

# Sources d'erreur en photométrie solaire : détection et correction de leurs effets sur la détermination de l'épaisseur optique des aérosols

KONARE ABDOURAHAMANE, BEDOU MOUHAMADOU et ASSAMOÏ PAUL

## RÉSUMÉ

Ce travail a pour objectif principal, une meilleure maîtrise de l'utilisation des mesures photométriques pour la détermination de la charge de l'atmosphère en aérosol et en vapeur d'eau. Les prétraitements des données photométriques brutes effectués en routine est une étape très importante pour le suivi de l'état des instruments ainsi que pour l'exploitation des données. Pour cela, nous avons recensé les effets additifs responsables des anomalies de mesures, estimé leur importance relative et proposé des méthodes appropriées de correction de leurs effets. C'est ainsi que nous avons montré que lorsque les mesures contaminées par les nuages et celles issues des mauvaises visées sont éliminées, la principale source d'erreur sur la valeur des épaisseurs optiques d'aérosols provient de la détermination d'une mauvaise constante d'étalonnage (cas du canal 368 nm du photomètre) et de l'échauffement anormal des détecteurs qui affecte le signal à 1020 nm. Des méthodes de corrections ont permis de faire passer la constante d'étalonnage à 368 nm de 3 460 à 3 835, soit une augmentation de 0,11 de l'épaisseur optique d'aérosol à 12 TU et de corriger l'effet de température sur les épaisseurs optiques d'aérosol à 1020 nm.

## SUMMARY

The main objective of this work is a better control of the use of sun photometric data for the determination of the atmospheric loading in aerosols and water vapor. The processing of the raw data carried out routinely is a very important issue for the follow-up of the state of the instrument as well as the analysis of its data. We have determined the different problems that may be responsible for the degradation of the data quality and proposed suitable techniques to correct their effects.

From 40 days of measurement made at Bamako in November – December 1991, we applied these processing techniques to detect and screen cloudy data, to detect and deal with wrong calibration constant as well as heat effects on the instrument's filters.

Methods of corrections made it possible to make pass the constant of calibration at 368 nm from 3 460 to 3 835, that is to say an increase about 0.11 of the aerosol optical thickness at 12 GMT and to correct the effect of temperature on the aerosol optical thickness at 1020 nm.

## INTRODUCTION

Les charges de l'atmosphère en vapeur d'eau et en aérosols varient considérablement au-dessus de l'Afrique, à la fois dans l'espace et le temps. Elles affectent grandement les luminances satellitaires qui doivent subir d'importantes corrections. La hauteur d'eau précipitable varie habituellement d'un facteur 6, entre 1 et 6 cm, et elle affecte les luminances dans l'IR thermique (LEGRAND, 1990) et dans le proche IR du spectre solaire où sa contribution au signal peut atteindre 8 % (JUSTICE et al., 1991). Les épaisseurs optiques d'aérosols sont encore plus variables. Dans le spectre de courtes longueurs d'onde, l'effet des

aérosols peut doubler la radiation rétro diffusée au-dessus des zones de faible albédo (végétation dense), affectant ainsi la détermination de l'indice de végétation NDVI (HOLBEN et al, 1991 ; SOUFFLET et al., 1992). La mesure simultanée de la vapeur d'eau et de l'épaisseur optique d'aérosol par un même appareil est un atout qui justifie l'utilisation du photomètre. Nous nous sommes attachés, dans cette étude, à cerner au mieux l'influence des divers paramètres qui interviennent dans la qualité des résultats issus des mesures photométriques réalisées au Centre régional d'énergie solaire (CRES) de Bamako du 05-11-1991 au 21-12-1991.

## I. LA MESURE PHOTOMÉTRIQUE

### 1.1. Le Photomètre

Le photomètre qui a servi à effectuer les mesures a été mis au point par la société française CIMEL Électronique; il a été conçu pour la mesure du trouble atmosphérique à partir des mesures du flux solaire direct et des mesures de la luminance du ciel. Il est équipé d'une roue porte filtres pouvant recevoir 8 filtres. L'angle d'ouverture du détecteur est de 1° pour les mesures du rayonnement solaire direct et de 12° pour la mesure de la luminance du ciel. Le détecteur du photomètre est une photodiode en silicium qui délivre un signal électrique proportionnel à la radiation incidente.

### 1.2. Exploitation des mesures

#### 1.2.1. Détermination de l'épaisseur optique d'aérosol

Un rayon lumineux  $I_\lambda$  qui pénètre dans une colonne d'air atmosphérique chargée de gaz et d'aérosols est atténué par les effets combinés de l'absorption et de la diffusion. Tant que le phénomène de diffusion multiple peut être négligé, la loi d'extinction de Bouguer-Lambert s'applique :

$$I_\lambda = I_{0\lambda} / S \cdot e^{-\tau_\lambda(m)} \quad (1)$$

où  $I_{0\lambda}$  est l'intensité du rayonnement hors de l'atmosphère à la distance moyenne Terre-Soleil; Cette quantité est appelée constante d'étalonnage pour le canal  $\lambda$  ;  $m$  est la masse d'air optique et indique le "nombre d'atmosphères" traversées, tandis que  $\tau_\lambda$  est l'épaisseur optique totale atmosphérique à  $\lambda$  et  $S$  est un terme qui tient compte de la variabilité de la distance Terre-Soleil.

#### 1.2.2. Détermination du contenu en vapeur d'eau

La hauteur d'eau précipitable est la hauteur d'eau qu'on obtiendrait par unité de surface si on liquéfiait toute l'eau contenue sous forme de vapeur dans une colonne d'atmosphère. On utilise la technique d'absorption différentielle (FROUIN et al., 1990), qui consiste à évaluer l'atténuation du rayonnement émis par une source à travers un gaz pour deux longueurs d'onde de coefficients d'absorption nettement différents. Cette technique a été utilisée avec les photomètres LMD/ GEAS (TANRÉ et al., 1988) et CIMEL (Konaré, 1995).

## II. Examen des paramètres qui influencent la qualité des mesures

### 2.1. Théorie des erreurs sur les différents termes de la loi Bouguer-Lambert

La variabilité inter annuelle de la constance solaire n'est pas perceptible sur la constante d'étalonnage, les incertitudes que l'on peut relever sur la valeur de la constante d'étalonnage dépendent principalement de la méthode utilisée pour sa détermination (Soufflet et al, 1992), de l'invariabilité des caractéristiques techniques du photomètre (vérifiée avec le photomètre LMD/ GEAS sur au moins deux années) et de leur stabilité vis à vis de la température.

La formule donnant la variation de la distance terre-soleil (qui intervient dans la détermination de la constante d'étalonnage) peut être connue à  $10^{-4}$  radians (Paltridge, 1976). Nous pouvons donc négliger l'erreur sur sa valeur devant les autres erreurs.

De l'équation (1), en désignant par  $U_\lambda$  le signal photométrique mesuré, proportionnel à  $I_\lambda$ , nous montrons que l'erreur absolue sur l'épaisseur optique d'aérosols  $\tau_{a\lambda}$ , s'écrit ;

$$\Delta\tau_{a\lambda} = 1/m(\Delta U_{0\lambda}/U_{0\lambda} + \Delta U_\lambda/U_\lambda + \Delta S/S + \tau_\lambda \Delta m) + \Delta\tau_{R\lambda} + \Delta\tau_{03\lambda}$$

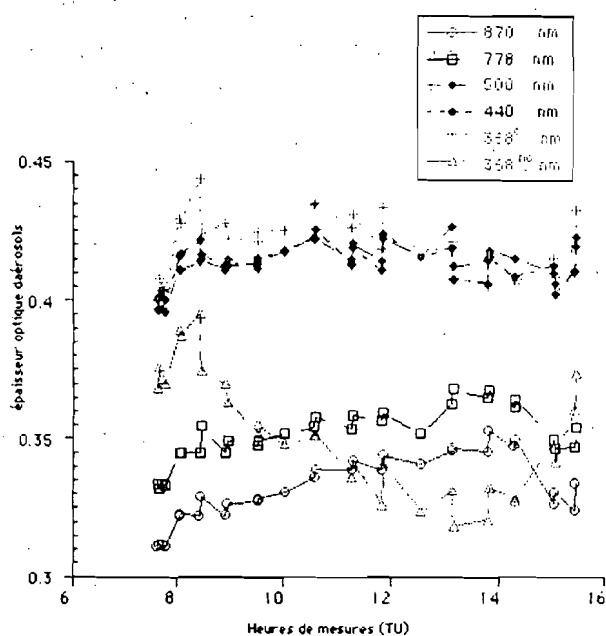
Ceci nous amène à évaluer les incertitudes sur  $U_{0\lambda}$ ,  $S$ ,  $U_\lambda$ ,  $m$ ,  $\tau_{R\lambda}$  et  $\tau_{03\lambda}$  qui limitent la précision sur l'épaisseur optique d'aérosol. Les incertitudes sur  $S$  due uniquement à la formulation est de l'ordre de  $10^{-4}$  radian tandis que celles dues à  $\tau_{R\lambda}$  et  $\tau_{03\lambda}$  sont de l'ordre de 0,005.

### 2.2. Incertitude provenant de la détermination de la constante d'étalonnage

#### 2.2.1. Détection d'une anomalie sur la valeur de la constante d'étalonnage

La précision sur l'épaisseur optique d'aérosols dépend d'abord de la précision sur les constantes d'étalonnage de l'appareil. Pour une longueur d'onde  $\lambda$  donnée, si on utilise comme constante d'étalonnage, non pas la valeur exacte  $U_{0\lambda}$ , mais une valeur approchée  $U_{0\lambda}^*$  telle que :  $U_{0\lambda}^* = U_{0\lambda} (1+\varepsilon)$  on obtient une valeur erronée de l'épaisseur optique d'aérosol  $\tau_\lambda^*$  telle que  $\tau_\lambda^* = \tau_\lambda + \varepsilon/m$  où  $\tau_\lambda$  est la valeur exacte de l'épaisseur optique.

L'observation de l'évolution temporelle de l'épaisseur optique d'aérosols à une longueur d'onde donnée peut nous permettre d'apprécier la qualité de l'étalonnage effectué à cette longueur d'onde. En effet, lorsque la constante d'étalonnage déterminée est erronée, on observe un effet de masse d'air qui se traduit par une sensibilité des épaisseurs optiques à la variation journalière de la masse optique. La représentation graphique de l'évolution temporelle de l'épaisseur optique d'aérosols présente une incurvation avec un maximum correspondant à une masse optique minimale si le signe de  $\epsilon$  est positif (sur estimation de la constante d'étalonnage). Si le signe de  $\epsilon$  est négatif (sous-estimation de la constante d'étalonnage), la courbe présente alors un minimum lorsque la masse optique est minimale.

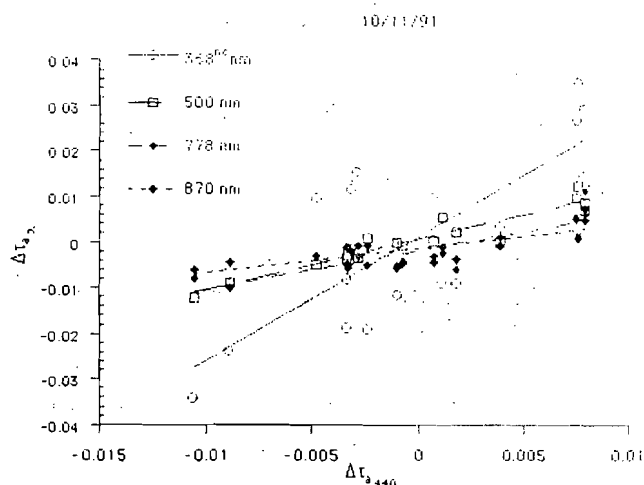


**Figure 1** : Évolution temporelle (heure TU) de l'épaisseur optique d'aérosol pour les longueurs d'onde 870, 778, 500, 440 et 368 nm : le 10-11-1991. Nous avons distingué les épaisseurs optiques d'aérosols obtenues à la longueur d'onde 368 nm avec les constantes d'étalonnage corrigée (c) et non corrigée (nc) pour le CIMEL 5 filtres

On peut d'ailleurs observer cet effet sur la Figure 1 pour la longueur d'onde 368 nm du photomètre CIMEL 5 Filtrés, dont l'épaisseur optique s'écarte d'autant plus des longueurs d'onde 440 nm et 500 nm que la masse optique diminue (de 7h à 12h, cet écart varie de 0,03 à 0,09).

D'une autre façon, si l'on dispose de mesures simultanées (ou quasi simultanées) effectuées aux longueurs d'onde  $\lambda_0$  et  $\lambda$ ,  $\lambda_0$  correspondant au canal dont l'étalonnage est supposé le meilleur (canal de référence), on peut vérifier la fiabilité de l'étalonnage effectué à la longueur d'onde  $\lambda$  en comparant les

fluctuations journalières de l'épaisseur optique d'aérosols  $\Delta\tau_a(\lambda)$  à cette longueur d'onde  $\lambda$  avec les fluctuations  $\Delta\tau_a(\lambda_0)$  à la longueur d'onde  $\lambda_0$ . On suppose que la nature des aérosols ne change pas au cours de la journée même si leur épaisseur optique varie. On peut alors faire l'hypothèse que la dépendance spectrale des épaisseurs optiques est invariante. La Figure 2 présente les régressions entre les fluctuations  $\Delta\tau_a(\lambda_0 = 440 \text{ nm})$



**Figure 2** : Régressions linéaires entre les fluctuations de l'épaisseur optique d'aérosols  $\Delta\tau_a(\lambda_0 = 440 \text{ nm})$  et  $\Delta\tau_a(\lambda)$  correspondant aux longueurs d'onde 870, 778, 500 et 368 nm

et  $\Delta\tau_a(\lambda)$  correspondant aux longueurs d'onde 870, 778, 500 et 368 nm. Les paramètres de ces régressions prouvent que l'hypothèse d'invariabilité au cours du temps de la dépendance spectrale des épaisseurs optiques d'aérosols peut être admise pour les mesures effectuées avec les filtres 870, 778, 500 et 440 nm étant donnée la valeur presque nulle de l'ordonnée à l'origine  $b$  des droites de régression de la Figure 2. Par contre la régression correspondant à la longueur d'onde 368 nm est une droite qui passe loin de l'origine, ce qui indique un problème d'étalonnage.

### 2.2.2. Correction de l'anomalie détectée sur la constante d'étalonnage

Le procédé classique de détermination de la constante d'étalonnage à partir de la droite de BOUGUER, n'est pas d'une précision absolue car, il ne tient pas compte de la variation en nature et en abondance des aérosols lors de l'étalonnage. La technique d'inter-étalonnage développée par (V. Soufflet, 1992) qui est basée sur l'hypothèse que la nature de l'aérosol reste inchangée au cours des mesures bien que leur abondance varie, permet d'étalonner tout photomètre multispectral à condition de posséder un photomètre étalon à une longueur d'onde. Cet étalon peut être réalisé hors atmosphère en embarquant à bord d'un

ballon lors des vols stratosphériques, un photomètre rudimentaire à une longueur d'onde.

En désignant par  $\lambda_0$  la longueur d'onde de référence (étalonée) et  $\lambda$  la longueur d'onde du canal à étalonner, l'épaisseur optique d'aérosols  $\tau_a(\lambda)$  peut s'écrire comme la somme d'un terme constant  $\tau_{a1}(\lambda)$ , correspondant à la moyenne journalière et du terme  $\Delta\tau_a(\lambda)$  qui représente la fluctuation journalière.

$$\tau_a(\lambda) = \tau_{a1}(\lambda) + \Delta\tau_a(\lambda) \text{ pour la longueur d'onde } \lambda$$

$$\tau_a(\lambda_0) = \tau_{a1}(\lambda_0) + \Delta\tau_a(\lambda_0) \text{ pour la longueur d'onde de référence } \lambda_0$$

L'hypothèse d'invariabilité de la dépendance spectrale des épaisseurs optiques d'aérosols, permet de poser :

$$\frac{\Delta\tau_a(\lambda_0)}{\tau_{a1}(\lambda_0)} = \frac{\Delta\tau_a(\lambda)}{\tau_{a1}(\lambda)}$$

ou encore, 
$$\frac{\tau_{a1}(\lambda)}{\tau_{a1}(\lambda_0)} = \frac{\Delta\tau_a(\lambda)}{\Delta\tau_a(\lambda_0)}$$

A défaut de disposer d'un étalonnage hors atmosphère, nous avons appliqué cette technique d'étalonnage aux mesures effectuées avec le filtre 368 nm, en utilisant comme étalon le filtre 440 nm, dont la constante obtenue à Bamako le 10/11/91 est en bon accord avec celle utilisée (obtenue au LOA). Ceci a permis de corriger le défaut d'étalonnage observé au niveau de la longueur d'onde 368 nm du photomètre CIMEL 5 Filtres.

La Figure 1 permet également d'observer l'évolution temporelle de l'épaisseur optique d'aérosol du 11/11/91, mais cette fois avec correction de la constante d'étalonnage du canal à 368 nm. On remarque que la loi de décroissance spectrale de l'épaisseur optique d'aérosol est vérifiée : la courbe de l'évolution temporelle de l'épaisseur optique d'aérosol à 368 nm se trouve au dessus des autres. La valeur de la constante d'étalonnage du canal à 368 nm, qui était 3460 passe à 3835 après correction. Ceci se traduit par une augmentation systématique de l'épaisseur optique d'aérosols d'une valeur de 0,11 m<sup>-1</sup> (m, masse d'air optique).

### 2.3. Incertitude provenant de la mesure du signal

#### 2.3.1. Erreurs d'ordre technique liées à la conception de l'appareil

Les erreurs introduites par la qualité des filtres (THOMASON et al., 1982) et par la prise en compte d'une partie du rayonnement diffus en rapport avec l'ouverture du photomètre (BOX and DEEPAK, 1979) et (REAGAN et al., 1986) sont bien connues. Celles dues à l'influence de la température du détecteur sur les mesures nous paraissent être la plus importante. On sait que le silicium est sensible à la température en ce qui concerne l'effet photovoltaïque, surtout au delà de 1.m ; on s'attend donc à un effet sur le canal de 1020 nm pour des températures très supérieures aux températures enregistrées lors des séances d'étalonnage. C'est ce qu'on observe sur la Figure 3, où la variation temporelle de l'épaisseur optique d'aérosol

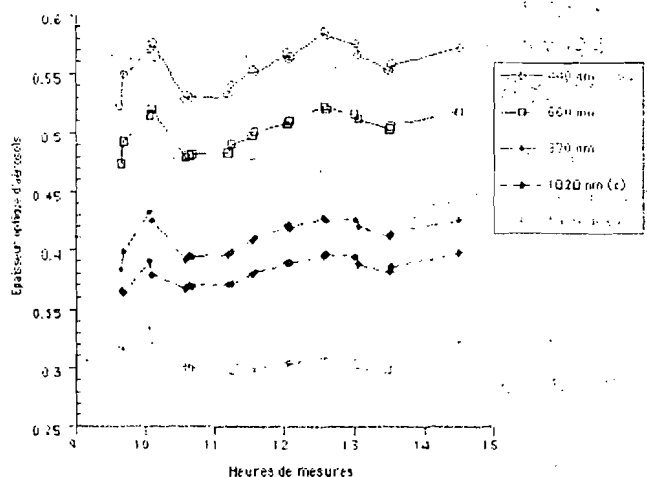


Figure 3 : Évolution temporelle de l'épaisseur optique d'aérosol pendant la journée du 11-11-1991 pour les longueurs d'onde 440, 660, 870 et 1020 nm : non corrigé (nc) et corrigé (c) de l'effet de température à 1020 nm (CIMEL 6 filtres)

de 1020 nm non corrigée (nc) s'écarte de l'ensemble des variations des épaisseurs optiques d'aérosols aux autres longueurs d'onde et cela d'autant plus que les mesures sont effectuées en milieu de journée, justement au moment où la température du détecteur est la plus élevée. Il se pose donc le problème de la correction de cet effet de température. En admettant que le signal mesuré à la longueur d'onde de 1020 nm soit une fonction de la température, nous pouvons associer une fonction  $f(T)$  qui corrige cette dépendance du signal et la loi (1) devient :

$$U_\lambda(T) = U_{0\lambda}(T_0) / S \cdot f(T) \exp(-\tau_\lambda m) \quad (2)$$

Où  $T_0$  est la température moyenne du détecteur le jour de l'étalonnage :

$$f(T_0) = 1 \text{ et } U_{0\lambda}(T_0) = U_{0\lambda}$$

Si on fait une approximation linéaire pour représenter  $f(T) = A + BT$  on peut écrire que  $f(T) = 1 + B(T - T_0)$  : il reste donc à déterminer B.

Si la nature des aérosols ne change pas au cours de la journée (modèle d'aérosol stable), on peut poser

$$\text{que le rapport } \frac{t_{a\lambda}}{t_{a\lambda_0}} = a, \text{ est constant.}$$

$\tau_{a\lambda_0}$ , l'épaisseur optique d'aérosol à la longueur d'onde de référence (870 nm).

$\tau_{a\lambda}$ , l'épaisseur optique d'aérosol à corriger à la longueur d'onde 1020 nm pour la journée du 10/11/91 nous avons observé à partir de la variation temporelle de l'épaisseur optique que les rapports

$$\frac{t_{a440}}{t_{a870}} \text{ et } \frac{t_{a660}}{t_{a870}}$$

pouvaient être effectivement considérés comme des constantes.

Soit :  $\tau_{a1020} = a \cdot \tau_{a870}$ . Sous forme logarithmique, l'équation (7) devient :

$$\ln \left[ \frac{U_{1020}(T)}{U_{01020}(T_0)/S} \right] = \ln (f(T) - m \cdot \tau_{a870} \cdot a) \quad (3)$$

A cette longueur d'onde, l'effet Rayleigh est négligeable et l'on considère que :

$$\ln (f(T)) = \ln (1 + B(T - T_0)), \text{ avec l'approximation } B(T - T_0) \ll 1$$

$$\ln (f(T)) = B(T - T_0) \quad (4)$$

(3) se met sous la forme :  $Z = BX + CY$

$$Z = \ln \left[ \frac{U_{1020}(T)}{U_{01020}(T_0)/S} \right]$$

$$X = T - T_0$$

$$Y = m \cdot \tau_{a870}$$

Les paramètres B et C de la régression multiple à deux variables X et Y ci-dessus définies nous fournissent les coefficients cherchés B et a. La valeur estimée de  $T_0$  est 10°C. En appliquant cette méthode à la journée du 10/11/91, nous avons obtenu 0,005 K<sup>-1</sup> et 0,95 comme valeurs respectives de ces coefficients. La Figure 3 montre également la variation temporelle de l'épaisseur optique d'aérosol le 11/11/91 après correction du signal mesuré à la longueur d'onde de 1020 nm (c).

### 2.3.3. Incertitude due aux nuages ou à la mauvaise visée

Les mesures photométriques sont simples à effectuer lorsque l'on dispose d'un bon appareil. Outre les erreurs liées à l'appareil, un certain nombre d'erreurs sont imputables à l'opérateur. Il s'agit principalement des erreurs dues à une mauvaise visée du Soleil et celles introduites par la présence d'un nuage fin non identifié. Dans un cas comme dans l'autre, on observe des points singuliers qui signalent toujours une augmentation brusque de l'épaisseur optique d'aérosol, qui correspond à une réduction du signal visible à la Figure 4. La méthode de discrimination des mesures erronées que nous proposons est basée sur l'hypothèse que la dépendance spectrale de l'épaisseur optique

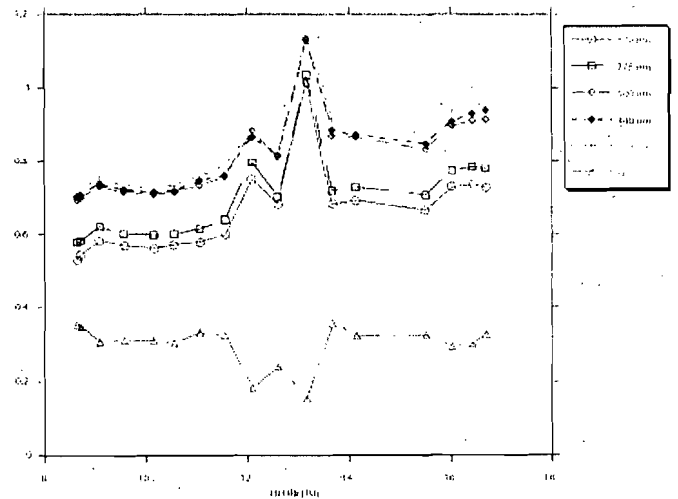


Figure 4 : Mise en évidence de la détection nuageuse à partir de la représentation de la variation temporelle des épaisseurs optiques les 11 et 13 novembre 1991 à partir des mesures brutes. Les augmentations brusques des épaisseurs optiques observées à tous les filtres du photomètre signalent que les mesures ont été faites lors d'un passage de cirrus non détectés à l'œil.

d'aérosols n'est pas la même dans le proche infrarouge que dans le visible. Dans le visible, on détermine les paramètres  $k_v$  et  $r_v$  de la droite des moindres carrés linéaires correspondant à la régression linéaire  $\ln \tau_{a\lambda} = \ln \beta - \alpha_v \cdot \ln \lambda$  entre le logarithme de l'épaisseur optique d'aérosols  $\tau_{a\lambda}$  et le logarithme de la longueur d'onde correspondante  $\lambda$ , où  $\alpha_v$  et  $r_v$  représentent respectivement la pente de cette droite de régression et le coefficient de corrélation linéaire correspondant à cette régression. De la même façon, on détermine dans le proche infrarouge les paramètres identiques  $\alpha_p$  et  $r_p$ . On détermine ensuite le rapport  $k = \alpha_v / \alpha_p$  pour chaque séquence de mesures. Sur l'ensemble des séquences de mesures effectuées au cours de la journée, on calcule la moyenne  $\bar{k}$  des rapports  $k$  obtenus pour chaque séquence et l'écart type  $\sigma_{\bar{k}}$  associés à cette moyenne. Une fois ces paramètres

déterminés, on effectue pour chaque journée de mesures les deux traitements suivants. On élimine directement toutes les séquences de mesures pour lesquelles les coefficients de corrélations linéaires  $r_y$  et  $r_p$  sont inférieurs à 0,99. Ensuite, les séquences de mesures restantes après le premier traitement sont jugées satisfaisantes lorsque  $|\bar{k}-k|$  est inférieure à la valeur seuil définie par l'écart type  $\sigma_{\bar{k}}$ . Sur la Figure 5,

on présente les résultats pour deux types de situations, soit une situation claire sans nuages (11-11-1991) et une très trouble et très nuageuse (07-11-1991). Les critères d'élimination que nous avons fixés et qui nous ont permis d'éliminer les mesures aberrantes, ne sont pas figés. Les seuils que nous avons fixés peuvent être modulés selon que l'épaisseur optique d'aérosol varie beaucoup (ex : 07-11-1991) ou peu (ex : 11-11-1991).

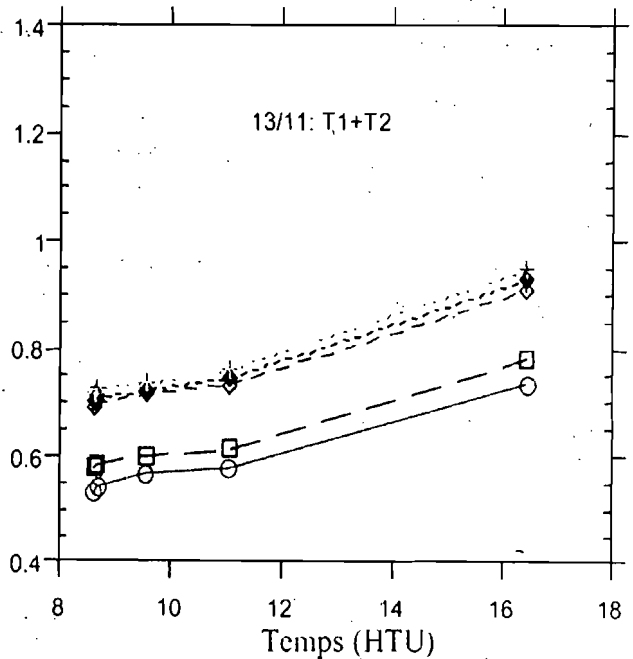
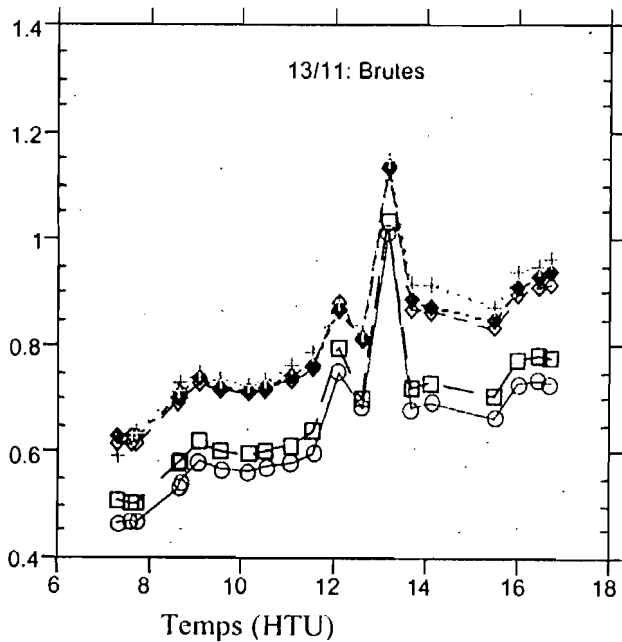
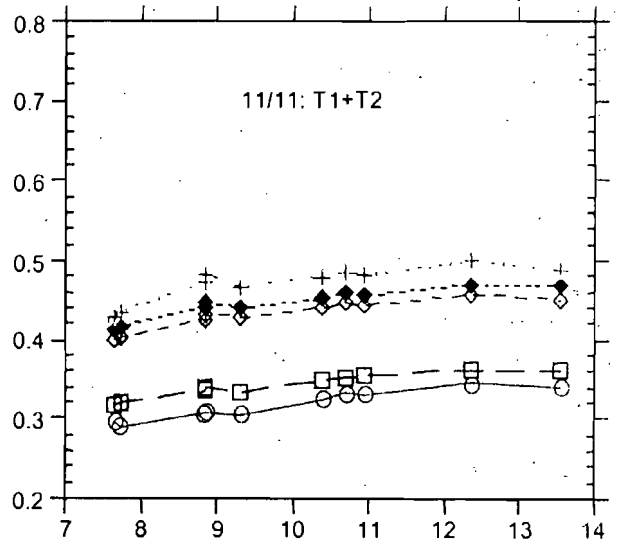
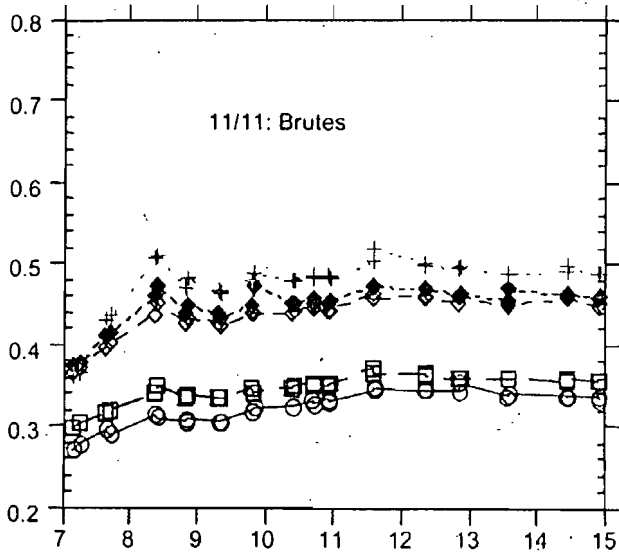


Figure 5: Le résultat des traitements pour la détection nuageuse, effectués sur les mesures brutes du 11-11-1991 (ciel clair et propre) et du 13-11-1991 (ciel nuageux et trouble). T1+T2 indique les séquences restantes en appliquant les deux traitements aux mesures brutes.

**CONCLUSION**

Les techniques de pré traitement des données brutes photométriques que nous avons présentées ont permis d'atteindre pour les épaisseurs optiques d'aérosols une bonne précision, inférieure à 5%. L'objectif principal est le prétraitement en routine de données dans le cadre d'un réseau dans le plan de validation de données satellitaires. Le logiciel de prétraitement est utilisé, non seulement pour le suivi à temps quasi réel, de l'état des instruments de

mesures, mais aussi pour la détermination précise des paramètres géophysiques caractérisant aussi bien l'aérosol que la vapeur d'eau. Les paramètres, épaisseur optique, distribution granulométrique, fonction de phase, indice de réfraction et facteur d'asymétrie des aérosols d'une part, et contenu en eau de l'atmosphère, d'autre part, serviront de données d'entrée dans les algorithmes de correction des effets atmosphériques sur les données satellitaires.

**RÉFÉRENCES**

1. **BOX, A.M. and DEEPAK, A. 1979.** Atmospheric scattering corrections to solar radiometry. *Applied Optics*, vol. 18, p. 1941-1949.
2. **FROUIN, R., DESCHAMPS, P.Y. and LECOMTE, P. 1990.** Determination from space of atmospheric total water amounts by differential absorption near 940 nm: Theory and airborne verification. *Journal of Applied Meteorology* vol. 29, p. 448-460.
3. **HOLBEN, B.N., ECK, T. and FRASER, R., 1991.** Temporal and spatial variability of the aerosol optical depth in the Sahel region in relation to vegetation remote sensing. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 12, p. 1147-1163.
4. **JUSTICE, C.O., ECK, T., TANRÉ, D., and HOLBEN, B.N., 1991.** The effect of atmospheric water vapor on normalized difference vegetation index derived for the Sahelian region from NOAA AVHRR data, *International Journal of Remote Sensing*, vol. 12, p. 1165-1187.
5. **KONARE, A., 1995.** Contribution à l'implantation d'un réseau de photomètres en Afrique: étude critique et exploitation des mesures. Cas de Bidi et de Bamako. Thèse de Doctorat, n° 221, Université de Cocody.
6. **LEGRAND, M., 1990.** Etude des Aérosols Sahariens au-dessus de l'Afrique à l'aide du Canal à 10 microns de Météosat: visualisation interprétation et modélisation. Thèse d'état, n° 787, Université de Lille, Flandres Artois.
7. **REAGAN, J.A., THOMASON, L.W., HERMAN, B.M. and PALMER J.M. 1986.** Assessment of atmospheric limitations on the determination of the solar spectral constant from ground-based spectroradiometer measurements. *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing*, vol. GE-24, n°2, p. 258-266.
8. **SOUFFLET, V., DÉVAUX, C. and TANRÉ, D., 1992.** Modified Langley plot method for measuring the spectral aerosol optical thickness and its daily variations. *Applied Optics*, vol. 31, n°12, p. 2154-2162.
9. **TANRÉ, D., DÉVAUX, C., HERMAN, M., SANTER, R. and GAC, J. M., 1988.** Radiative properties of desert aerosols by optical ground based measurements at solar wavelengths. *Journal of Geophysical Research*, p. 14223-14231.
10. **THOMASON, L.W., HERMAN, B.M., SCHOTLAND, R.M. and REAGAN, J.A. 1982.** Extraterrestrial solar flux measurement limitations due to a Beer law assumption and uncertainty in local time. *Applied Optics*, vol. 18,