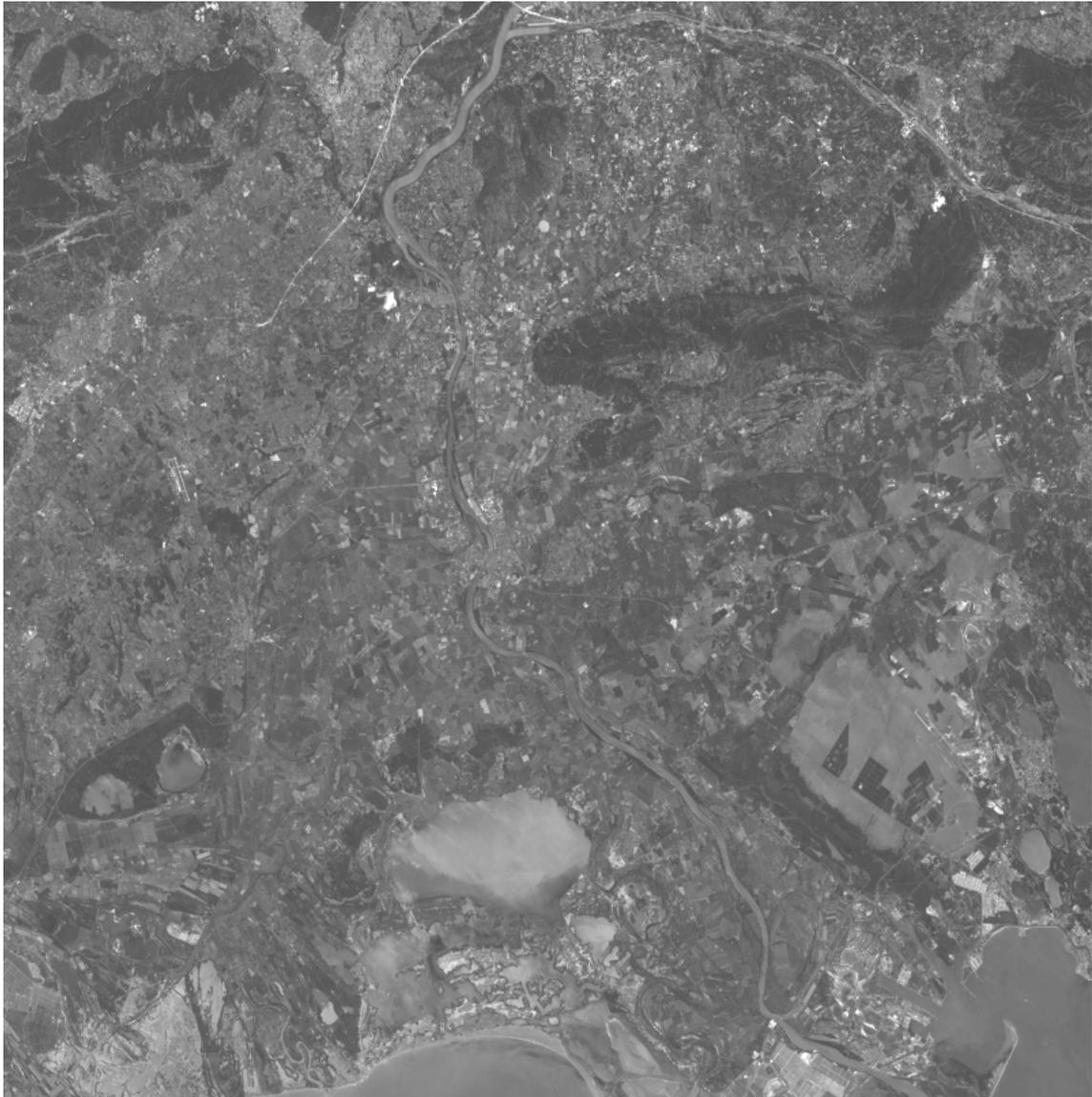
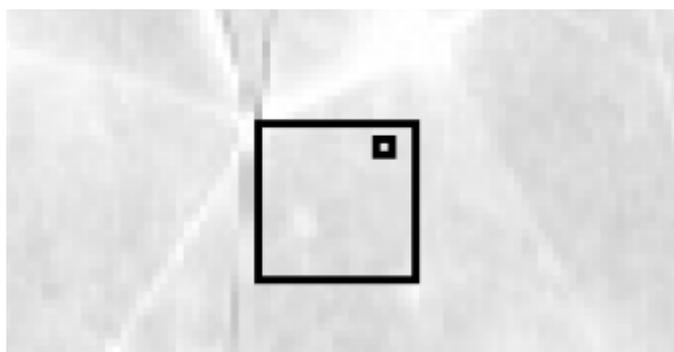


Figure 4-1 : Image SPOT (niveau 1A), prise le 12/06/1999 à 10h57 dans le canal B1 (la luminosité de l'image a été augmentée pour l'impression). La plaine de La Crau est visible en bas à droite de l'image.



Figure 4-2 : Gros plan sur la plaine de La Crau dans le canal MIR, image du 24/06/1999 à 10h26. On distingue nettement les chemins qui permettent de repérer le site d'étalonnage.



*Figure 4-3 : Gros plan sur les sites. Les deux sites sont matérialisés par des carrés noirs.
Le coin du grand site est repéré par rapport au croisement des chemins.
Le petit site est repéré de façon approximative.*

Nous disposons au laboratoire d'un grand nombre de prises de vue de La Crau faites par les différents SPOT de 1996 à 2000. Nous pouvons extraire les comptes numériques des deux sites sur cette période, afin de vérifier la représentativité du petit site par rapport au grand site.

Tableau 4-1 : Rapport des comptes numériques moyens du grand site au petit site pour les quatre canaux.

date	B1	B2	B3	date	MIR
26/06/96	0,994	0,994	0,985	29/06/98	1,000
28/06/96	0,987	0,976	0,977	29/06/98	0,994
06/07/96	0,987	0,980	0,983	30/06/98	1,000
09/07/96	0,988	0,984	0,985	30/06/98	0,985
11/07/96	0,980	0,980	0,975	04/07/98	1,000
06/07/97	0,984	0,979	0,974	04/07/98	0,989
07/07/97	0,971	0,972	0,984	06/11/98	1,000
08/07/97	0,982	0,976	0,981	07/11/98	1,000
08/07/97	0,987	0,974	0,977	11/11/98	0,983
09/07/97	0,985	0,978	0,983	12/06/99	0,967
25/04/98	0,990	1,000	0,981	19/06/99	0,986
25/04/98	1,000	1,000	0,992	24/06/99	0,987
07/05/98	0,984	0,988	0,969		
22/06/98	0,970	0,978	0,975		
25/06/98	0,978	0,972	0,978		
27/06/98	0,983	0,967	0,973		
29/06/98	0,967	0,972	0,970		
29/06/98	0,976	0,981	0,985		
30/06/98	0,985	0,962	0,977		
30/06/98	0,980	0,975	0,986		
30/06/98	0,979	0,975	0,987		
01/07/98	0,986	0,983	0,976		
04/07/98	0,970	0,973	0,960		
04/07/98	0,969	0,963	0,981		
06/11/98	1,008	1,000	0,975		
07/11/98	0,993	0,993	0,992		
11/11/98	0,984	0,976	0,974		
12/06/99	0,965	0,955	0,955		
15/06/99	0,972	0,963	0,969		
19/06/99	0,979	0,964	0,981		
19/06/99	1,024	1,067	1,063		
22/06/99	0,970	0,969	0,968		
24/06/99	0,979	0,974	0,972		
03/02/00	0,806	0,756	0,979		
04/02/00	1,022	0,966	0,978		

Comme on le voit dans le Tableau 4-1, le rapport CN(grand site)/CN(petit site) est globalement inférieur à 1. Le Tableau 4-2 donne l'écart moyen entre les comptes numériques des deux sites. Nous devons envisager l'emploi d'un facteur correctif si nous utilisons les comptes numériques du grand site.

Tableau 4-2 : Écart moyen (%) entre les comptes numériques relevés sur le grand site et le petit site.

	B1	B2	B3	MIR	Tous
Écart (%)	1,8	2,5	2,4	0,9	2,1

Il faut cependant insister sur le fait que le repérage du petit site est approximatif, nous devons donc être prudent dans l'application d'un facteur correctif. Nous pouvons alors nous appuyer sur les mesures de réflectances effectuées sur les deux sites lors des campagnes de mesures de 1997 et 1999. Nous en donnons les résultats dans le Tableau 4-3. En juin 1997, les réflectances ont été évaluées avec le radiomètre MIR du LOA, qui présente des bandes semblables à celles de SPOT. En 1999, elles ont été mesurées avec un spectromètre de terrain puis intégrées sur les bandes de SPOT4.

Tableau 4-3 : Valeurs moyennes de la réflectance des deux sites lors des campagnes de juin 1997 et juin 1999. La moyenne des rapports (S_k) et l'écart donnés sont calculés sur les mesures de 1999.

	Canal	B1	B2	B3	MIR
juin 97	ρ grand site	0,104	0,135	0,252	0,300
	ρ petit site	0,133	0,150	0,284	0,360
	rapport	0,782	0,900	0,887	0,833
16/06/99	ρ grand site	0,1179	0,1563	0,2358	0,3367
	ρ petit site	0,1229	0,1622	0,2453	0,3403
	rapport	0,959	0,964	0,961	0,989
18/06/99	ρ grand site	0,1218	0,1627	0,239	0,3392
	ρ petit site	0,1189	0,1594	0,2411	0,3393
	rapport	1,024	1,021	0,991	1,000
19/06/99	ρ grand site	0,1149	0,1516	0,2301	0,3274
	ρ petit site	0,1227	0,1654	0,2506	0,3404
	rapport	0,936	0,917	0,918	0,962
	Moyenne S_k	0,973	0,967	0,957	0,984
	Écart (%)	2,79	3,48	4,55	1,66

La comparaison des réflectances des deux sites confirme que le petit site est plus réfléchissant que le grand site. La moyenne des rapports des réflectances des deux sites pourra être utilisée pour convertir la mesure sur le petit site en réflectance équivalente du grand site.

1-2 Caractérisation de la surface

La surface caractérisée par la station Cimel représente un disque d'un rayon de 18 mètres environ. La réflectance est évaluée à partir des mesures de luminances montantes du sol et du flux diffus descendant. Les mesures de luminances sont fonction des angles solaires et des angles de visées (Figure 4-4) : typiquement θ_s varie d'une dizaine de degrés au cours d'un protocole, φ_s varie d'une trentaine de degrés, la hauteur h_v varie de 5 à 60° et φ_v de 0 à 360°. Vers midi en été, φ_s varie d'environ 3° au cours d'une boucle en azimut.

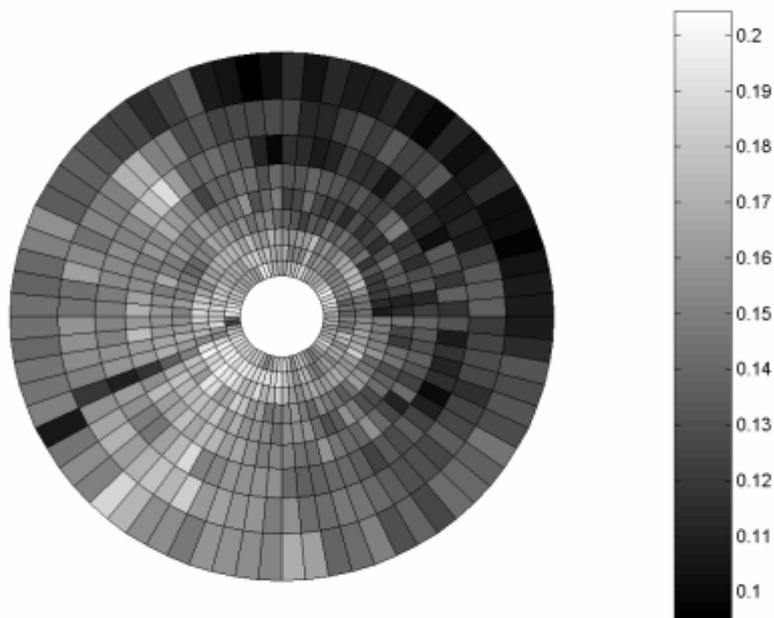


Figure 4-4 : Réflectance à 550 nm, représentée en coordonnées polaires telle qu'elle est « vue » par la station. On distingue l'ombre du mât à gauche. Les mesures pour h compris entre 5° et 15° sont absentes de la représentation.

La réflectance de surface $\rho(\theta_s^{\text{spot}}, \theta_v^{\text{spot}}, \Delta\phi^{\text{spot}})$ utilisée en entrée des codes est calculée à partir des valeurs $\rho(\theta_s, \theta_v, \Delta\phi)$ du protocole de mesure le plus proche de l'heure du passage du satellite. Nous utilisons le modèle de BRDF décrit au chapitre 1 afin de redresser les réflectances dans la géométrie de visée de SPOT.

Nous avons calculé, à partir des mesures de réflectances de la campagne de juin 1999, les réflectances intégrées sur les différents filtres (Figure 4-5 à Figure 4-8).

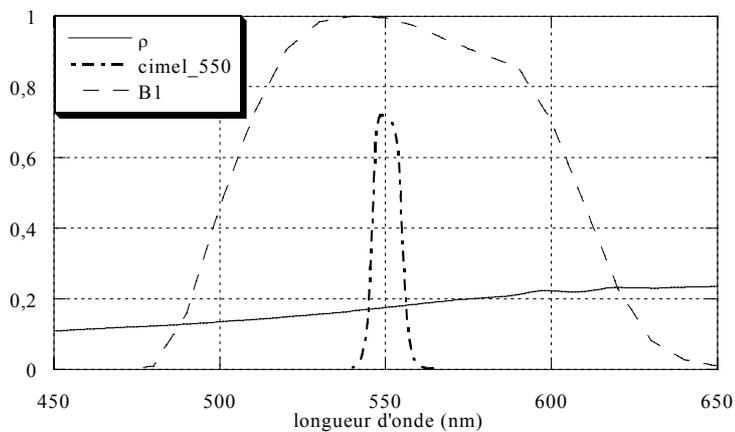


Figure 4-5 : Réflectance ρ en un point du site, transmission des filtres de la station et de SPOT4 (B1)

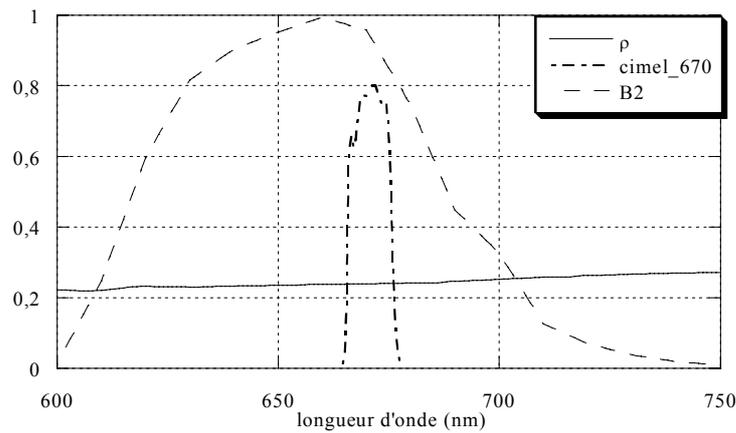


Figure 4-6 : Réflectance ρ en un point du site, transmission des filtres de la station et de SPOT4 (B2)

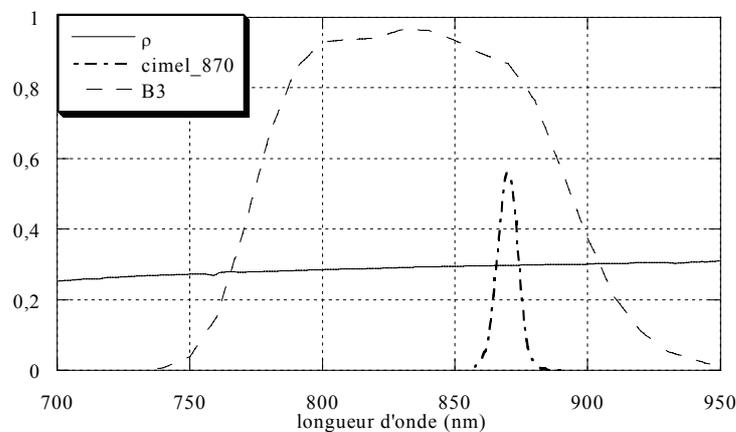


Figure 4-7 : Réflectance ρ en un point du site, transmission des filtres de la station et de SPOT4 (B3)

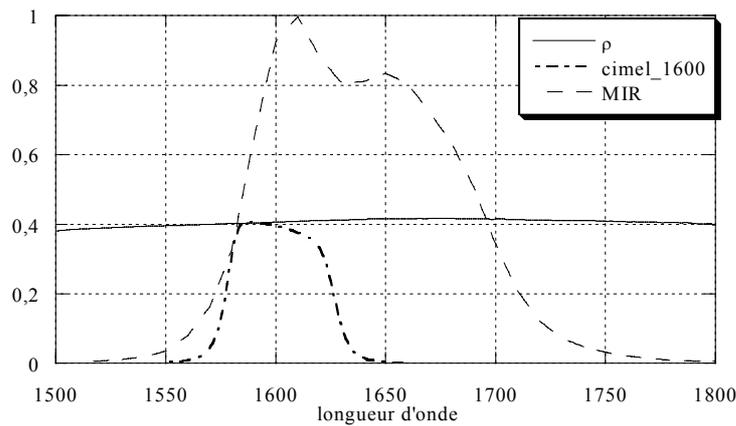


Figure 4-8 : Réflectance ρ en un point du site, transmission des filtres de la station et de SPOT4 (MIR)

Les quatre figures précédentes illustrent la variation de la réflectance dans les différents filtres ; si la réflectance est relativement plate dans les canaux B2 et 670 nm, ce n'est pas vrai dans les autres canaux. Ceci est confirmé dans le Tableau 4-4, où l'on voit que l'écart entre les réflectances dépasse 1% à 550, 3% à 870 et 2% à 1600 nm.

Tableau 4-4 : Comparaison des réflectances mesurées avec le spectromètre sur le grand site, intégrées sur les bandes de SPOT et sur les bandes de la station Cimel.

Date	Instrument	B1	B2	B3	MIR
15/06/99	SPOT	0,1164	0,1520	0,2340	0,3243
	Cimel	0,1156	0,1513	0,2413	0,3171
16/06/99	SPOT	0,1182	0,1562	0,2358	0,3363
	Cimel	0,1168	0,1563	0,2430	0,3294
18/06/99	SPOT	0,1222	0,1629	0,2392	0,3395
	Cimel	0,1203	0,1636	0,2465	0,3323
19/06/99	SPOT	0,1155	0,1520	0,2303	0,3275
	Cimel	0,1144	0,1520	0,2378	0,3203
22/06/99	SPOT	0,1166	0,1544	0,2270	0,3286
	Cimel	0,1151	0,1549	0,2340	0,3217
moyenne	SPOT	0,1173	0,1548	0,2323	0,3300
	Cimel	0,1160	0,1549	0,2396	0,3230
	Rapport f_k	1,011	0,999	0,970	1,022
	Écart (%)	1,12	-0,06	-3,12	2,14

Nous pouvons tracer les réflectances intégrées sur les bandes de SPOT4 en fonction des réflectances intégrées sur les bandes de la station, afin d'y chercher une tendance. Les Figure 4-9 à Figure 4-12 incluent toutes les mesures de réflectances faites avec le spectromètre de terrain sur le grand site lors de la campagne de juin 1999.

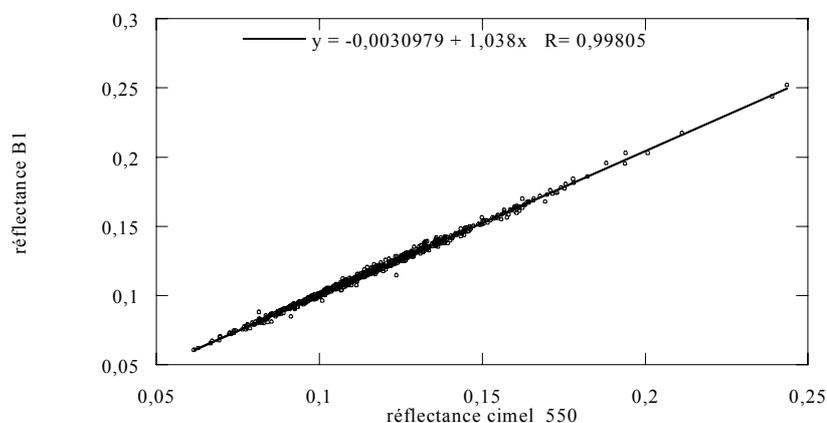


Figure 4-9 : Allure de la réflectance équivalente dans la bande B1 en fonction de la réflectance équivalente dans la bande 550 de la station

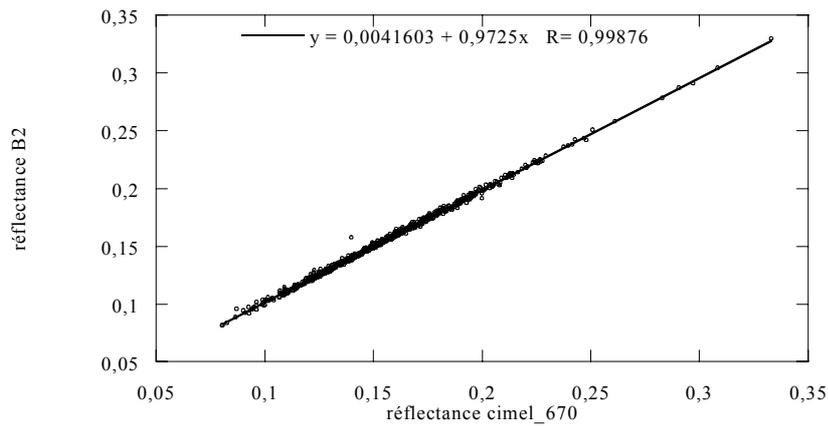


Figure 4-10 : Allure de la réflectance équivalente dans la bande B2 en fonction de la réflectance équivalente dans la bande 670 de la station

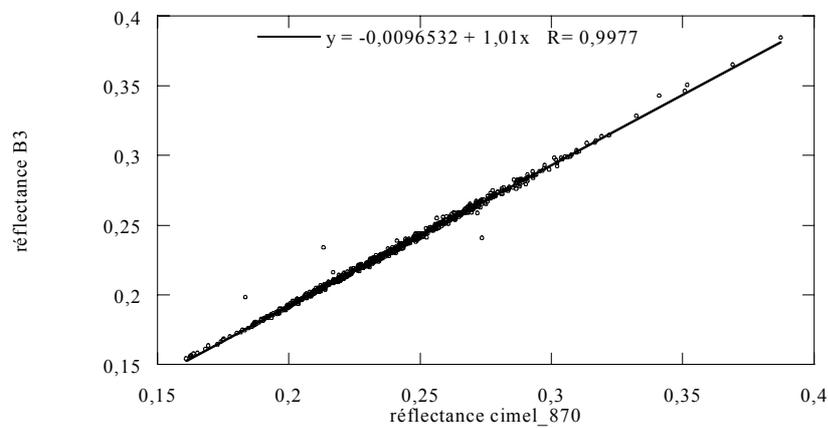


Figure 4-11 : Allure de la réflectance équivalente dans la bande B3 en fonction de la réflectance équivalente dans la bande 870 de la station

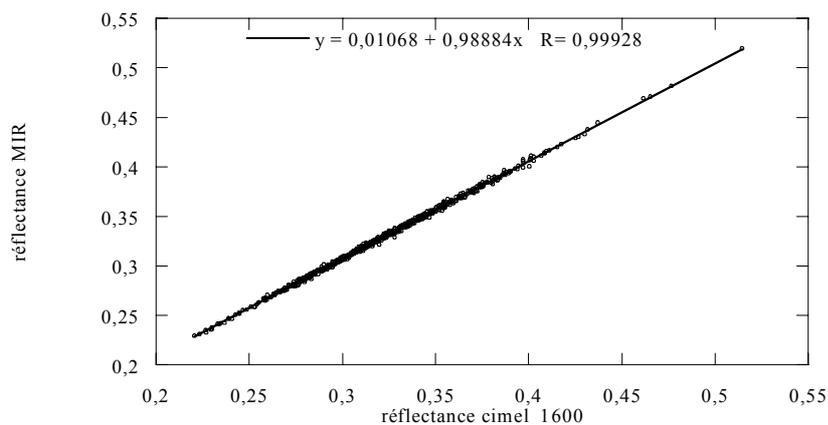


Figure 4-12 : Allure de la réflectance équivalente dans la bande MIR en fonction de la réflectance équivalente dans la bande 1600 de la station

La tendance linéaire est très nette. Nous pourrions effectuer des régressions linéaires du type $\rho_{SPOT} = r_0 + r_1 \cdot \rho_{cimel}$. Cette loi linéaire va nous permettre d'extrapoler les réflectances mesurées par la station en réflectances équivalentes dans les canaux SPOT.

Nous avons vu que les réflectances des deux sites n'étaient pas équivalentes. Les réflectances mesurées par SPOT ne sont pas non plus équivalentes aux réflectances mesurées par la station Cimel. Il nous faudra effectuer une double correction des mesures de la station afin d'améliorer la précision de l'étalonnage.

1-3 Caractérisation de l'atmosphère

1-3-1 Contenu gazeux

Les deux gaz que nous prenons en compte pour le calcul des transmissions gazeuses sont la vapeur d'eau et l'ozone.

La quantité d'ozone est déterminée à partir de données météorologiques. La valeur utilisée pour le mois de juin à La Crau est $U_{O_3} = 0,330 \text{ cm.atm}$ et en novembre de $0,300 \text{ cm.atm}$

La quantité de vapeur d'eau U_{H_2O} est déterminée à partir des mesures de la station Cimel. Nous disposons de nombreuses estimations de U_{H_2O} , toutes les 7 minutes environ pendant les mesures de réflectances de sol, toutes les 15 minutes sinon. Nous donnons la variation de la quantité de vapeur d'eau pour deux journées correspondant à des passages de SPOT, les 12 et 19 juin 1999 (Figure 4-13 et Figure 4-14). La quantité de vapeur d'eau utilisée pour novembre 1998 est une valeur climatologique.

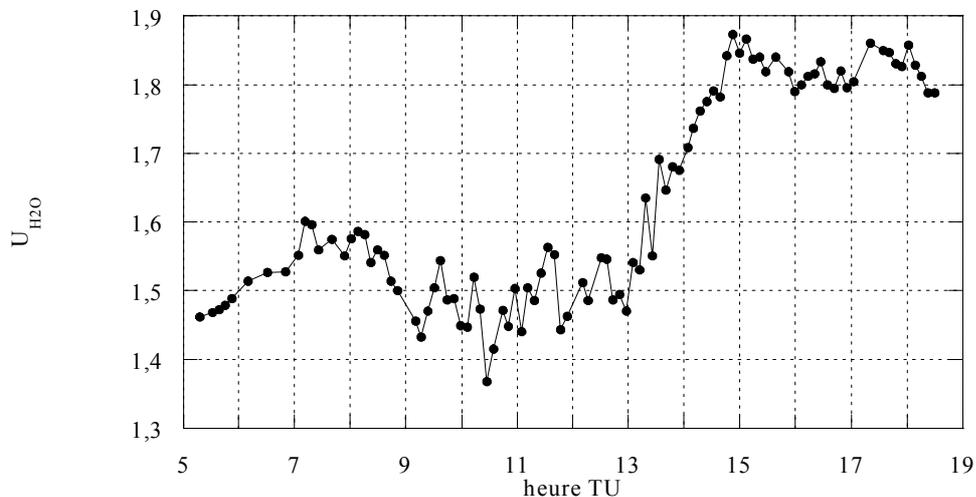


Figure 4-13 : Variation de la quantité de vapeur d'eau U_{H_2O} (g.cm⁻²) le 12/06/1999

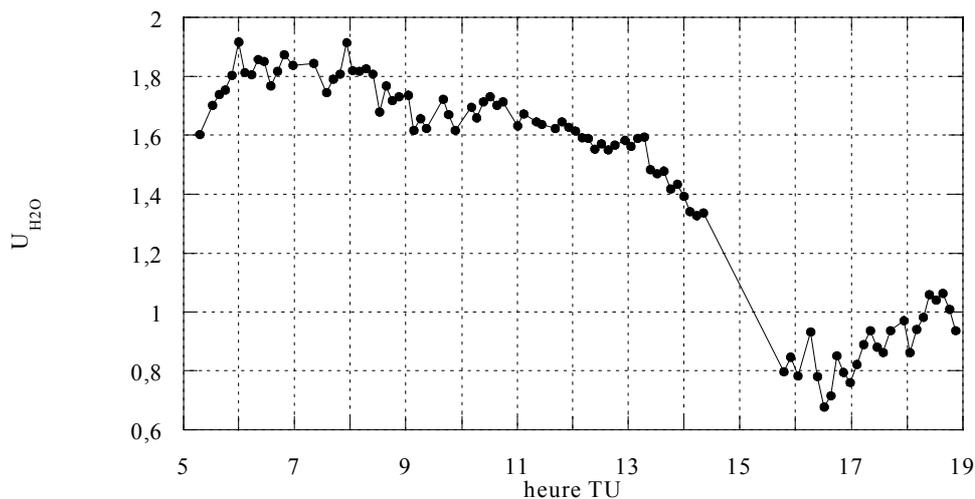


Figure 4-14 : Variation de la quantité de vapeur d'eau U_{H_2O} ($g.cm^{-2}$) le 19/06/1999

La quantité de vapeur d'eau utilisée en entrée des codes est moyennée sur une demi-heure environ autour de l'heure de passage.

1-3-2 Aérosols

Notre modélisation des aérosols est entièrement basée sur la dépendance spectrale de l'épaisseur optique aérosol ; c'est-à-dire le coefficient d'Angström α . Celui-ci est calculé à partir des épaisseurs optiques instantanées à 380, 440, 550, 670 et 870 nm. Comme nous l'avons dit plus haut, les mesures à 1600 nm sont inutilisables. À 1020 nm, même si l'on applique une correction en température, les effets ne sont pas entièrement corrigés. Ceci apparaît clairement sur les figures suivantes, où l'épaisseur optique à 1020 nm est surestimée malgré la correction.

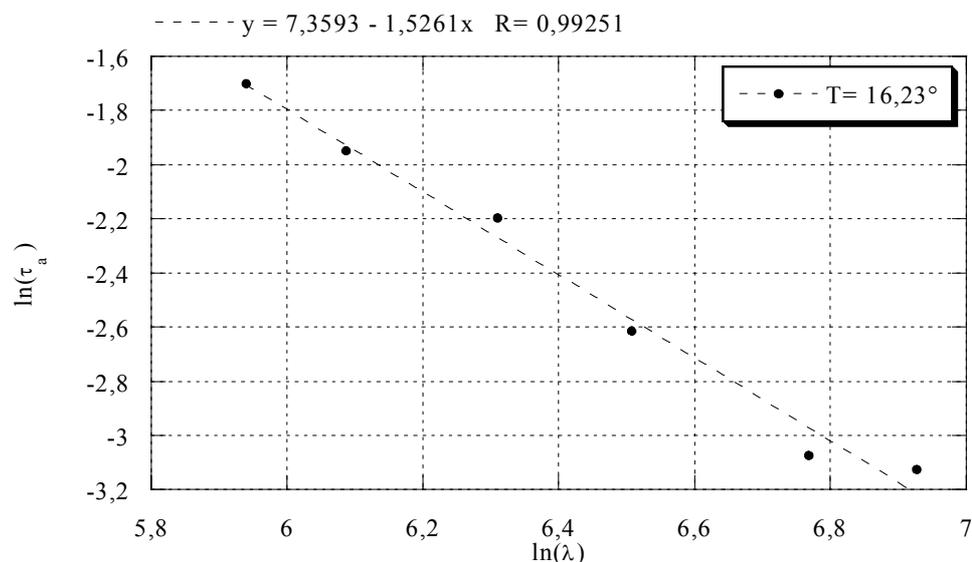


Figure 4-15 : Calcul du coefficient d'Angström par régression linéaire de $\ln(\tau_a)$ en fonction de $\ln(\lambda)$, le 12/06/99. La température du détecteur est de $16,23^\circ$

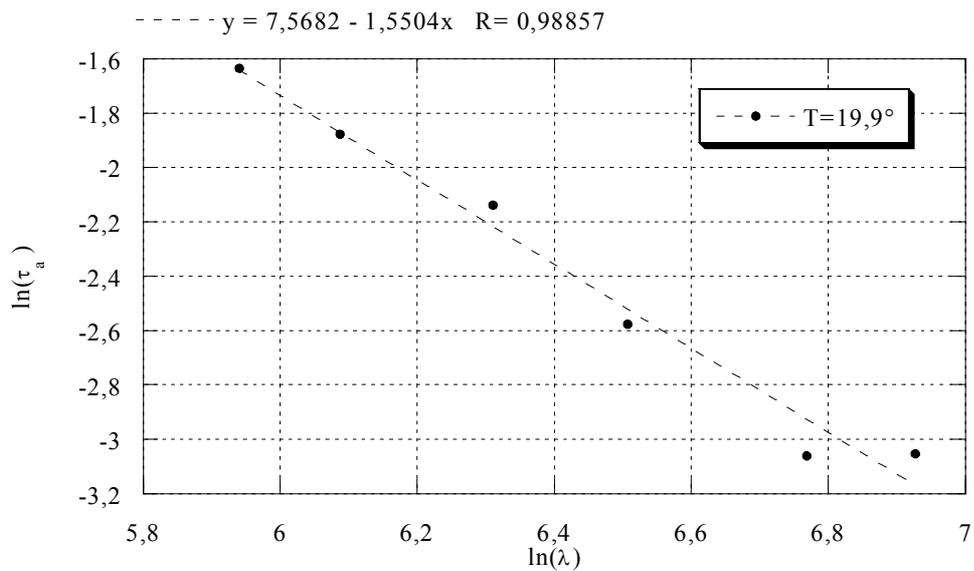


Figure 4-16 : Calcul du coefficient d'Angström par régression linéaire de $\ln(\tau_a)$ en fonction de $\ln(\lambda)$, le 12/06/99. La température du détecteur est de 19,9°.

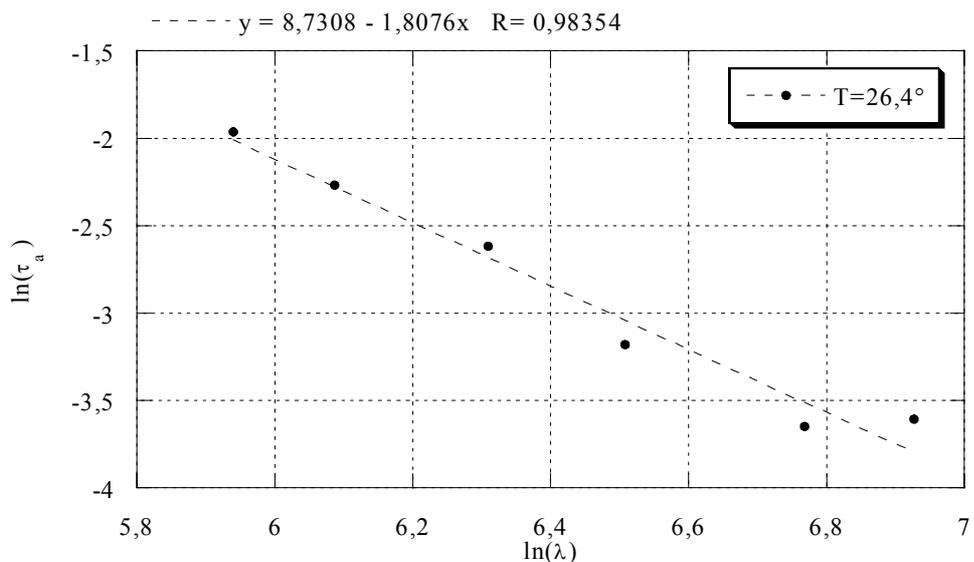


Figure 4-17 : Calcul du coefficient d'Angström par régression linéaire de $\ln(\tau_a)$ en fonction de $\ln(\lambda)$, le 12/06/99. La température du détecteur est de 26,4°.

Comme on peut le constater sur les Figure 4-15 à Figure 4-17, la correction en température ne suffit pas à éliminer totalement l'effet de température sur le détecteur Silicium à 1020 nm. Nous n'utiliserons donc pas ce canal pour le calcul du coefficient d'Angström.

Nous déterminons à partir du coefficient d'Angström le paramètre de Junge $\nu = \alpha - 3$. Les autres paramètres dont nous avons besoin pour compléter notre modèle sont les rayons minimum r_{\min} , maximum r_{\max} et intermédiaire r_0 (Figure 4-18). Ces paramètres sont fixes :

- $r_{\min} = 0,01 \mu\text{m}$
- $r_0 = 0,1 \mu\text{m}$
- $r_{\max} = 10 \mu\text{m}$

L'indice de réfraction est obtenu par la méthode décrite au chapitre 3.

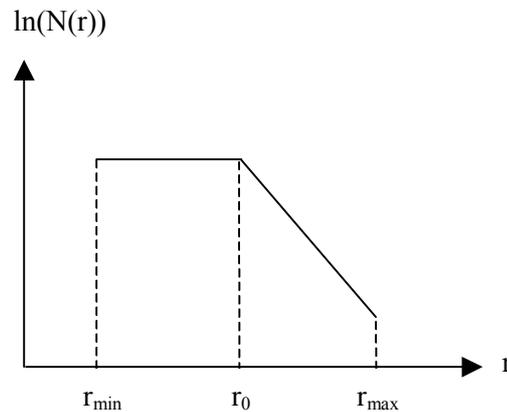


Figure 4-18 : Allure de la granulométrie des aérosols dans le cas d'une loi de Junge

Nous utilisons la théorie de Mie pour estimer les propriétés radiatives des aérosols. Les sections efficaces d'extinction et de diffusion (et les coefficients d'extinction et de diffusion correspondants) sont calculés pour chaque rayon r compris entre r_{\min} et r_{\max} , de même que la fonction de phase. Ces quantités sont ensuite intégrées par rapport à la granulométrie. Nous obtenons finalement la fonction de phase de diffusion des aérosols ainsi que leur albédo de simple diffusion.

1-4 Estimation du signal TOA

Nous disposons de tous les paramètres nécessaires à la simulation du signal TOA : réflectance de surface dans les conditions géométriques de visée du satellite, épaisseur optique de diffusion moléculaire, épaisseur optique aérosol, contenu en gaz absorbants. La première étape consiste à calculer la transmission gazeuse dans 6S. La seconde est d'évaluer la luminance TOA avec le code des Ordres Successifs (Santer *et al.*, 1992) (Figure 4-19).

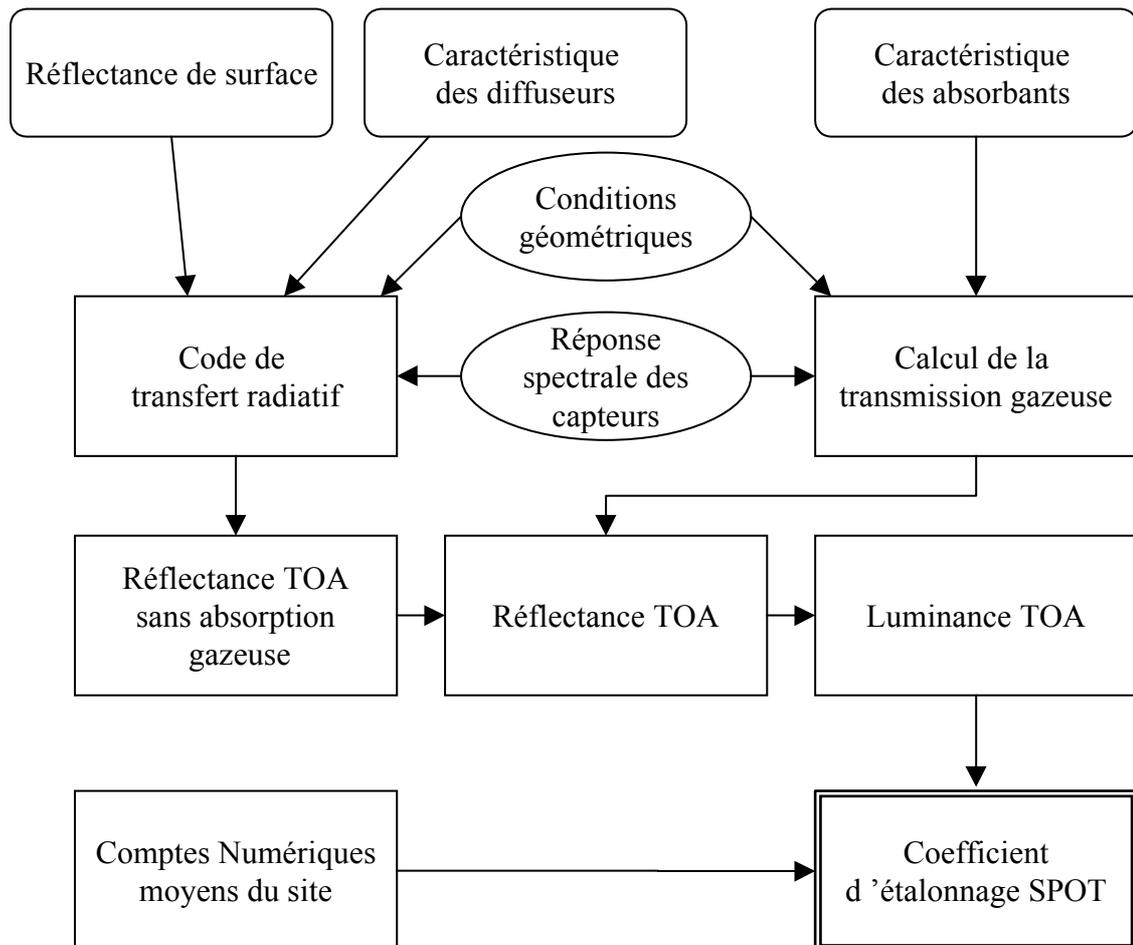


Figure 4-19 : Schéma de calcul du coefficient d'étalonnage de SPOT

1-4-1 Les entrées des codes.

Le fichier d'entrée des codes d'étalonnage contient les données suivantes :

- Numéro du satellite SPOT
- Numéro des caméras HRV
- Date
- Conditions géométriques $\theta_s, \theta_v, \varphi_s, \varphi_v$
- Quantité de vapeur d'eau
- Réflectances de surface $\rho(k)$ ($k = B1, B2, B3$ et MIR ou panchromatique)
- Épaisseurs optiques Rayleigh intégrées sur les filtres
- Épaisseurs optiques des aérosols
- Fonction de phase des aérosols

- Éclairiments intégrés sur les filtres $E_s(k)$
- Gains $m(k)$
- Comptes numériques des images $CN(k)$

1-4-2 Calcul de la transmission gazeuse

Les transmissions gazeuses sont calculées par l'intermédiaire du code 6S. Ce code a été modifié, notamment par l'ajout des bandes de SPOT4 et Végétation.

Les paramètres utiles sont la quantité de vapeur d'eau, en $g.cm^{-2}$, le numéro du satellite et de la caméra ainsi que les angles de visées et les angles solaires. La transmission est calculée sur chaque bande de SPOT. La transmission de l'ozone est calculée dans chaque bande de SPOT par 6S, pour la quantité donnée plus haut. La transmission totale $T_g(k)$ est le produit de la transmission de la vapeur d'eau et de la transmission de l'ozone.

1-4-3 Calcul de la luminance TOA

Tous les paramètres d'entrée sont utilisés, à part la quantité de vapeur d'eau. Nous prenons une hauteur d'échelle de 8 km pour le Rayleigh et de 2 km pour les aérosols. Le code des Ordres Successifs décrit au chapitre 1 calcule la luminance TOA normalisée $L_{norm}^{TOA}(k)$ pour chaque bande du satellite. La luminance $L^{TOA}(k)$ s'écrit alors :

$$L^{TOA}(k) = \frac{E_s(k)}{\pi \cdot d^2} L_{norm}^{TOA}(k) T_g(k) \quad \text{équation 4-1}$$

avec d la distance Terre–Soleil en Unités Astronomiques.

Le coefficient d'étalonnage A_k est obtenu par :

$$A_k = \frac{CN(k)}{G(k) \cdot L^{TOA}(k)} \quad \text{équation 4-2}$$

où $G(k)$, le gain, vaut $(1,5)^{m(k)-2}$ dans le cas de SPOT4 et $(1,3)^{m(k)-3}$ pour SPOT1, 2 et 3.

2 APPLICATION DE LA MÉTHODE

La station Cimel pour l'étalonnage de SPOT a fonctionné de façon complète en 1999 et 2000. La station a également fonctionné, quoique de façon imparfaite, en novembre 1998. Nous disposons, sur cette période, de plusieurs prises de vue de La Crau.

2-1 Images SPOT utilisables pour l'étalonnage

En novembre 1998, nous avons trois images de La Crau par SPOT4, les 6, 7 et 11 novembre. La station fonctionnait les 6 et 7. Les mesures d'extinction sont incomplètes à cause d'un problème de programmation de l'instrument : la position du Soleil n'était pas recalculée pendant le protocole Sol. Nous supposons que les mesures de réflectances sont correctes, car elles prennent leur référence au Sud et non pas sur la position du Soleil.

En juin 1999, nous avons une image de SPOT1 le 22, deux images de SPOT2 le 15 et le 19 et quatre images de SPOT4, le 12, le 17, le 19 et le 24. Nous disposons de mesures le 12, le 17 et le 19 juin. Le 17 juin, quelques nuages cachent le site, il est impossible de relever les comptes numériques.

Tableau 4-5 : Caractéristiques des images SPOT4

Date	Gains	θ_s	φ_s	θ_v	φ_v	CN _{B1}	CN _{B2}	CN _{B3}	CN _{MIR}
06/11/98	6 6 5 4	59,9	170,7	9,3	283,1	126	124	117	121
07/11/98	6 6 5 4	60,8	165,5	19,3	99,8	137	134	125	127
12/06/99	4 3 3 3	22,4	153,3	20,2	284,4	109	84	85	174
19/06/99	4 3 3 3	25,9	134,9	29,7	98,5	137	106	101	210

Tableau 4-6 : Caractéristiques des images SPOT2

Date	Gains	θ_s	φ_s	θ_v	φ_v	CN _{B1}	CN _{B2}	CN _{B3}	CN _{pan}
19/06/99 (HRV2)	8 8 5	22,7	148,9	9,0	283,0	127	98	85	–
19/06/99 (HRV1)	8	22,7	149,1	9,3	283,2	–	–	–	118

Nous pouvons donc appliquer la méthode d'étalonnage à cinq images SPOT.

2-2 Conditions atmosphériques

Nous reportons dans les Tableau 4-7 et Tableau 4-8 les conditions atmosphériques lors des passages SPOT. Le 12 juin et le 19 juin, nous trouvons pour l'indice des aérosols 1,33-0,005i. Pour les 6 et 7 novembre, l'indice est 1,45-0,005i.

Tableau 4-7 : Conditions atmosphériques pour le passage de SPOT2

Date	$\tau_a(B1)$	$\tau_a(B2)$	$\tau_a(B3)$	$\tau_a(pan)$	α	U_{H_2O} (g.cm ⁻²)
19/06/99	0,11674	0,07048	0,04241	0,09819	1,99	1,68

Tableau 4-8 : Conditions atmosphériques pour les passages de SPOT4

Date	$\tau_a(B1)$	$\tau_a(B2)$	$\tau_a(B3)$	$\tau_a(MIR)$	α	U_{H_2O} (g.cm ⁻²)
06/11/98	0,08315	0,05485	0,02488	–	1,67	0,85
07/11/98	0,07165	0,04695	0,02115	–	1,68	0,85
12/06/99	0,07866	0,04526	0,02876	–	2,01	1,47
19/06/99	0,11811	0,07124	0,04257	–	1,98	1,68

2-3 Réflectance de surface

Les mesures de réflectances de novembre 1998 sont sujettes à caution ; en effet la station fonctionnait encore de façon imparfaite. En particulier, nous n'avons pas de mesures d'extinction après la boucle à 20° du protocole Sol. De plus, les données de luminances se présentent sous un format différent que le code de calcul de la réflectance ne prend pas en compte. Les réflectances sont donc calculées comme étant le rapport du flux montant sur le flux direct descendant.

Nous avons pris pour le 12 juin les mesures de réflectances les plus proches de l'heure de passage (10h57), c'est-à-dire les mesures faites entre 9h17 et 10h39. Pour le 19 juin, nous avons dû utiliser les mesures faites entre 11h07 et 12h50 bien que les heures de passage de SPOT2 et SPOT4 soient 10h51 et 10h23 respectivement. Pour ces deux journées, les mesures de réflectances faites au moment des passages étaient incomplètes.

Tableau 4-9 : Réflectances pour le passage de SPOT2

Date	$\rho(B1)$	$\rho(B2)$	$\rho(B3)$	$\rho(\text{pan})$
19/06/99	0,1495	0,2113	0,2685	0,1804

Tableau 4-10 : Réflectances pour les passages de SPOT4

Date	$\rho(B1)$	$\rho(B2)$	$\rho(B3)$	$\rho(\text{MIR})$
06/11/98	0,0796	0,0878	0,2407	–
07/11/98	0,0989	0,1097	0,2882	–
12/06/99	0,1303	0,1742	0,2488	–
19/06/99	0,1394	0,1927	0,2563	–

Nous pouvons appliquer aux réflectances des tableaux ci-dessus les facteurs correctifs évoqués plus haut. Nous utilisons une simple règle de trois pour estimer la réflectance du grand site à partir de celle mesurée sur le petit site et une loi linéaire pour l'effet spectral :

$$\rho_k^{\text{corr}} = S_k \cdot (r_1 \cdot \rho_k + r_0) \quad \text{équation 4-3}$$

où S_k est le facteur correctif de l'écart de réflectance du grand site par rapport au petit site (Tableau 4-3) et $r_1 \cdot \rho + r_0$ la loi déduite des courbes de la Figure 4-9 à la Figure 4-12.

Nous obtenons les valeurs suivantes :

Tableau 4-11 : Réflectances corrigées pour le passage de SPOT2

Date	$\rho^{\text{corr}}(B1)$	$\rho^{\text{corr}}(B2)$	$\rho^{\text{corr}}(B3)$	$\rho^{\text{corr}}(\text{pan})$
19/06/99	0,1480	0,2081	0,2503	0,1781

Tableau 4-12 : Réflectances corrigées pour les passages de SPOT4

Date	$\rho^{\text{corr}}(B1)$	$\rho^{\text{corr}}(B2)$	$\rho^{\text{corr}}(B3)$	$\rho^{\text{corr}}(\text{MIR})$
06/11/98	0,0774	0,0888	0,2234	–
07/11/98	0,0969	0,1100	0,2693	–
12/06/99	0,1286	0,1723	0,2312	–
19/06/99	0,1378	0,1901	0,2385	–

2-4 Résultats

Les coefficients d'étalonnage de SPOT2 et SPOT4 obtenus sont rassemblés dans les Tableau 4-13 et Tableau 4-14. Nous donnons les coefficients calculés avec et sans correction de la réflectance pour l'été 1999. Nous les donnons également pour le 6 et le 7 novembre 1998

bien que la correction soit basée sur des mesures faites en été et que la réflectance soit sensiblement différente en hiver.

Tableau 4-13 : Coefficients d'étalonnage pour SPOT2, calculés avec et sans correction de la réflectance

Date	A(B1)	A(B2)	A(B3)	A(pan)
19/06/99 sans correction	0,3791	0,2767	0,6405	0,3562
19/06/99 avec correction	0,3820	0,2805	0,6856	0,3601

Tableau 4-14 : Coefficients d'étalonnage pour SPOT4, calculés avec et sans correction de la réflectance

Date	A(B1)	A(B2)	A(B3)	A(MIR)
06/11/98 sans correction	0,7487	0,9604	0,8890	–
06/11/98 avec correction	0,7603	0,9524	0,9549	–
07/11/98 sans correction	0,6997	0,8762	0,8171	–
07/11/98 avec correction	0,7080	0,8684	0,8722	–
12/06/99 sans correction	0,6319	0,7229	0,8054	–
12/06/99 avec correction	0,6382	0,7300	0,8649	–
19/06/99 sans correction	0,7267	0,8370	0,9567	–
19/06/99 avec correction	0,7326	0,8470	1,0251	–

L'accord entre les coefficients des deux périodes (pour SPOT4) n'est pas très bon : de 13 à 16% d'écart d'un jour à l'autre en juin 1999 et de 6 à 9% en novembre 1998.

3 BILAN D'ERREUR

3-1 Identification des postes d'erreurs

La réflectance apparente s'écrit, dans la formulation 6S :

$$\rho^* = T_g \cdot (\rho_{atm} + T_{atm} \cdot \rho_s) \quad \text{équation 4-4}$$

où T_g est la transmission gazeuse, T_{atm} est la transmission atmosphérique, ρ_{atm} est la réflectance atmosphérique et ρ_s est la réflectance de surface.

La différenciation de l'équation 4-4 nous donne en premier lieu :

$$\frac{d\rho^*}{\rho^*} = \frac{dT_g}{T_g} + \frac{d(\rho_{atm} + T_{atm} \cdot \rho_s)}{\rho_{atm} + T_{atm} \cdot \rho_s} \quad \text{équation 4-5}$$

Le terme $\rho_{atm} + T_{atm}\rho_s$ peut être écrit sous la forme :

$$\rho_s^* = \rho_R + \rho_a + \rho_{cRa} + T_a T_R \rho_s \quad \text{équation 4-6}$$

où ρ_s^* représente la réflectance apparente corrigée de la transmission gazeuse, ρ_R la réflectance moléculaire, ρ_a la réflectance des aérosols, ρ_{cRa} la réflectance du couplage molécules-aérosols,

T_a la transmission aérosol et T_R la transmission moléculaire. Si l'on différencie ce terme, on obtient :

$$d\rho_s^* = (d\rho_R + T_a \rho_s dT_R) + (d\rho_a + T_R \rho_s dT_a) + (T_a T_R d\rho_s) + d\rho_{cRa} \quad \text{équation 4-7}$$

Le premier terme du membre de droite de l'équation 4-7 correspond à l'incertitude sur la diffusion moléculaire, le second l'incertitude sur les aérosols et le troisième l'incertitude sur la réflectance de surface. Le couplage molécules-aérosols étant un terme du second ordre, on considère que $d\rho_{cRa}$ est négligeable.

Les postes d'erreur sont donc la transmission gazeuse, la diffusion moléculaire, les aérosols et la réflectance de surface.

3-1-1 Erreur sur la réflectance de surface

Selon Gu (Gu *et al.*, 1992), l'erreur sur la réflectance de surface est reliée aux facteurs suivants :

- erreur due au radiomètre :
 - bruit
 - dérive thermique
 - stabilité à long terme
 - étalonnage absolu
 - angles de mesure
- erreur sur la mesure de l'éclairement :
 - variation de l'éclairement solaire direct
 - variation de l'éclairement diffus

Détaillons ces points et leur prise en compte dans l'évaluation de l'erreur sur la réflectance de surface. Pour l'erreur due au radiomètre, nous prenons en compte essentiellement l'erreur sur l'étalonnage absolu. En effet, les mesures de bruit faites lors des campagnes de mesures indiquaient que ce dernier est négligeable. La dérive thermique de l'instrument est sensible uniquement à 1600 nm et ce canal n'a tout simplement pas été utilisé pour l'étalonnage. La stabilité à long terme de l'instrument est démontrée par l'évolution temporelle des coefficients CN_0 entre l'été 1999 et le printemps 2000 ; la variation maximale est de 2,5 % (à 1020 Si) et elle atteint 1% (à 550) dans les canaux utilisés pour l'étalonnage de SPOT. Enfin, la station Cimel utilise des moteurs pas-à-pas très précis qui garantissent une bonne précision de visée. Toutefois, la plaine de La Crau est régulièrement balayée par de forts vents ; le mât peut alors osciller de façon perceptible. Cet effet est visible sur les comptes numériques correspondant à la visée du Soleil.

La variation de l'éclairement direct et de l'éclairement diffus au cours des mesures doit être pris en compte. La définition du protocole de mesure des réflectances limite l'influence de la variation du flux direct : il est évalué toutes les six à sept minutes environ. La variation de

l'éclairement direct, entre deux mesures successives, de dix heures à midi vaut en moyenne 0,8 % à 550, 0,5 % à 670 et 0,4 % à 870 nm le 12 juin. Elle vaut 0,7 % à 550, 0,5 % à 670 et 0,3 % à 870 nm le 19 juin.

La variation entre deux mesures du flux diffus peut atteindre, d'après Gu (Gu *et al.*, 1992), 100% en 5 minutes. Les mesures de luminances dans le plan principal et l'almucantar utilisées pour le calcul du flux diffus sont effectuées toutes les 70 minutes. De plus, les mesures d'almucantar ne sont pas effectuées quand le Soleil est trop haut, donc en général lors des passages SPOT en été. La variation du flux diffus entre deux mesures atteint en moyenne 14% le 12 juin et 28 % le 19 juin.

Nous retenons les postes suivants pour la réflectance : variabilité du flux diffus, incertitude sur l'étalonnage absolu de l'éclairement direct $\Delta A_k/A_k$ et incertitude sur étalonnage absolu de la luminance $\Delta B_k/B_k$. Nous avons pu voir au chapitre 2 que l'étalonnage en luminance est sensible à la méthode d'étalonnage. Nous avons utilisé l'étalonnage sur la sphère du LOA de juin 1999 pour les mesures de juin 1999 et un étalonnage sur la sphère du DOTA de décembre 1998.

3-1-2 Erreur sur la diffusion Rayleigh

Nous avons relié, dans le chapitre 2, l'incertitude sur l'épaisseur optique Rayleigh à l'incertitude sur la pression atmosphérique.

$$\frac{\Delta \tau_R}{\tau_R} = \frac{\Delta P}{P} \quad \text{équation 4-8}$$

La réflectance moléculaire étant proportionnelle à l'épaisseur optique Rayleigh, nous obtenons :

$$\frac{\Delta \rho_R}{\rho_R} = \frac{\Delta P}{P} \quad \text{équation 4-9}$$

La transmission Rayleigh s'écrit de façon approchée :

$$T_R = \exp\left(-\frac{M \cdot \tau_R}{2}\right) \quad \text{équation 4-10}$$

avec M, la masse d'air totale sur le trajet Soleil-sol-satellite.

L'incertitude vaut alors :

$$\frac{\Delta T_R}{T_R} = \frac{M \cdot \Delta \tau_R}{2} \quad \text{équation 4-11}$$

Nous pouvons donc relier les incertitudes sur la diffusion Rayleigh à l'erreur sur la pression atmosphérique.

3-1-3 Incertitudes liées aux aérosols

L'incertitude sur l'épaisseur optique a été définie au chapitre 2 :

$$\Delta\tau = \frac{1}{m} \frac{\Delta CN_0}{CN_0} \quad \text{équation 4-12}$$

Nous avons donc, pour l'épaisseur optique aérosol :

$$\Delta\tau_a = \frac{1}{m} \frac{\Delta CN_0}{CN_0} + \Delta\tau_R \quad \text{équation 4-13}$$

L'erreur sur le coefficient d'Angström peut être reliée à l'erreur de la régression linéaire employée pour le calculer.

L'erreur commise si l'on utilise un indice de réfraction erroné sera estimée par des simulations avec les différents indices.

3-1-4 Incertitude sur la transmission gazeuse

L'incertitude sur la transmission gazeuse est directement reliée à l'incertitude sur les quantités de gaz absorbants (vapeur d'eau et ozone) présents dans l'atmosphère. Nous considérons une erreur de 20% sur la quantité de vapeur d'eau et sur la quantité d'ozone.

3-2 Quantification des erreurs

Après avoir identifié les différents postes d'erreur, nous allons maintenant quantifier les incertitudes et évaluer l'erreur commise sur la luminance TOA.

3-2-1 Incertitude sur la réflectance

L'incertitude sur les coefficients d'étalonnage en luminance et en éclairement a été évaluée au chapitre 2. Nous en rappelons ici les valeurs.

Tableau 4-15 : Incertitudes sur les coefficients d'étalonnage en luminance (sphère du LOA) et en éclairement pour l'été 1999

Canal	550	670	870
$\frac{\Delta B_k}{B_k}$	0,022	0,023	0,024
$\frac{\Delta A_k}{A_k}$	0,010	0,007	0,005

L'erreur due à la mauvaise prise en compte de la variation du flux diffus est plus délicate à chiffrer. Si nous appelons δ la quantité dont le flux diffus varie entre le moment t_i où il est mesuré et le moment t_f où la luminance montante est mesurée, nous pouvons écrire :

$$\rho(t_i) = \frac{\pi L}{\Phi_{Dir} + \phi_{diff}} \quad \text{équations 4-14}$$

$$\rho(t_f) = \frac{\pi L}{\Phi_{Dir} + \phi_{diff} + \delta}$$

Ceci nous donne :

$$\frac{\Delta\rho}{\rho} = \left| \frac{\rho(t_f) - \rho(t_i)}{\rho(t_i)} \right| = \frac{\delta}{\Phi_{Dir} + \phi_{diff} + \delta} \quad \text{équation 4-15}$$

Nous calculons la variabilité moyenne du flux diffus les 12 et 19 juin afin d'évaluer δ et $\Delta\rho/\rho$. Les valeurs obtenues sont données dans le Tableau 4-16

Tableau 4-16 : Incertitudes $\Delta\rho/\rho$ dues à la variabilité du flux diffus

Canal	550	670	870
12/06/99	0,0145	0,0026	0,0261
19/06/99	0,0198	0,0037	0,0308

Ces deux postes d'erreur induisent l'incertitude sur la réflectance de surface, que nous reportons dans le Tableau 4-17.

Tableau 4-17 : Incertitudes sur la réflectance de surface $\Delta\rho/\rho$

Canal	550	670	870
12/06/99	0,026	0,011	0,032
19/06/99	0,026	0,011	0,037

L'incertitude $\Delta\rho/\rho$ amène sur la luminance TOA une incertitude $\Delta L/L$ que nous quantifions à travers des simulations. Nous obtenons, pour les 3 passages de juin 1999 :

Tableau 4-18 : Erreur partielle $\Delta L/L$ sur la luminance TOA due à l'incertitude sur la réflectance de surface

Canal	$\Delta L/L(B1)$	$\Delta L/L(B2)$	$\Delta L/L(B3)$	$\Delta L/L(\text{pan})$
12/06/99 SPOT4	0,0209	0,0213	0,0337	–
19/06/99 SPOT4	0,0217	0,0209	0,0365	–
19/06/99 SPOT2	0,0227	0,0215	0,0370	0,0099

3-2-2 Incertitude sur la diffusion Rayleigh

Ces incertitudes sont calculées sur la base d'une erreur de ± 5 hPa. Nous avons :

$\frac{\Delta P}{P} = 0,01$, ce qui équivaut à : $\frac{\Delta \tau_R}{\tau_R} = 0,01$. Ceci nous donne les incertitudes sur τ_R et T_R reportées dans le Tableau 4-19.

Tableau 4-19 : Erreur sur la diffusion Rayleigh, le 12/06/99 pour SPOT4

	τ_R	$\Delta\tau_R$	$\Delta T_R/T_R$
B1	0,09786	0,0010	0,0011
B2	0,04906	0,0005	0,0005
B3	0,01863	0,0002	0,0002
MIR	0,00121	0	0

Tableau 4-20 : Erreur sur la diffusion Rayleigh, le 19/06/99 pour SPOT4

	τ_R	$\Delta\tau_R$	$\Delta T_R/T_R$
B1	0,09786	0,0010	0,0011
B2	0,04906	0,0005	0,0006
B3	0,01863	0,0002	0,0002
MIR	0,00121	0	0

Tableau 4-21 : Erreur sur la diffusion Rayleigh, le 19/06/99 pour SPOT2

	τ_R	$\Delta\tau_R$	$\Delta T_R/T_R$
B1	0,1113	0,0011	0,0012
B2	0,0534	0,0005	0,0006
B3	0,0200	0,0002	0,0002
pan	0,0715	0,0007	0,0007

L'erreur commise en cas de mauvaise estimation de la diffusion Rayleigh est donnée dans le tableau suivant :

Tableau 4-22 : Incertitude partielle $\Delta L/L$ sur la luminance TOA due à l'incertitude sur l'épaisseur optique Rayleigh

	$\Delta L/L(B1)$	$\Delta L/L(B2)$	$\Delta L/L(B3)$	$\Delta L/L(\text{pan})$
12/06/99 SPOT4	0,0016	0,0006	0,0001	—
19/06/99 SPOT4	0,0020	0,0007	0,0002	—
19/06/99 SPOT2	0,0015	0,0007	0,0001	0,0009

3-2-3 Incertitude sur les aérosols

Nous nous intéressons d'abord à l'incertitude sur l'épaisseur optique aérosol.

Tableau 4-23 : Erreur sur l'épaisseur optique aérosol

canal	550	670	870
$\Delta CN_0/CN_0$	0,010	0,007	0,005
$\Delta\tau_R$	0,0097	0,0004	0,0002
$\Delta\tau_a$ 12/06/99 SPOT4	0,0189	0,0069	0,0048
$\Delta\tau_a$ 19/06/99 SPOT4	0,0187	0,0067	0,0047
$\Delta\tau_a$ 19/06/99 SPOT2	0,0189	0,0069	0,0048

Comme pour la réflectance et la diffusion Rayleigh, l'erreur commise sur la luminance TOA est estimée par des simulations.

Tableau 4-24 : Erreur partielle $\Delta L/L$ sur la luminance TOA due à l'erreur sur l'épaisseur optique aérosol

	$\Delta L/L(B1)$	$\Delta L/L(B2)$	$\Delta L/L(B3)$	$\Delta L/L(\text{pan})$
12/06/99 SPOT4	0,0023	0,0003	0,0002	–
19/06/99 SPOT4	0,0027	0,0008	0,0001	–
19/06/99 SPOT2	0,0014	0,0002	0,0002	0,0006

L'erreur sur le coefficient d'Angström est donnée dans le tableau suivant, elle correspond au double de l'écart-type sur le coefficient de la régression linéaire :

Tableau 4-25 : Erreurs sur le coefficient d'Angström

Date	α	$\Delta\alpha$
12/06/99 SPOT4	-2,00	0,0068
19/06/99 SPOT4	-1,98	0,0050
19/06/99 SPOT2	-1,99	0,0058

L'incertitude sur le signal TOA engendrée par l'erreur sur le coefficient d'Angström est négligeable : elle est inférieure à 0,006 %

Pour évaluer l'incertitude due à une mauvaise restitution de l'indice de réfraction, nous avons effectué les simulations de la luminance TOA pour un indice réel de 1,50, alors que l'indice effectivement utilisé est 1,33.

Tableau 4-26 : Incertitude partielle $\Delta L/L$ due à une mauvaise restitution de l'indice

	$\Delta L/L(B1)$	$\Delta L/L(B2)$	$\Delta L/L(B3)$	$\Delta L/L(\text{pan})$
12/06/99 SPOT4	0,0079	0,0040	0,0022	–
19/06/99 SPOT4	0,0140	0,0078	0,0040	–
19/06/99 SPOT2	0,0109	0,0056	0,0033	0,0086

3-2-4 Incertitude sur la transmission gazeuse

L'incertitude sur la quantité de vapeur d'eau et d'ozone est estimée à 20 %. Nous avons donc effectué le calcul de la transmission gazeuse pour des quantité de vapeur d'eau de 1,76 g.cm⁻² le 12 juin et de 2,016 g.cm⁻² le 19 juin et pour une quantité d'ozone de 0,396 cm.atm.

Tableau 4-27 : Incertitude partielle $\Delta L/L$ due à l'incertitude sur le contenu en gaz

	$\Delta L/L(B1)$	$\Delta L/L(B2)$	$\Delta L/L(B3)$	$\Delta L/L(\text{pan})$
12/06/99 SPOT4	0,0128	0,0109	0,0072	–
19/06/99 SPOT4	0,0135	0,0117	0,0078	–
19/06/99 SPOT2	0,0094	0,0126	0,0069	0,0123

3-2-5 Synthèse des résultats

Après avoir estimé l'erreur des différents postes, nous calculons l'erreur totale en faisant la somme quadratique des erreurs partielles. L'erreur sur le coefficient d'étalonnage

$\Delta A/A$ est égale à l'erreur sur la luminance TOA. Les résultats sont rassemblés dans le Tableau 4-28. Les coefficients rapportés sont ceux calculés sans correction de la réflectance de surface.

Tableau 4-28 : Coefficients d'étalonnage pour SPOT4 et SPOT2 et incertitudes

	B1		B2		B3		pan	
	A	$\Delta A/A$						
12/06/99 SPOT4	0,6319	0,0260	0,7229	0,0242	0,8054	0,0345		–
19/06/99 SPOT4	0,7267	0,0293	0,8370	0,0252	0,9567	0,0376		–
19/06/99 SPOT2	0,3791	0,0270	0,2767	0,0256	0,6405	0,0378	0,3562	0,0180

La précision estimée pour la prédiction du signal hors atmosphère et donc pour l'étalonnage des capteurs SPOT est acceptable (Slater *et al.*, 1996, Santer *et al.*, soumis). L'incertitude plus grande dans le canal B3 est directement attribuable à l'erreur due à la variation du flux diffus.

4 COMPARAISON AVEC LES AUTRES MÉTHODES

4-1 Comparaison avec les coefficients estimés par le CNES

Nous avons calculé des coefficients d'étalonnage et estimé leur incertitude. Afin de valider nos résultats, nous pouvons les comparer aux coefficients retenus par le CNES. Ceux-ci sont évalués à partir des coefficients issus des différentes méthodes d'étalonnage (Henry *et al.*, 2000). Dans les Tableau 4-29 et Tableau 4-30, les coefficients A_k sont ceux estimés par le CNES. Nos coefficients (« A_k La Crau ») du 6 et du 7 novembre 1998 sont comparés aux coefficients A_k du 3 novembre 1998, contrairement aux coefficients du 12 et du 19 juin, qui sont comparés à date identique.

Tableau 4-29 : Coefficients utilisés par le CNES pour l'étalonnage de SPOT4, coefficients estimés sur le site de La Crau et écart (%) entre les coefficients

	B1				B2				B3			
	A_k	A_k La Crau	écart		A_k	A_k La Crau	écart		A_k	A_k La Crau	écart	
06/11/98	0,7466	0,7487	0,3		0,8870	0,9604	8,3		0,8812	0,8890	0,9	
07/11/98	0,7466	0,6997	-6,3		0,8870	0,8762	-1,2		0,8812	0,8171	-7,3	
12/06/99	0,7186	0,6319	-12,1		0,8631	0,7229	-16,2		0,8632	0,8054	-6,7	
19/06/99	0,7177	0,7267	1,3		0,8624	0,8370	-2,9		0,8626	0,9567	10,9	

Tableau 4-30 : Coefficients utilisés par le CNES pour l'étalonnage de SPOT4, coefficients estimés sur le site de La Crau avec les réflectances corrigées des effets de sites et des effets spectraux, écart (%) entre les coefficients

	B1				B2				B3			
	A_k	A_k La Crau	écart		A_k	A_k La Crau	écart		A_k	A_k La Crau	écart	
06/11/98	0,7466	0,7550	1,1		0,8870	0,9844	11,0		0,8812	0,9549	8,4	
07/11/98	0,7466	0,7059	-5,5		0,8870	0,8992	1,4		0,8812	0,8781	-0,4	
12/06/99	0,7186	0,6393	-11,0		0,8631	0,7456	-13,6		0,8632	0,8660	0,3	
19/06/99	0,7177	0,7348	2,4		0,8624	0,8625	0,01		0,8626	1,0280	19,2	

L'accord des coefficients de SPOT4 estimés à partir des mesures de la station de La Crau et des coefficients estimés par le CNES à partir de l'ensemble des méthodes d'étalonnage n'est pas très bon, en particulier dans le canal B3 (Figure 4-20 à Figure 4-22).

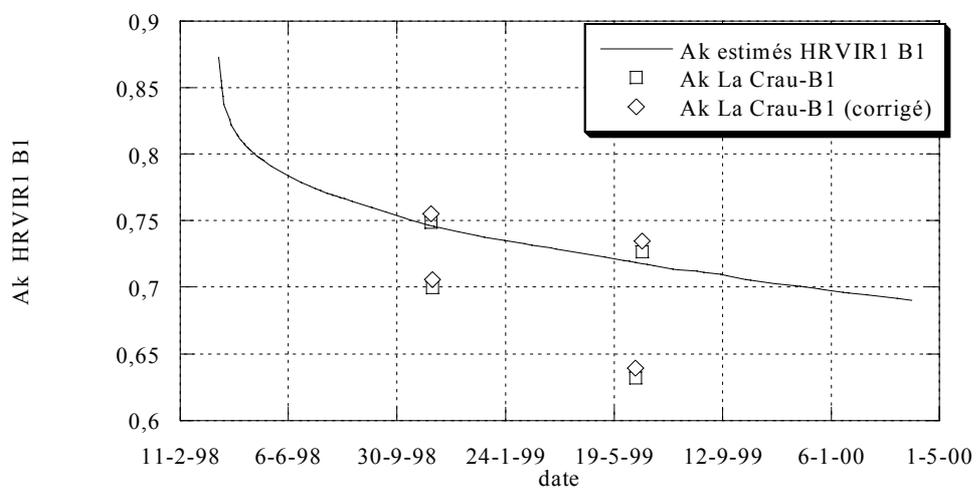


Figure 4-20 : Comparaison des coefficients obtenus à La Crau et des coefficients du CNES dans le canal B1

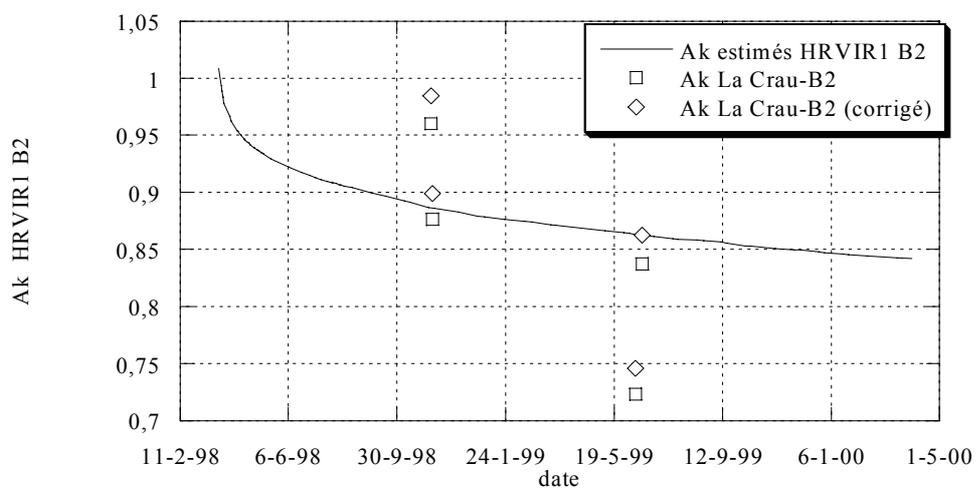


Figure 4-21 : Comparaison des coefficients obtenus à La Crau et des coefficients du CNES dans le canal B2

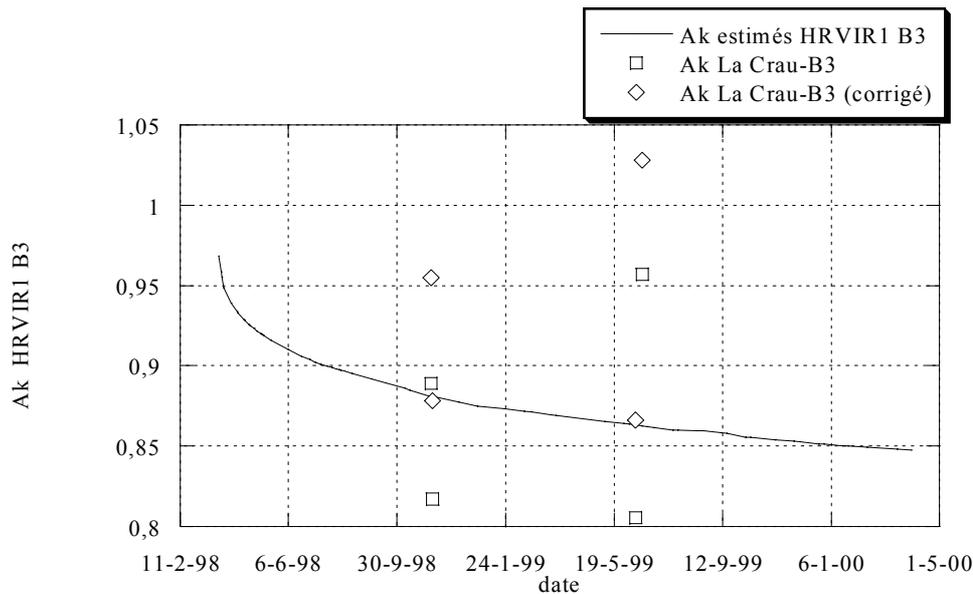


Figure 4-22 : Comparaison des coefficients obtenus à La Crau et des coefficients du CNES dans le canal B3

La correction de la réflectance de surface ne semble pas améliorer la précision de façon sensible. Il conviendrait mieux, cependant, de comparer nos résultats aux résultats obtenus lors des campagnes de mesures faites à La Crau, qui utilisaient notamment des mesures de réflectances du grand site.

4-2 Comparaison avec les coefficients de La Crau

Nous pouvons également comparer les coefficients obtenus à partir des seules mesures de la station avec les coefficients obtenus lors des campagnes d'étalonnage menées à La Crau (Devaux *et al.*, 1998-b, Six *et al.*, 1999).

Tableau 4-31 : Coefficients de SPOT4 précédemment estimés sur le site de La Crau (*), coefficients estimés avec les mesures de la station.

Date	B1	B2	B3	MIR
29/06/98 (*)	0,768	0,997	0,909	5,477
12/06/99 (*)	0,699	0,851	0,887	5,501
12/06/99 sans correction	0,6319	0,7229	0,8054	–
12/06/99 avec correction	0,6393	0,7456	0,8660	–
19/06/99 (*)	0,735	0,905	0,914	6,453
19/06/99 sans correction	0,7267	0,8370	0,9567	–
19/06/99 avec correction	0,7348	0,8625	1,0280	–
24/06/99 (*)	0,755	0,955	0,943	6,290

Les coefficients de SPOT4 ont été évalués lors de campagnes d'étalonnage menées par le laboratoire avec divers instruments ; les mesures de réflectances ont été faites avec le réflectancemètre MIR du LOA en 1998 et avec un spectromètre de terrain en 1999. Les mesures

atmosphériques proviennent de la station Cimel en 1999 et d'autres photomètres en 1998. Les codes utilisés pour la prédiction de la luminance hors atmosphère sont 6S et le code des Ordres Successifs. Les Figure 4-23 à Figure 4-25 rassemblent ces différents résultats pour les canaux B1, B2 et B3. Les campagnes précédentes avaient permis de calculer des coefficients d'étalonnage pour le canal MIR.

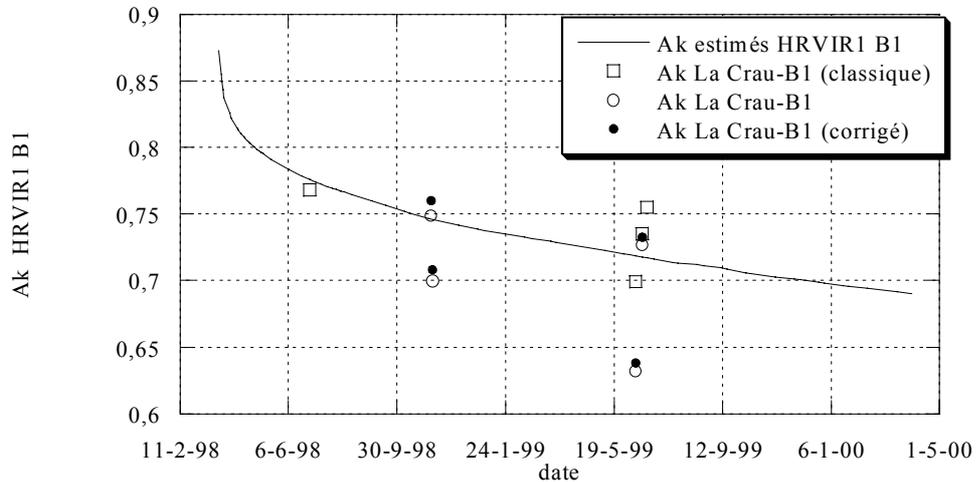


Figure 4-23 : Comparaison des coefficients de SPOT4 obtenus à La Crau par la station avec les coefficients obtenus lors de campagnes d'étalonnage classiques et les coefficients estimés par le CNES, canal B1

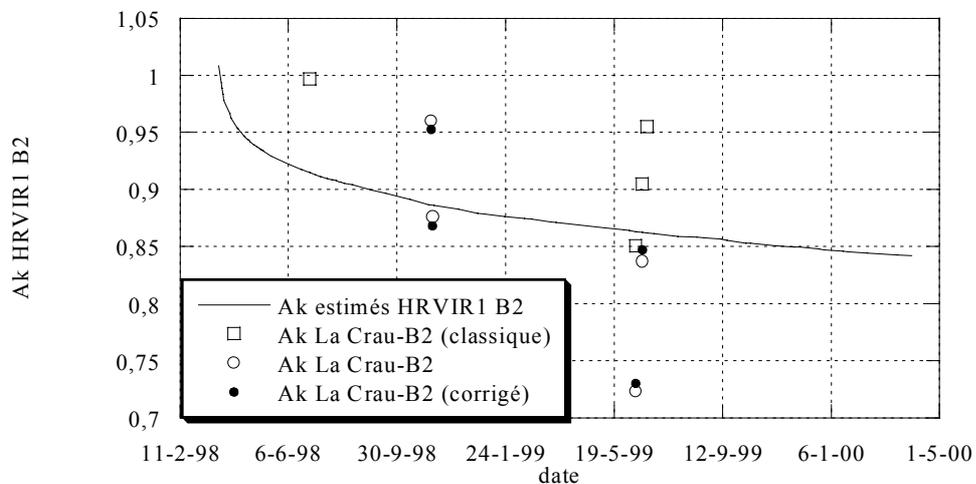


Figure 4-24 : Comparaison des coefficients de SPOT4 obtenus à La Crau par la station avec les coefficients obtenus lors de campagnes d'étalonnage classiques et les coefficients estimés par le CNES, canal B2

CONCLUSION

Ce mémoire a été motivé par la nécessité d'effectuer l'étalonnage en vol des capteurs embarqués à bord de SPOT4.

Nous avons tout d'abord rappelé les bases de la théorie du transfert radiatif. Nous avons ensuite décrit les capteurs SPOT et les méthodes d'étalonnage disponibles. Ces méthodes, pour la plupart, font appel à la théorie du transfert radiatif. Nous avons présenté plus précisément l'étalonnage sur le site test de La Crau : faisant appel à des moyens instrumentaux et humains importants, cette méthode permet de prédire la luminance TOA grâce à la caractérisation de la surface et de l'atmosphère. Afin d'accroître les possibilités d'étalonnage, le laboratoire a proposé en 1996 la réalisation, en collaboration avec la société Cimel, d'une station automatique pour la caractérisation de la surface et de l'atmosphère. Cette station, installée en permanence sur le site de La Crau, doit permettre de profiter de créneaux libres dans la programmation des prises de vue de SPOT pour effectuer un étalonnage.

Dans le deuxième chapitre, nous avons décrit le prototype de station automatique pour l'étalonnage en vol de SPOT. Nous nous sommes attachés en particulier à décrire les méthodes d'étalonnage de la station et la précision espérée sur ses mesures. Nous avons également fait un bref historique de l'installation de la station sur le site de La Crau.

Nous avons dans le troisième chapitre décrit les méthodes de restitution des paramètres physiques indispensables à l'étalonnage sur site test. Nous avons en particulier cherché à modéliser la réflectance bidirectionnelle du site de manière à exploiter au mieux le grand nombre de mesures de la station. Les résultats que nous avons obtenus nous incitent à penser qu'une telle modélisation, essentielle, est possible et permettra d'améliorer les estimations de la réflectance de surface dans la géométrie de visée du satellite. L'atmosphère est caractérisée, au niveau de l'absorption, par son contenu en vapeur d'eau, estimé avec les mesures d'extinction sur le site, et par son contenu en ozone, déduit de données météorologiques. La diffusion Rayleigh est connue lorsqu'on connaît la pression de surface. Pour la granulométrie des aérosols, nous avons choisi une modélisation simple et bien connue, la loi de Junge. Enfin, les indices de réfraction des aérosols sont déterminés à partir d'un ensemble de valeurs climatologiques.

Dans le quatrième chapitre, nous avons abordé l'étalonnage en vol des capteurs SPOT sur le site de La Crau. Nous avons rappelé la configuration des deux sites, le « grand site » utilisé pour les campagnes d'étalonnage et le « petit site » caractérisé par la station automatique d'étalonnage. La représentativité du petit site par rapport au grand site a été étudiée à travers les comptes numériques des images SPOT et les mesures de réflectances au sol. La différence des deux sites est exprimée par le rapport de leurs réflectances moyennes. Ce rapport permet d'évaluer la réflectance du grand site à partir de celle mesurée sur le petit site. Une correction est également appliquée pour prendre en compte les transmissions de SPOT et de la station. Enfin, utilisant les résultats obtenus au troisième chapitre, nous avons calculé des coefficients d'étalonnage pour SPOT2 et SPOT4. Il ne nous a pas été possible de calculer de coefficients dans la bande MIR de SPOT4, le détecteur infrarouge de l'appareil n'étant pas adapté. Nous avons mené un bilan d'erreur sur la méthode d'étalonnage, aboutissant à une incertitude inférieure à trois pour-cent dans les bandes B1 et B2 et inférieure à quatre pour-cent dans la bande B3. Puis nous avons comparé ces coefficients aux coefficients « officiels » estimés par le

CNES. À l'instar des coefficients obtenus lors de campagnes d'étalonnage à La Crau, l'écart est sensible. De même, la dispersion des coefficients SPOT4 est importante. Toutefois, ceux-ci sont peu nombreux et l'objectif de la station d'étalonnage est de permettre un étalonnage plus fréquent, lorsqu'une programmation d'une visée sur La Crau est possible.

À l'avenir, il sera ainsi possible, en accumulant les coefficients, d'améliorer nos résultats. De plus, il est reconnu que le site de La Crau, bien que facile d'accès, n'est pas idéal pour l'étalonnage. D'autres sites, tels que White Sands ou le Sahara, équipés de stations d'étalonnage, devraient donner de meilleurs résultats. Le lancement récent de SPOT5 accroît l'intérêt porté à l'étalonnage sur site test, l'un des seuls moyens d'obtenir des coefficients d'étalonnage absolu.

Actuellement, un nouveau prototype de cette station fonctionne sur le site depuis plusieurs mois. Doté d'un détecteur mieux adapté, il permettra de caractériser le site dans l'infrarouge moyen. Nous envisageons des modifications mineures du protocole de mesures telles que l'ajout d'almucantar et de plans principaux pour le calcul du flux diffus, ainsi qu'un allègement des mesures de réflectances (élimination des mesures pour les hauteurs de 5 et 10° et réduction du nombre de mesures en azimut). Ce dernier point, en réduisant la durée des mesures de réflectances, nous donnera plus d'évaluations de la réflectance de surface et augmentera les possibilités de coïncidence avec les prises de vue de SPOT.

Enfin, les possibilités de cet instrument ne se réduisent pas à l'étalonnage radiométrique. Il permet de caractériser les propriétés directionnelles des réflectances de cibles pour peu qu'elles soient homogènes. L'étalonnage radiométrique est un calcul direct du signal satellitaire à partir des données de la station Cimel. Mais bien sûr, cette station peut aussi servir à valider les niveaux 2 des capteurs satellitaires, en particulier la restitution des réflectances de surfaces.

BIBLIOGRAPHIE

- Baklouti K., Santer R., Roger J.C., 1996 ; Station automatique de caractérisation de l'atmosphère et des surfaces : étude de faisabilité. Rapport intermédiaire, contrat CNES.
- Begni G., Dinguirard M., Jackson R., Slater P., 1986 ; Absolute calibration of the SPOT-1 HRV cameras. *Proc. SPIE 660* :66-76
- Biggar S., Dinguirard M., Gellman D., Henry P., Jackson R., Moran M., Slater P., 1991; Radiometric calibration of SPOT 2 HRV - A comparison of three methods. *SPIE Proceedings 1493(17)*
- Bréon F.M., 1998 , Comment on Rayleigh-scattering calculations for the terrestrial atmosphere. *Applied Optics 37(3)* :428-429
- Briottet X., Dilligeard E., Santer R., Deuzé J.L., 1997 ; VEGETATION calibration of the blue and red channels using Rayleigh scattering over open oceans. *EUROPTO, European Symposium on Aerospace Remote Sensing, London.*
- Bruegge C.J, Conel J.E., Green R.O., Margolos J.S., Holm R.G., Toon G., 1992 ; Water vapor column abundance retrievals during FIFE. *Journal of Geophysical Research 97(D17)* 18759-18768
- Bucholtz A., 1995 ; Rayleigh-scattering calculations for the terrestrial atmosphere. *Applied Optics, 34(15)* : 2765-2773
- Bucholtz A., 1998 : Response to comment on Rayleigh-scattering calculations for the terrestrial atmosphere. *37(3)* :430
- Cariou N., 1998 ; L'utilisation des sphères intégrantes en photométrie / radiométrie. *Optique et photonique, 3*:26-28
- Cosnefroy H., 1994, Rapport sur l'étalonnage des radiomètres.
- Cosnefroy H., Leroy M., Briottet X., 1996 ; Selection and characterization of Saharan and Arabian desert sites for the calibration of optical sensors. *Remote Sensing of Environment, 58* :101-114
- D'Almeida G.A., Koepke P., Shettle E.P., 1991 ; Atmospheric aerosols global climatology and radiative characteristics. *Deepak Publishing, Hampton Virginia USA 561 pp*
- Deschamps P.Y., Herman M., Tanré D., 1983 ; Modélisation du rayonnement solaire réfléchi par l'atmosphère et la terre, entre 0,35 et 4 μm . *Rapport du contrat ESA 4393/80/F/DD(SC), 188 pp.*
- Deuzé J.L., Herman M., Santer R., 1989 ; Fourier series expansion of the transfer equation in the atmosphere-ocean system. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 41(6)* :483-494

- Devaux C., Deuzé J.L., Santer R., Schmechtig C., Dessailly D., Verbrugge M., 1997 ; Campagne d'étalonnage SPOT Juillet 1997. *Rapport de campagne*
- Devaux C., Vermeulen A., Deuzé J.L., Dubuisson P., Herman M., Santer R., Verbrugge M., 1998 ; Retrieval of aerosol single-scattering albedo from ground-based measurements : Application to observational data. *Journal of Geophysical Research* **103(D8)** : 8753-8761
- Devaux C., Six C., Schmechtig C., Brutier L., Santer R., 1998-b : Campagne d'étalonnage SPOT 1998. *Rapport de campagne*
- Dilligeard E., Briottet X., Deuzé J.L., Santer R., 1996 ; SPOT calibration of XS1, XS2 channels using Rayleigh scattering over clear oceans. *Proc. SPIE* **2957** :373-379
- Dinguirard M., Maisonneuve J.M., 1980 ; Dispositif d'étalonnage sur le soleil de la camera HRV du projet SPOT. *XXth International Scientific Meeting on Space, Rome*.
- Dinguirard M., Briottet X., Cerbelaud H., Léger D., Robinet F., Maisonneuve J.M., 1996-a ; Instruments spatiaux optiques d'observation de la Terre : la démarche qualité image. *La Recherche Aérospatiale* **3** : 207-216
- Dinguirard M., 1996-b ; Étalonnage absolu SPOT2 et SPOT3 - Comparaison des différentes méthodes. *Rapport interne CNES CT/SH/QTIS/PO n° 134*.
- Dinguirard M., Briottet X., Henry P., Meygret A., Slater P.N., Santer R. and Deuzé J.C., 1998 ; Calibration of the SPOT HRV cameras. *Remote Sensing of Environment*
- Dinguirard M., Slater P.N., 1999 ; Calibration of space-multispectral imaging Sensors : a review. *Remote Sensing of Environment* **68** : 194-205
- Dinguirard M., 1999 ; Étalonnage radiométriques des senseurs optiques d'observation de la Terre, HDR.
- Dubuisson P., Buriez J.C., Fouquart Y., 1996; High spectral resolution solar radiative transfer in absorbing and scattering media : application to the satellite simulation. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer* **55(1)** : 103-126
- *Eck T.F. Holben B.N., Slutsker I., Setzer A., 1998, Measurements of irradiance attenuation and estimation of aerosol single scattering albedo for biomass burning aerosols in Amazonia. *Journal of Geophysical Research* **103(D24)** :31865-31878
- Goody R.M., 1964 ; Atmospheric Radiation 1, Theoretical Basis. *Oxford University Press*, 436 pp.
- Gu X.F. Étalonnage et intercomparaison des données satellitaires en utilisant le site test de La Crau. *Thèse de doctorat de l'université Paris VII*.
- Gu X.F., Guyot G., Verbrugge M., 1992 ; Evaluation of measurements errors in ground surface for satellite calibration. *International Journal of Remote Sensing*, **13(14)**:2531-2546
- Haltore R.N., Eck T.F., Holben B.N., Markham B.L., 1997 ; Sun photometric measurements of atmospheric water vapor column abundance in the 940-nm band. *Journal of Geophysical Research*, **102(D4)** :4343-4352

- Henry P., Meygret A., 1991, Document de synthèse sur l'étalonnage absolu des données SPOT. *Rapport interne CNES AP/PO/QTIS/PS n° 134*
- Henry P., Dinguirard M., 1993, Étalonnage absolu SPOT : nouvelles méthodes de détermination des coefficients - Application à SPOT1 et SPOT2. *Rapport interne CNES AP/OR/QTIS/PO n° 084*
- Henry P., Dinguirard M., Meygret A., 1995 ; Synthèse sur l'étalonnage absolu des données SPOT. *Note CNES S-NT-OBI-580-CN*
- Henry P., Meygret A., 2000; Calibration of HRVIR and VEGETATION cameras on SPOT4. *Advances in Space Research*, **28**(1) :49-58
- Holben B.N., Kaufman Y.J. Kendall J.D., 1990 ; NOAA-11 AVHRR visible and near-IR in-flight calibration, *International Journal of Remote Sensing* **11** :1511-1519
- Holben B.N. et al. 1998 ; AERONET-A federated instrument network and data archive for aerosol characterization. *Remote Sensing of Environment* **66**:1-16
- IAPWS (International Association for the Properties of Water and Steam), 1997 ; Release on the IAPWS Industrial Formulation 1997 for the Thermodynamic Properties of Water and Steam, Erlangen, Germany, 48 pp.
- Kaufman Y.J., Holben B.N., 1993 ; Calibration of the AVHRR visible and near-IR bands by atmospheric scattering, ocean glint and desert reflection. *International Journal of Remote Sensing* **14** :21-52
- Kurucz, R.L., 1995, The Solar Irradiance by Computation, *Proceedings of the 17th Annual Review Conference on Atmospheric Transmission Models*, **274**(332)
- Lenoble J., 1993 ; Atmospheric radiative Transfer. *A. Deepak Publishing, Hampton Virginia USA*, 532 pp.
- Maisonneuve J.M., Dinguirard M., 1980. Problèmes et dispositifs d'étalonnage en vol de la caméra HRV du projet de satellite SPOT. *XXth International Scientific Meeting on Space, Rome*.
- Malkmus W., 1967, Random Lorentz band model with exponential tailed S-1 line-intensity distribution function, *J. Opt. Soc. Am.* **57**(3):323-329
- Meygret A., Henry P., Dinguirard M., Soule P., Cabrières B., Kubik P., Hazane P., Briottet X., Laubies M.C., 1998 ; SPOT4 : First in flight absolute calibration results. *European Symposium on Remote Sensing, Barcelona*.
- Meygret A., Soule P., Dinguirard M., Briottet X., Laubies M.C., 1999 ; Bilan de recettes en vol, qualité des images de SPOT4, étalonnage absolu. *Rapport DSO/OT/QTIS/GC n° 99/3202*.
- Nieke J., Pflug B., Zimmermann G., 1999 ; An aureole-corrected Langley-plot method developed for the calibration of HiRES grating spectrometer. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* **61** 739-744.

- Parada R.J. Jr., 1997 ; In-flight absolute calibration of radiometric sensors over dark targets using vicarious methods. *Thesis, University of Arizona.*
- Roger J.C., Six C., Santer R., Brutier L., Ground-based measurements during the COLORS experiment, *Rapport préliminaire dans le cadre du projet COLORS.*
- Santer R., Gu X.F., Guyot G., Deuzé J.L., Devaux C., Vermote E., Verbrugghe M., 1992. ; SPOT Calibration at the La Crau Test Site (France). *Remote Sensing of Environment*, **41** (2-3) : 227-237
- Santer R., Schmechtig C., Brutier L. Michaux F., 1997 ; Mise en place de la station sol sur le site de La Crau et premiers résultats, Campagne Juillet 1997. *Rapport de campagne.*
- Santer R., Schmechtig C., Thome K., 1997-b ; Uncertainties in the calibration of SPOT sensors with reference to test-sites White Sands and La Crau
- *Schmechtig C., 2000, Corrections atmosphériques au dessus des terres émergées. Applications au capteur ENVISAT/MERIS. *Thèse de doctorat de l'Université du Littoral-Côte d'Opale.*
- Schmechtig C., Santer R., Thome K., Chami M., (soumis à Remote Sening of Environment), BRDF effects for vicarious calibration sites.
- Schroeder M., Poutier L., Müller R., Dinguirard M., Renartz P., Briottet X., 2001 ; Intercalibration of optical satellites - a case study with MOMS and SPOT. *Aerospace Science and Technology*, **5** :305-315
- Shaw G.E., 1976 ;Error analysis of multi-wavelength sun photometry. *Pure and Applied Geophysics*, **114** :1-14
- Shettle E.P., Fenn R.W., 1979, Models of atmospheric aerosols and their optical properties. *AGARD Conference Proceedings No 183, Optical properties in the atmosphere, AGARD-CP--183, NTIS, ADA 028615*
- Six C., Lemire F., Brutier L., Santer R., 1999 ; Station CIMEL pour l'étalonnage en vol des Satellites. *Rapport d'Activités 1998.*
- Six C., Mériaux X., Brutier L., Santer R., 1999; Campagne d'étalonnage SPOT, juin 1999. *Rapport de campagne*
- Six C., Santer R., Schmechtig C., Roger J.C., 2001 ; Vicarious calibration using an automatic ground-based station. *IRS 2000 : Current Problems in Atmospheric Radiation, W.L. Smith and Yu. M. Timofeyev (Eds). A. Deepak Publishing, Hampton, Virginia. pp 1085-1088*
- Slater P.N., Biggar S.F., Holm R.G., Jackson R.D., Mao Y., Moran M.S., Palmer J.M. Yuan B., 1987 ;Reflectance and Radiance based methods for the in-flight absolute calibration of multispectral sensors. *Remote Sensing of Environment* **22** :11-37
- Slater P.N., Biggar S.F., Thome K.J., Gellman D.I., Spyak P.R., 1996 ; Vicarious radiometric calibration of EOS sensors. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, **13**(2) :349-359

Vermote E., Santer R., Deschamps P.Y., Herman M., 1992 ; In-flight calibration of large field of view sensors at short wavelengths using Rayleigh scattering. *International Journal of Remote Sensing*, **13** : 3409-3429

Vermote E., 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*

ANNEXE 1 : ÉPAISSEURS OPTIQUES MESURÉES LORS DES CAMPAGNES DE 1999 ET DU PIC DU MIDI

CAMPAGNE DE JUIN-JUILLET 1999 À LA CRAU

Les tableaux suivants donnent l'épaisseur optique mesurée lors de la campagne d'étalonnage de 1999 par trois radiomètres. Ils sont désignés par « station » pour la station d'étalonnage, « portable » pour le radiomètre portable et « automatique » pour le radiomètre automatique.

Épaisseur optique totale moyenne le 12/06/99

Canal	1020	870	670	440
Station	0,0720	0,0750	0,1459	0,4084
Portable	0,0746	0,0881	0,1658	0,4616
Écart (%)	3,5	14,9	12,0	11,5

Tableau 4-32 : Épaisseur optique totale moyenne le 18/06/99

Canal	1020	870	670	440
Station (S)	0,0805	0,0969	0,1883	0,5032
Portable (P)	0,0955	0,1176	0,2209	0,5796
Automatique (A)	0,0888	0,1111	0,2084	0,5115
Écart P/A (%)	7,1	5,5	5,7	11,7
Écart P/S (%)	15,7	17,6	14,7	13,2
Écart A/S (%)	9,3	12,8	9,6	1,6

Tableau 4-33 : Épaisseur optique totale moyenne le 19/06/99

Canal	1020	870	670	440
Portable	0,087	0,095	0,174	0,470
Automatique	0,089	0,116	0,196	0,434
Station	0,080	0,085	0,156	0,421
Écart P/A (%)	2,2	22,0	12,7	7,6
Écart P/S (%)	7,4	10,1	10,1	10,5
Écart A/S (%)	9,4	26,3	20,3	3,1

CAMPAGNE DE JUIN 2000 AU PIC DU MIDI

Nous disposons pour quatre journées de l'épaisseur optique totale mesurée par les trois instruments. Nous pouvons comparer ces mesures en les moyennant sur de courtes périodes

allant de quinze minutes à une heure. Les tableaux suivants donnent l'épaisseur optique moyenne pour le station de La Crau (« Station »), les deux portables et l'écart entre les trois mesures (« S » pour Station, « P1 » pour Portable 1, « P2 » pour Portable 2).

Épaisseur optique à 440 nm mesurée avec la station « La Crau » et deux photomètres portables, écart entre les trois mesures (en %)

		Station	Portable 1	Portable 2	S/P1	S/P2	P1/P2
22/06/00	moyenne 1	0,194	0,201	0,200	3,20	2,83	0,38
	moyenne 2	0,219	0,232	0,226	5,37	3,21	2,28
	moyenne 3	0,228	0,232	0,233	1,70	2,00	0,31
23/06/00	moyenne 1	0,199	0,208	0,204	4,08	2,09	2,07
	moyenne 2	0,174	0,177	0,180	1,89	3,21	1,35
	moyenne 3	0,160	0,166	0,165	3,58	3,13	0,47
24/06/00	moyenne 1	0,168	0,172	0,173	2,52	2,73	0,21
	moyenne 2	0,167	0,173	0,174	3,41	4,14	0,76
	moyenne 3	0,163	0,171	0,173	4,49	5,54	1,09
	moyenne 4	0,159	0,166	0,168	4,69	5,70	1,07
25/06/00	moyenne 1	0,168	0,172	0,173	2,58	3,01	0,44

Épaisseur optique à 670 nm mesurée avec la station « La Crau » et deux photomètres portables, écart entre les trois mesures (en %)

		Station	Portable 1	Portable 2	S/P1	S/P2	P1/P2
22/06/00	moyenne 1	0,060	0,061	0,059	2,21	0,66	2,93
	moyenne 2	0,077	0,078	0,075	1,74	2,48	4,29
	moyenne 3	0,075	0,075	0,076	1,07	0,75	1,80
23/06/00	moyenne 1	0,068	0,065	0,063	5,76	9,18	3,23
	moyenne 2	0,049	0,047	0,048	3,69	1,30	2,31
	moyenne 3	0,043	0,044	0,044	2,44	3,50	1,09
24/06/00	moyenne 1	0,045	0,046	0,046	3,11	3,93	0,84
	moyenne 2	0,043	0,045	0,045	4,73	4,33	0,42
	moyenne 3	0,042	0,045	0,045	6,18	5,92	0,28
	moyenne 4	0,039	0,043	0,044	10,38	11,39	1,12
25/06/00	moyenne 1	0,045	0,046	0,047	2,75	4,60	1,89

Épaisseur optique à 870 nm mesurée avec la station « La Crau » et deux photomètres portables, écart entre les trois mesures (en %)

		Station	Portable 1	Portable 2	S/P1	S/P2	P1/P2
22/06/00	moyenne 1	0,024	0,024	0,022	1,42	10,00	8,46
	moyenne 2	0,036	0,034	0,034	5,53	5,99	0,44
	moyenne 3	0,034	0,031	0,033	9,99	4,44	5,04
23/06/00	moyenne 1	0,034	0,028	0,028	22,35	22,91	0,45
	moyenne 2	0,017	0,014	0,015	22,14	12,06	8,26
	moyenne 3	0,014	0,014	0,014	2,39	1,55	3,85
24/06/00	moyenne 1	0,014	0,014	0,014	3,05	3,09	0,03
	moyenne 2	0,012	0,014	0,013	15,07	13,31	2,08
	moyenne 3	0,011	0,014	0,013	25,02	20,82	5,60
	moyenne 4	0,009	0,014	0,013	30,46	26,98	5,01
25/06/00	moyenne 1	0,014	0,015	0,015	2,59	6,12	3,63

Épaisseur optique à 1020 nm mesurée avec la station « La Crau » et deux photomètres portables, écart entre les trois mesures (en %)

		Station	Portable 1	Portable 2	S/P1	S/P2	P1/P2
22/06/00	moyenne 1	0,022	0,025	0,021	11,96	6,00	20,39
	moyenne 2	0,036	0,032	0,026	12,50	36,96	21,74
	moyenne 3	0,024	0,023	0,022	5,37	6,51	1,09
23/06/00	moyenne 1	0,021	0,016	0,013	29,53	63,52	26,25
	moyenne 2	0,009	0,008	0,009	10,08	6,67	3,10
	moyenne 3	0,010	0,011	0,010	5,20	2,24	3,13
24/06/00	moyenne 1	0,010	0,012	0,011	15,63	9,89	6,80
	moyenne 2	0,013	0,015	0,013	13,56	3,92	20,23
	moyenne 3	0,013	0,016	0,012	14,26	7,32	25,18
	moyenne 4	0,013	0,018	0,016	25,63	16,39	12,42
25/06/00	moyenne 1	0,011	0,013	0,012	18,76	11,73	8,66

L'écart entre les trois jeux de mesures n'est pas négligeable ; si l'on examine plus particulièrement l'écart entre les mesures de la station La Crau et les mesures de chaque portable, on voit que :

- l'écart à 440 est compris entre 1,7 et 5,7 % (médiane à 3,4 %)
- l'écart à 670 est compris entre 0,7 et 11,4 % (médiane à 3,9 %)
- l'écart à 870 est compris entre 1,4 et 30,5 % (médiane à 10 %)
- l'écart à 1020 est compris entre 2,2 et 63,5 % (médiane à 13,5 %).

ANNEXE 2 : COEFFICIENTS EN ÉCLAIREMENT A_k

Les coefficients CN_{0k} obtenus par l'étalonnage de Bouguer (Tableau 2-1 à Tableau 2-3) permettent de déduire les coefficients en éclairage A_k grâce à l'équation 2-7 et à l'éclairage solaire hors atmosphère E_{sk} (Kurucz, 1995).

Valeurs de E_{sk} intégrées sur les transmissions de la station

Canal	E_{sk} ($W \cdot m^{-2} \cdot nm^{-1}$)
380	1,107
440	1,718
550	1,876
670	1,489
870	0,965
937	0,856
1020	0,710
1600	0,249

Coefficient A_k utilisés pour l'été 1999

Canal	380	440	550	670	870 Si	870 Ge	1020 Si	1020 Ge
A_k moyen	4016	10463	12977	18054	28700	6162	23779	10246
écart-type	273	670	554	577	653	122	552	179
nombre	9	12	18	21	21	19	19	19
$\Delta A_k/A_k$ (%)	2,3	1,8	1,0	0,7	0,5	0,5	0,5	0,4

Coefficient A_k utilisés pour l'hiver 1999-2000

Canal	380	440	550	670	870 Si	870 Ge	1020 Si	1020 Ge
A_k moyen	4062	10463	12930	18026	28617	6216	23502	10316
écart-type	182	670	464	536	704	142	623	187
nombre	22	12	18	21	21	19	19	19
$\Delta A_k/A_k$ (%)	1,0	1,8	0,8	0,6	0,5	0,5	0,6	0,4

Coefficient A_k utilisés pour le printemps 2000

Canal	380	440	550	670	870 Si	870 Ge	1020 Si	1020 Ge
A_k moyen	4041	10395	12852	17921	28531	6290	23184	10387
écart-type	172	304	264	416	761	163	513	169
nombre	10	10	11	16	20	20	20	19
$\Delta A_k/A_k$ (%)	1,3	0,9	0,6	0,6	0,6	0,6	0,5	0,4

ANNEXE 3 : RÉFLECTANCES DU SITE DE LA CRAU, 04/07/1999

Nous représentons ici la variation de la réflectance à 870 nm en fonction de l'azimut relatif le 4 juillet 1999, pour différentes hauteurs de visée h . Les figures suivantes permettent de visualiser l'influence des angles de visée sur la valeur de la réflectance. Nous avons choisi de représenter quatre « parapluies » (correspondant à $h=15^\circ$, $h=30^\circ$, $h=45^\circ$ et $h=60^\circ$) pour les protocoles 1, 3, 5 et 7. Nous donnons pour chaque figure la courbe de modélisation ainsi que les coefficients m_1 et m_2 de l'équation correspondante :

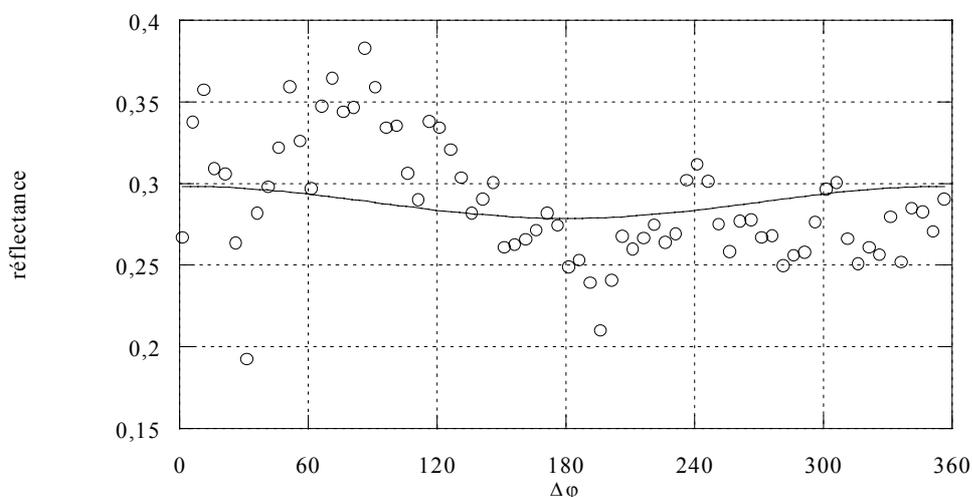
$$\rho = m_1 + m_2 \cdot \cos(\Delta\varphi)$$

PROTOCOLE 1

Hauteur $h=15^\circ$

Résultat de la régression de la réflectance en fonction du cosinus de l'azimut relatif

m_1	m_2	R^2
0,2885	0,0098344	0,035616

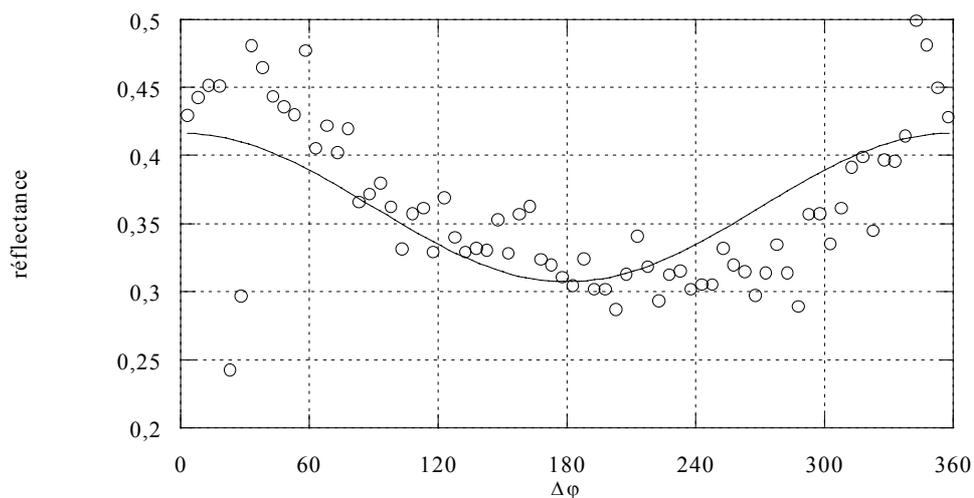


Réflectance en fonction de l'azimut relatif le 4 juillet 1999, protocole n° 1, $h=15^\circ$, $\theta_s=73,59^\circ$

Hauteur $h=30^\circ$

Résultat de la régression de la réflectance en fonction du cosinus de l'azimut relatif

m_1	m_2	R^2
0,36186	0,054564	0,44833

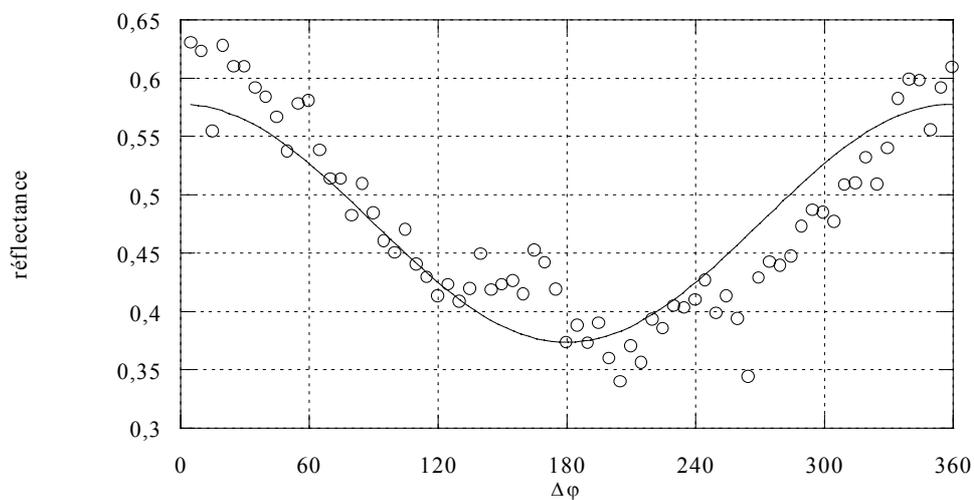


Réflectance en fonction de l'azimut relatif le 4 juillet 1999, protocole n° 1, $h=30^\circ$, $\theta_s=69,91^\circ$

Hauteur $h=45^\circ$

Résultat de la régression de la réflectance en fonction du cosinus de l'azimut relatif

m1	m2	R^2
0,47559	0,10204	0,80014

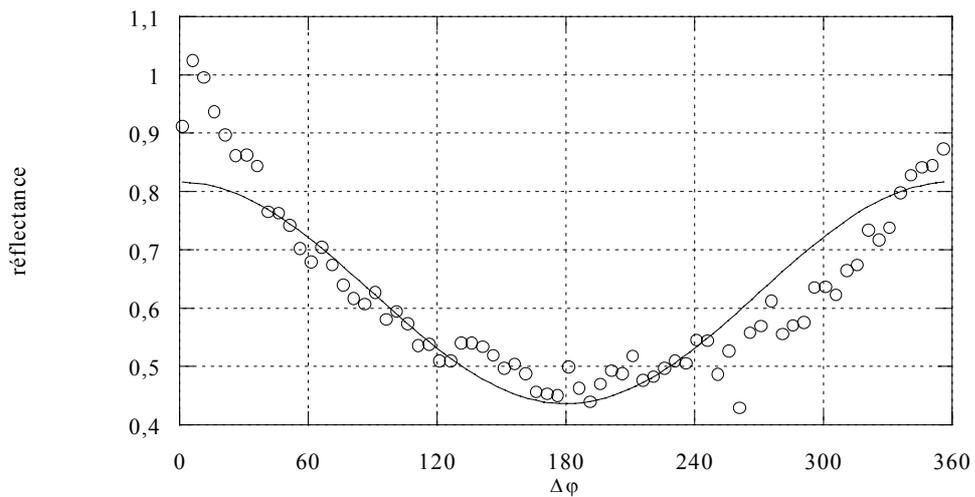


Réflectance en fonction de l'azimut relatif le 4 juillet 1999, protocole n° 1, $h=45^\circ$, $\theta_s=66,18^\circ$

Hauteur $h=60^\circ$

Résultat de la régression de la réflectance en fonction du cosinus de l'azimut relatif

m1	m2	R^2
0,626	0,18992	0,81176



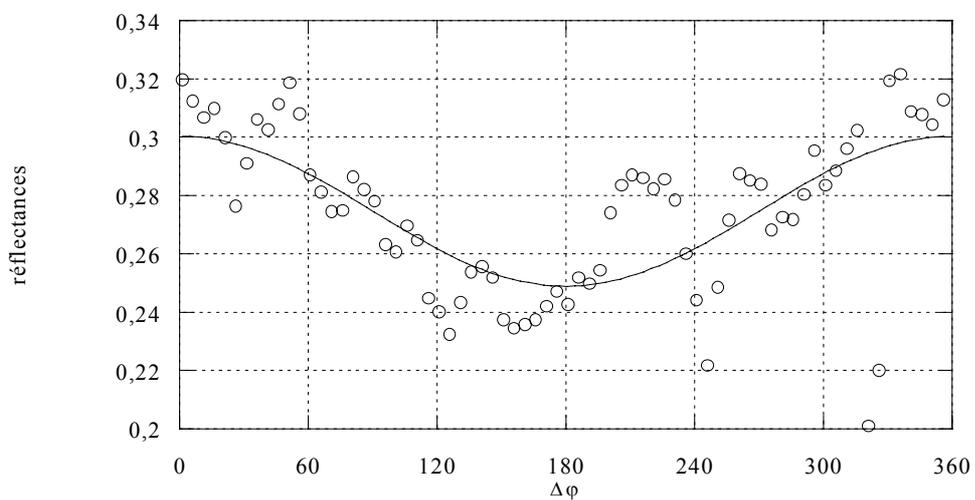
Réflectance en fonction de l'azimut relatif le 4 juillet 1999, protocole n° 1, $h=45^\circ$, $\theta_s=62,30^\circ$

PROTOCOLE 3

Hauteur $h=15^\circ$

Résultat de la régression de la réflectance en fonction du cosinus de l'azimut relatif

m1	m2	R ²
0,27458	0,025716	0,43398

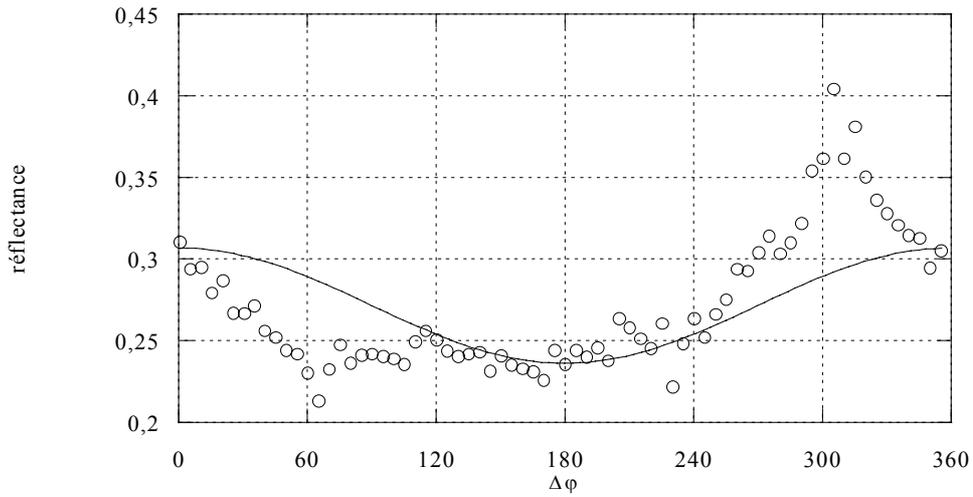


Réflectance en fonction de l'azimut relatif le 4 juillet 1999, protocole n° 3, $h=15^\circ$, $\theta_s=38,90^\circ$

Hauteur $h=30^\circ$

Résultat de la régression de la réflectance en fonction du cosinus de l'azimut relatif

m1	m2	R ²
0,27148	0,035321	0,35787

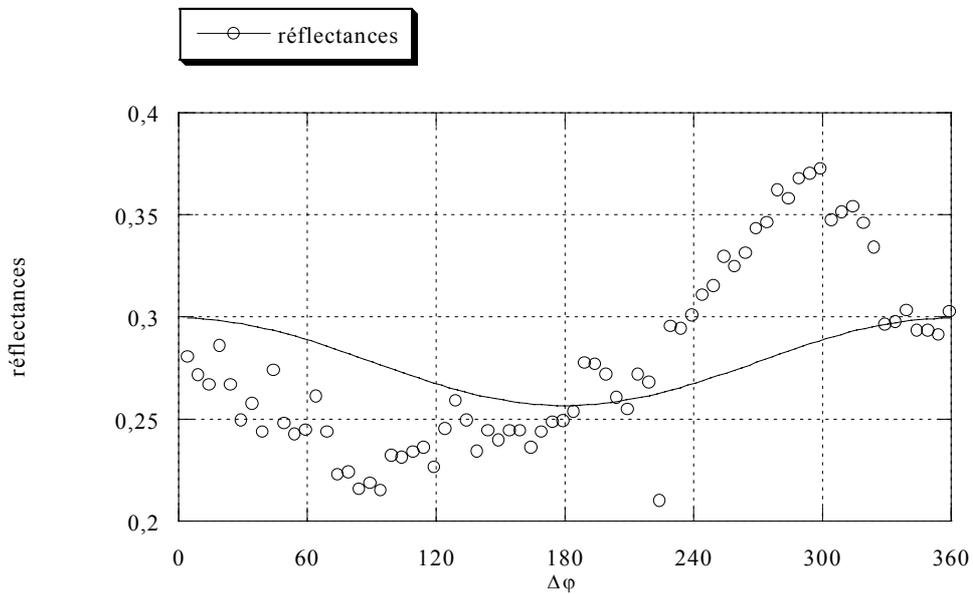


Réflectance en fonction de l'azimut relatif le 4 juillet 1999, protocole n° 3, $h=30^\circ$, $\theta_s=35,27^\circ$

Hauteur $h=45^\circ$

Résultat de la régression de la réflectance en fonction du cosinus de l'azimut relatif

m1	m2	R ²
0,27789	0,021419	0,11723

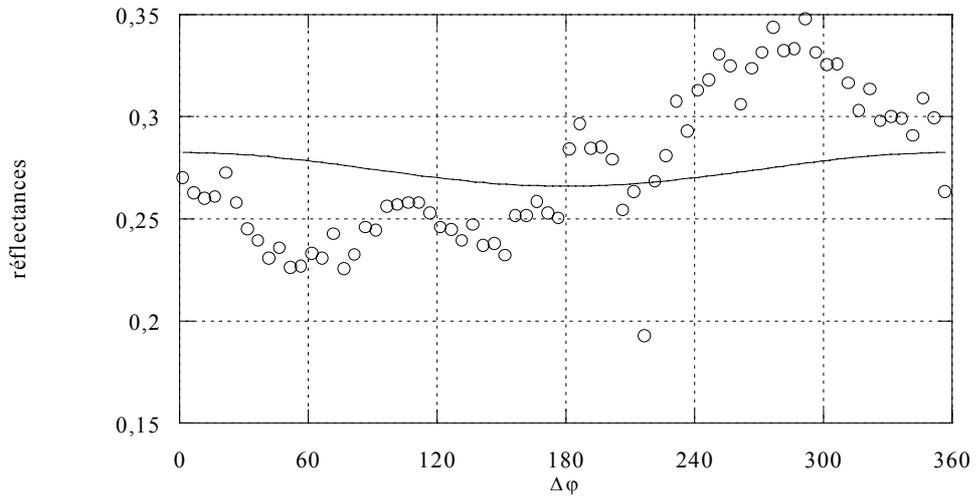


Réflectance en fonction de l'azimut relatif le 4 juillet 1999, protocole n° 3, $h=45^\circ$, $\theta_s=31,90^\circ$

Hauteur $h=60^\circ$

Résultat de la régression de la réflectance en fonction du cosinus de l'azimut relatif

m1	m2	R ²
0,27417	0,0082884	0,026715



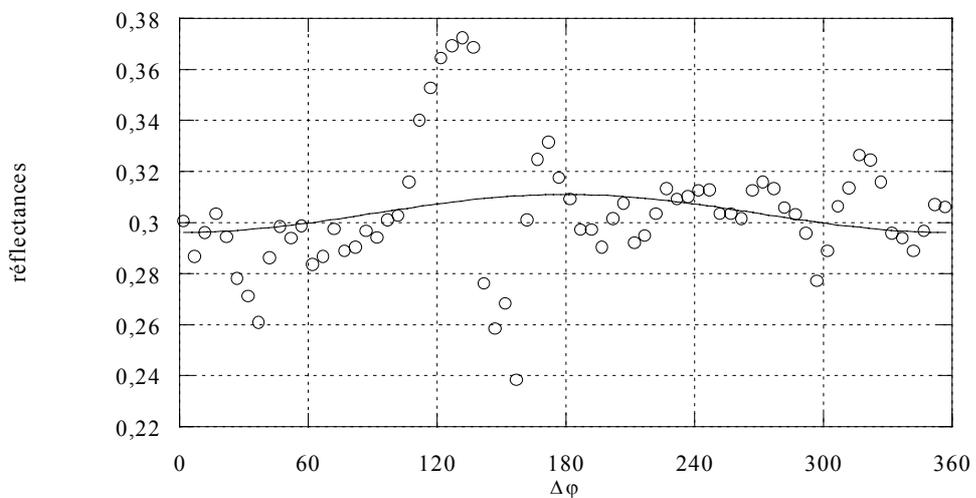
Réflectance en fonction de l'azimut relatif le 4 juillet 1999, protocole n° 3, $h=60^\circ$, $\theta_s=28,68^\circ$

PROTOCOLE 5

Hauteur $h=15^\circ$

Résultat de la régression de la réflectance en fonction du cosinus de l'azimut relatif

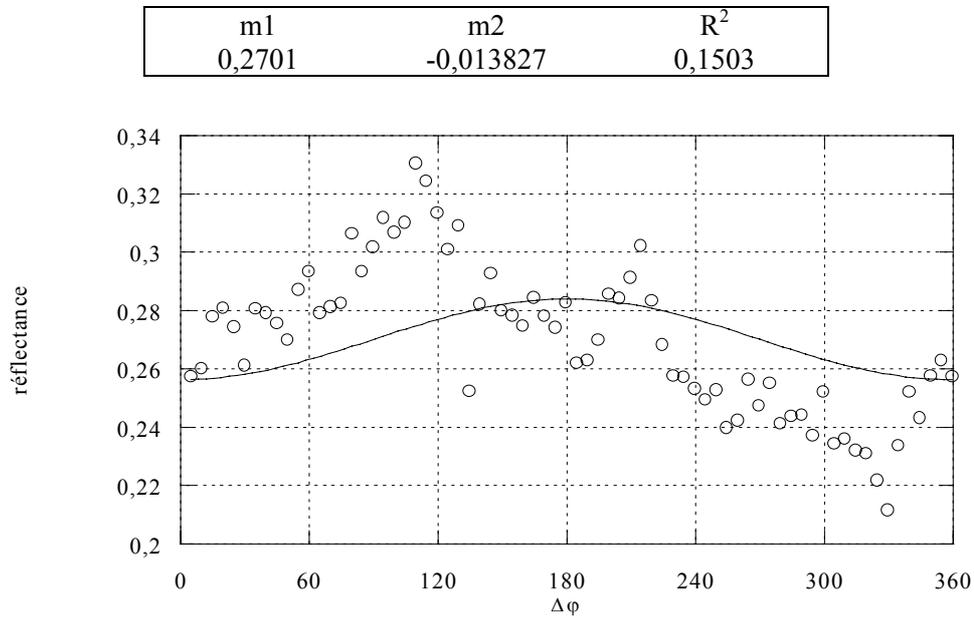
m1	m2	R ²
0,3035	-0,0074555	0,049921



Réflectance en fonction de l'azimut relatif le 4 juillet 1999, protocole n° 5, $h=15^\circ$, $\theta_s=21,50^\circ$

Hauteur $h=30^\circ$

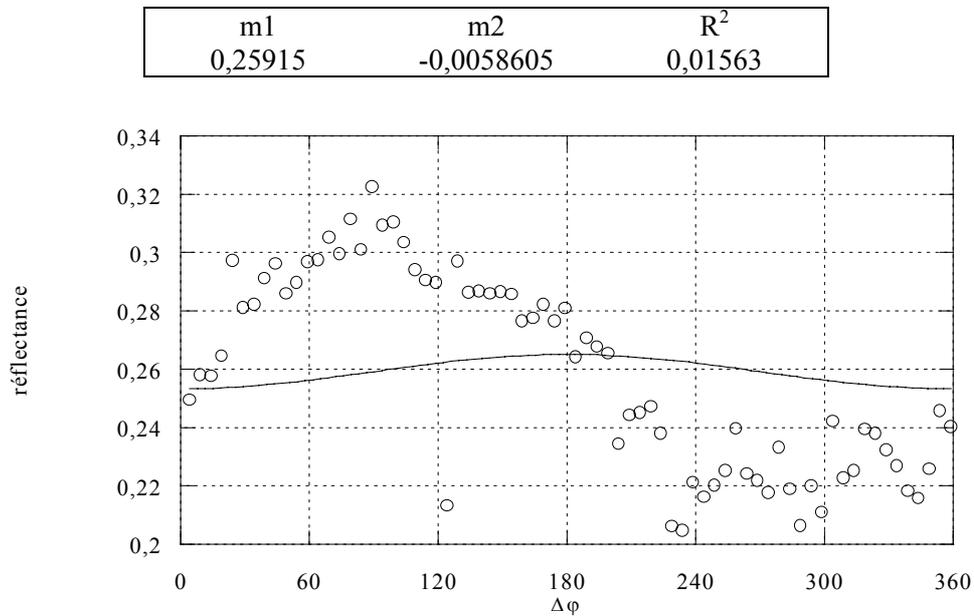
Résultat de la régression de la réflectance en fonction du cosinus de l'azimut relatif



Réflectance en fonction de l'azimut relatif le 4 juillet 1999, protocole n° 5, $h=30^\circ$, $\theta_s=23,12^\circ$

Hauteur $h=45^\circ$

Résultat de la régression de la réflectance en fonction du cosinus de l'azimut relatif

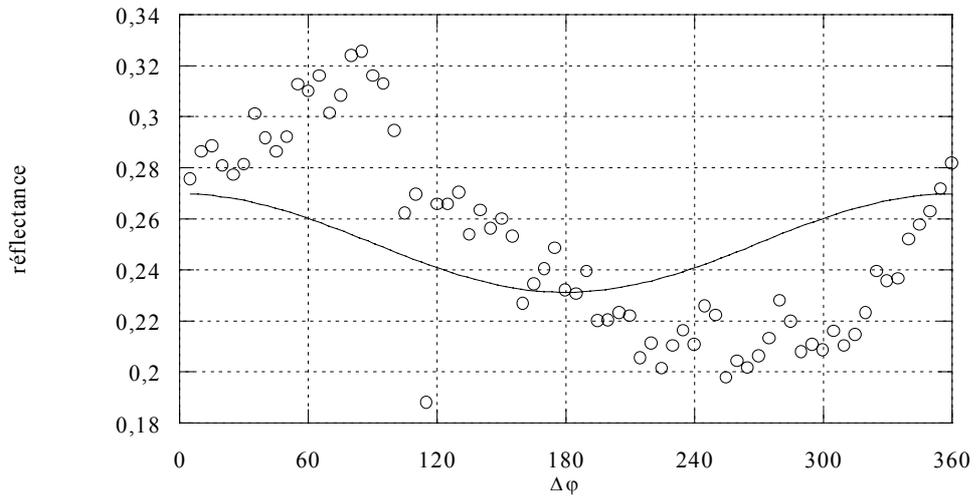


Réflectance en fonction de l'azimut relatif le 4 juillet 1999, protocole n° 5, $h=45^\circ$, $\theta_s=25,34^\circ$

Hauteur $h=60^\circ$

Résultat de la régression de la réflectance en fonction du cosinus de l'azimut relatif

m1	m2	R ²
0,25042	0,019318	0,13608



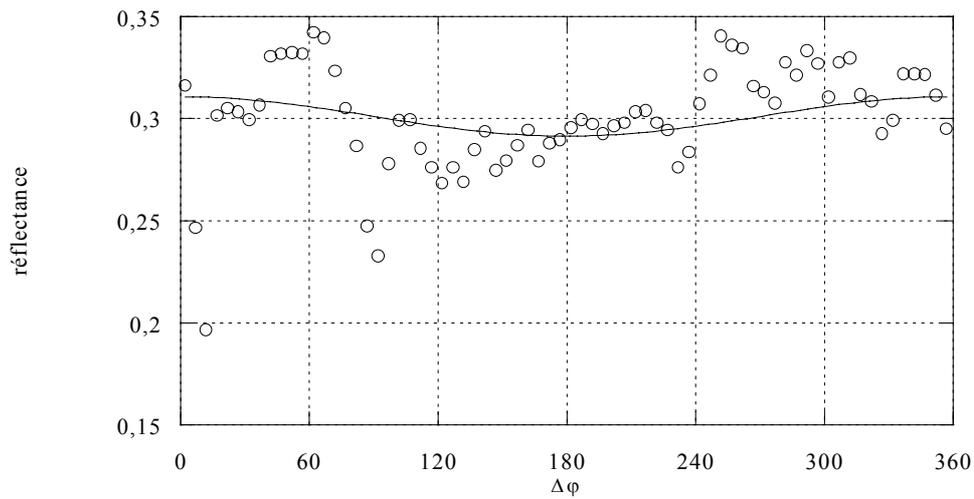
Réflectance en fonction de l'azimut relatif le 4 juillet 1999, protocole n° 5, $h=60^\circ$, $\theta_s=28,14^\circ$

PROTOCOLE 7

Hauteur $h=15^\circ$

Résultat de la régression de la réflectance en fonction du cosinus de l'azimut relatif

m1	m2	R ²
0,301	0,0096573	0,069918

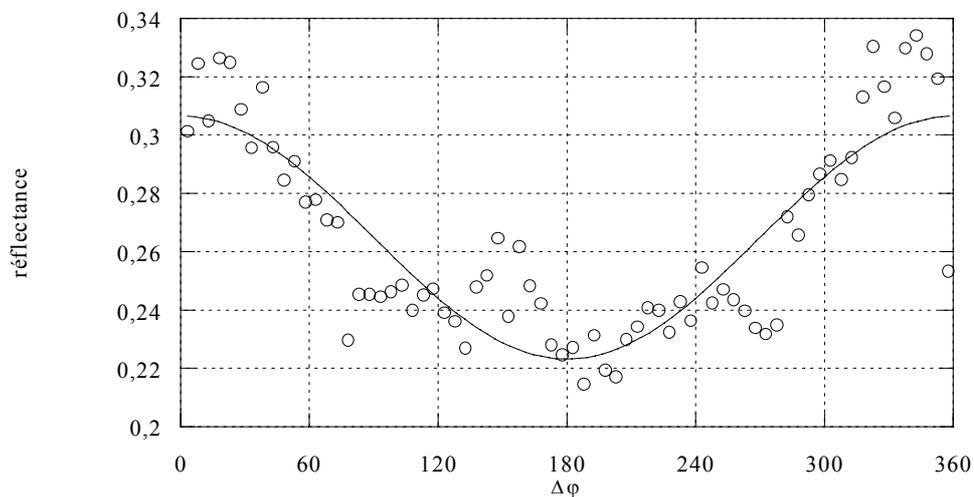


Réflectance en fonction de l'azimut relatif le 4 juillet 1999, protocole n° 7, $h=15^\circ$, $\theta_s=48,71^\circ$

Hauteur $h=30^\circ$

Résultat de la régression de la réflectance en fonction du cosinus de l'azimut relatif

m1	m2	R^2
0,26479	0,041616	0,74464

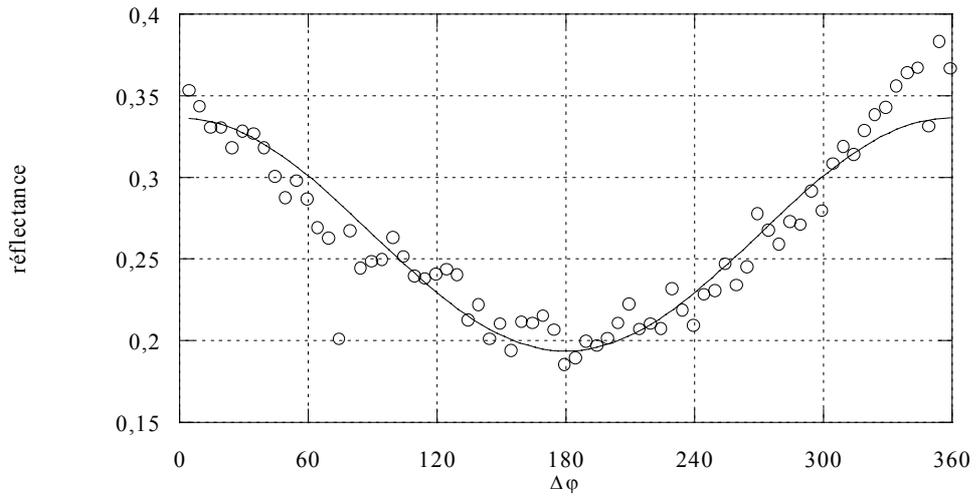


Réflectance en fonction de l'azimut relatif le 4 juillet 1999, protocole n° 7, $h=30^\circ$, $\theta_s=52,61^\circ$

Hauteur $h=45^\circ$

Résultat de la régression de la réflectance en fonction du cosinus de l'azimut relatif

m1	m2	R^2
0,26498	0,071383	0,88665

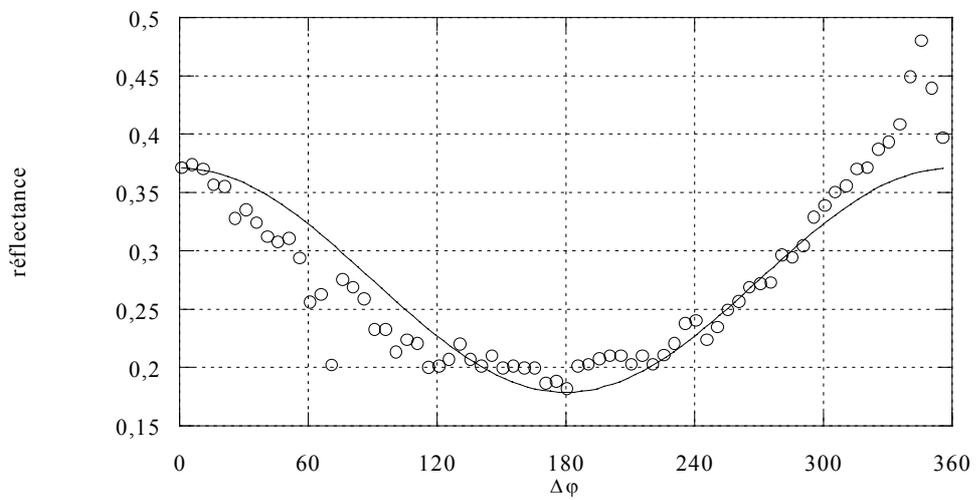


Réflectance en fonction de l'azimut relatif le 4 juillet 1999, protocole n° 7, $h=45^\circ$, $\theta_s=56,41^\circ$

Hauteur $h=60^\circ$

Résultat de la régression de la réflectance en fonction du cosinus de l'azimut relatif

m1	m2	R ²
0,27475	0,09612	0,82445



Réflectance en fonction de l'azimut relatif le 4 juillet 1999, protocole n° 7, $h=60^\circ$, $\theta_s=60,2^\circ$