

# Détection des nuages de poussières sur les images satellitaires Météosat et leur utilisation comme traceur pour l'identification des zones de déflation des sols par érosion éolienne.

Abdoulaye BAYOKO<sup>1</sup>, Sidi KONATE<sup>1</sup>, Famouké TRAORE<sup>1</sup>, Siméon FONGANG<sup>2</sup>

1. Labo EEA Ecole Nationale d'Ingénieurs, BP 242, Bamako, Mali,

Tél. (223) 22 27 36, Fax: (223) 22 50 38

2. ENSUT BP 5085 Dakar, Sénégal.

## Résumé

Beaucoup de travaux ont déjà été faits sur l'identification des nuages de poussières sur les images Météosat (Fraser, 1976 ; Griggs, 1978 ; Legrand, 1990). La plupart de ces travaux reposent sur le principe de la construction d'une image de référence correspondant à une situation de temps clair et la soustraction arithmétique des comptes numériques de cette dernière à ceux de l'image à étudier qui renferme la structure recherchée. Cette méthode s'avère insuffisante si les comptes numériques de l'image à traiter sont plus faibles que ceux de l'image de référence (par exemple dans le cas des images de nuit et en période d'inversion de température) si aucune autre précaution n'est prise dans le traitement. C'est pourquoi dans cet article, nous avons présenté une méthodologie basée sur l'application de la fonction « OU EXCLUSIF » entre une image de référence et une à traiter.

Cette méthodologie permet d'extraire entre deux images A et B, l'ensemble des structures qui appartiennent à A ou B sans appartenir à la fois à A et B. Appliquée à une image de référence et l'image à traiter, la méthodologie nous a permis de détecter une expansion de nuage de poussières sur le Sahel durant une période d'inversion de température. L'origine de cette expulsion de poussières se situerait dans la région du lac Tchad.

L'imagerie satellitaire nous a permis de déterminer les extensions est-ouest et nord-sud du nuage de poussières. En lui associant les mesures au sol de concentrations de particules effectuées par impacteur à cascades ainsi que des échos du Sodar (pour la détermination de la hauteur de la couche d'inversion de température), nous avons pu

estimer à 5,45 millions de tonnes la quantité de poussières émises durant cet épisode de brume sèche. Nous avons pu ainsi quantifier la vulnérabilité des sols de cette localité à la déflation due à l'érosion éolienne.

**Mots clés :** nuage de poussières, imagerie satellitaire, érosion éolienne, vulnérabilité des sols.

## **Abstract**

Many studies have been already done on the identification of dusts clouds on the Meteosat satellite images (FRASER, 1976; GRIGGS, 1978; M. LEGRAND, 1990 ). Most of these works are based on the principle of the construction of a reference image corresponding to a clear weather situation and the arithmetical subtraction of numerical accounts of this image from the numerical accounts of the images to be studied and which contain the structure we want to detect. This method is insufficient when the numerical accounts of the image to be treated are smaller than the numerical accounts of the reference image (for example in the case of night images or during a temperature inversion) if any other precaution is not taken during the treatment. In fact, in this article we have presented a method based on the applying of the logical « EXCLUSIVE OR » between a reference image and an image to be treated.

This method enables to draw out between two images A and B, the whole structures which belong to A or to B without simultaneously belong to A and B. Applied to a reference image and to the image to be treated, the method has enabled us to detect an expansion of dusts clouds over the Sahelian zone during a temperature inversion.

The source of this dusts expulsion should be located in the Chad Lake area.

Satellite imagery has enabled us to define the East - West and North - South spreadings of dusts cloud. Associating the ground measures of particles concentrations effected by means of a cascades impactor and the Sodar echo (for the determination of the temperature inversion height), we have estimated at 5,45 millions of tons the dusts quantity emitted from the ground during this dust episode. So, we have quantified the land vulnerability in this locality to the aeolian erosion deflation.

**Keywords :** Dusts clouds, satellite imagery, aeolian erosion, land vulnerability.

## **1. Introduction**

L'utilisation des images satellitaires a beaucoup favorisé l'étude à grande échelle de la dynamique des nuages de poussières provenant de l'érosion éolienne.

L'un des problèmes majeurs de l'utilisation des images satellitaires pour la détection des nuages de poussières était l'identification de ces derniers sur les images de jour et de nuit. Plusieurs auteurs ont travaillé sur ce thème (FRASER R., 1976; LEGRAND M. et al., 1989 et 1990; GRIGGS, 1979; CARLSON et al., 1978).

Dans la plupart des études mentionnées ci-dessus, le principe consiste à faire la soustraction arithmétique entre une image de référence construite et correspondant à une atmosphère claire et les images originales contenant les nuages de poussières. Cette méthodologie peut être prise à défaut en cas d'inversion de température et sur les images infrarouges de nuit.

Dans le cas des images de jour et en l'absence d'inversion de température, cette méthode est satisfaisante. Pour les images de nuit et en présence d'inversion de température, la température des nuages de poussières peut être plus élevée que la température de surface des continents. La soustraction arithmétique entre les images originales et l'image de référence aboutit à un compte numérique négatif qui ne permet pas de détecter les éléments atmosphériques. Pour palier cet inconvénient, certains auteurs ont recours à la superposition d'un terme de correction sur les comptes numériques différents. Là aussi, le terme de correction peut varier d'une région à une autre ou d'une saison à une autre à cause des différences de réponses spectrales. C'est pourquoi dans cette étude notre contribution portera sur une méthodologie permettant la détection des nuages de poussières sur les images satellitaires à partir de la différence logique (et non arithmétique) entre les images originales et une image de référence. Cette méthodologie sera illustrée par l'étude d'une situation de poussières qui a persisté durant tout le mois de février 1989 en présence d'une forte inversion de température détectée par un Sodar. Les cartes de surface issues des observations météorologiques seront utilisées pour une comparaison avec les résultats du traitement numérique des images. Enfin nous ferons une estimation de la quantité de particules émises par la déflation des sols à l'aide de nos enregistrements Sodar et de nos mesures de concentrations de particules de poussières par impacteur à cascades et détecteurs optiques.

## **2. Détection des nuages de poussières sur les images satellitaires infrarouges Météosat par soustraction logique**

### **2.1 Généralités**

Les images Météosat utilisées dans cette étude nous ont été fournies par le Centre de Recherche Océanographique de Dakar-Thiaroye (CRODT) du Sénégal. Ces images sont calibrées en température selon la relation:

$$t = (110 - CN)/2$$

où  $t$  est la température du pixel en °C et  $CN$  son compte numérique.

Ainsi, dans cette calibration, les structures froides (comme les nuages d'eau) correspondent à des comptes numériques élevées. Cette calibration est inversée (par rapport à celle où les structures chaudes correspondent aux valeurs radiométriques les plus élevées) mais ceci n'a aucune incidence sur les résultats du traitement des images.

## 2.2. Critères de discrimination des nuages d'eau

Avec la loi de calibration en température adoptée sur les images du CRODT, les nuages d'eau apparaissent sans ambiguïté (avec les comptes numériques les plus élevés) sur les images Météosat infrarouges. Ainsi, en utilisant le module « STATISTIC » du logiciel de traitement d'images CHIPS (HOLM, JORGEN et *al.*, 1988) de l'université de Copenhague, nous avons fixé des seuils de comptes numériques pour la discrimination des nuages d'eau sur les images satellitaires à partir de plusieurs situations de nuages d'eau.

Ainsi, si le compte numérique d'une structure est  $\geq 100$  et si l'écart-type  $\sigma$  des comptes numériques de la structure est  $\geq 7$  on a un nuage d'eau. Ces critères seront utilisés pour l'élimination des nuages d'eau sur les images.

Comme pour le cas des nuages d'eau, à partir de plusieurs situations nettes observées sur les images satellitaires et confirmées par les cartes de surface des services météorologiques, nous avons caractérisé les nuages de poussières. Leur caractéristique essentielle a été la nature de leur structure caractérisée par l'écart-type des comptes numériques  $\sigma$  qui a été très différent de celui des nuages d'eau, soit  $\sigma \leq 4$ .

## 2.3. Identification des zones de poussières sur les images satellitaires par la méthode de la soustraction logique

Les différentes étapes de cette méthodes sont :

### 2.3.1 Construction d'une image de référence

Les images sur lesquelles les éléments atmosphériques comme les nuages d'eau et de poussière figurent sont appelées images originales.

A partir de ces images originales nous avons construit une image de référence sur laquelle les nuages d'eau et de poussières ont été éliminés par la sélection des pixels de plus forte radiance (compte numérique minimum dans notre système de calibration en température) sur une série d'images correspondant à la période d'étude. L'image de référence correspond à une situation de temps clair. C'est pourquoi, dans la construction de cette image, la période d'étude doit être suffisamment longue pour avoir plus de chance d'obtenir une situation de ciel clair à chaque position de pixel et suffisamment courte pour éviter les modifications saisonnières de la réponse spectrale du sol. Généralement, elle varie de 5 à 15 jours. Pour cette étude, nous avons utilisé comme image de référence une image pentadaire de température maximale que le CRODT construit systématiquement.

### 2.3.2 Soustraction logique entre les images originales et l'image de référence

Elle consiste à sélectionner l'ensemble des structures appartenant soit à l'image originale soit à l'image de référence mais n'appartenant pas à la fois aux deux images (OU EXCLUSIF). L'équation logique du OU exclusif est la suivante:

$$D = O \oplus R = (O \cup R) - (O \cap R)$$

avec

D = image différentielle logique;  $\oplus$  = symbole du OU exclusif.

R = image de référence;  $\cup$  = symbole de l'opérateur logique « union ».

O = image originale;  $\cap$  = symbole de l'opérateur logique « intersection ».

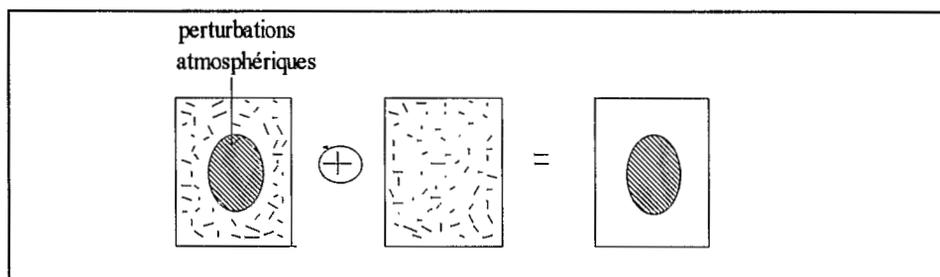


Figure 1. Schéma de l'opération OU Exclusif.

### 2.3.3 Elimination des nuages d'eau

L'élimination des nuages d'eau a été faite en éliminant toutes les structures qui vérifient les deux critères suivants :

- valeur du compte numérique  $\geq 100$ ,
- écart-type  $\sigma$  des comptes numériques  $\geq 7$ .

### 2.3.4 Identification des limites des zones poussiéreuses

Comme il a été signalé plus haut, les zones poussiéreuses sur les images satellitaires sont caractérisées par le fait que l'écart-type de leurs comptes numériques est inférieur ou égal à 4. L'application de ce critère nous a permis d'identifier facilement les limites des zones poussiéreuses.

Nous avons appliqué cette méthodologie à plusieurs situations de nuages de poussières dont l'épisode du 13 au 22 février 1989. La figure 2 montre la représentation du résultat apparu sur une image infrarouge du 14 février 1989. On peut voir l'extension du nuage de poussières entre les longitudes 15° Ouest et 20° Est d'une part, et entre 12° Nord et 18° Nord d'autre part.

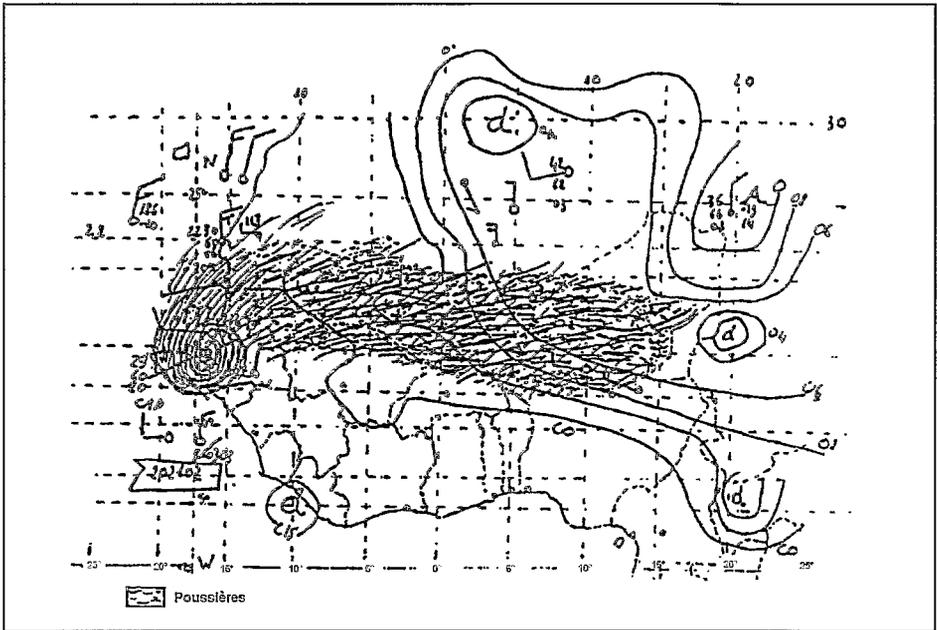


Figure 2. Limite de la brume de poussière d'après le traitement de l'image Météosat du 14/02/89 à 12 TU.

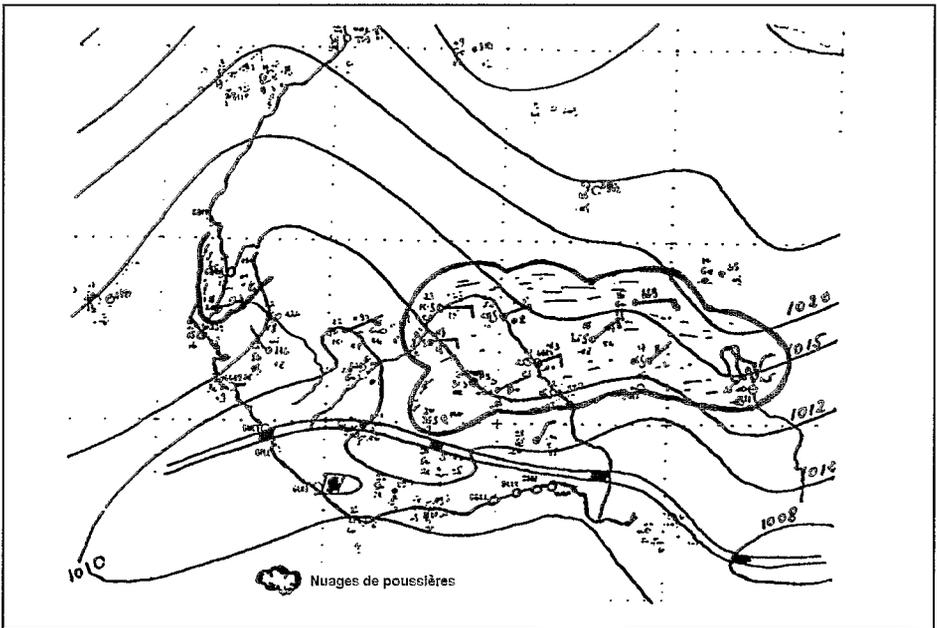


Figure 3. Carte de surface du 14/02/89.

A quelques différences près, ces limites sont en accord avec les limites de la brume de poussières sur la carte de surface du 14 février 1989 (Fig. 3).

L'expulsion de ces particules (générées d'une part par le développement de l'anticyclone libyen et d'autre part par celui des Açores) vers l'Ouest et le Sud a été favorisé par les vents du secteur Nord et Nord-Est (Fig. 4) (BOILIL et TOURE, 1989).

Pour avoir une idée quantitative sur l'effet de l'érosion éolienne qui est à la base de cette expulsion de poussières, nous avons utilisé les limites de l'extension des poussières sur les images traitées.

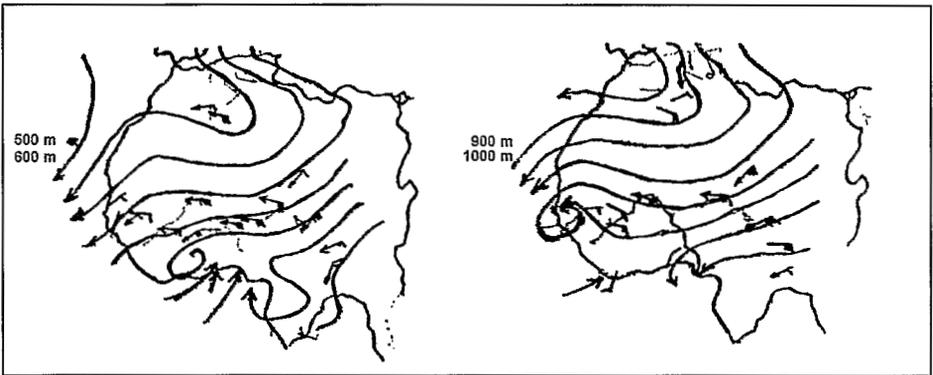


Figure 4. Cartes d'altitude du 14 février 1989 à 12h TU.

### **3. Estimation de la masse de poussières en suspension du 13 au 22 février 1989 au dessus du Sahel**

Durant la période du 13 au 22 Février 1989, les concentrations de particules mesurées par compteur photoélectrique à Dakar ont été particulièrement élevées (BAYOKO, 1990) (Fig. 5). De même les prélèvements de particules sur filtres par impacteur à cascades ont été aussi élevées ( $1,66 \text{ mg.m}^{-3}$  contre une moyenne de  $0,5 \text{ mg.m}^{-3}$  pour la même période).

En utilisant ces mesures de concentrations de particules par impacteur à cascades et les valeurs de visibilité pour la même période (fournies par la météorologie nationale du Sénégal) nous avons établi la loi de corrélation :

$$C = 1500/V$$

pour notre site de Dakar où  $C$  est la concentration exprimée en  $\mu\text{g.m}^{-3}$  et  $V$  la visibilité en km.

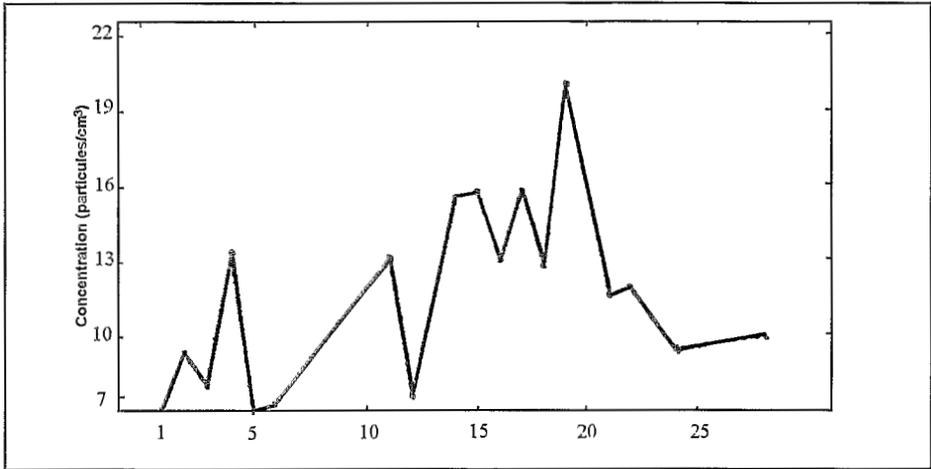


Figure 5. Concentrations mesurées pendant le mois de février 1989.

La visibilité moyenne (obtenue en faisant la moyenne des visibilités journalières durant la période du 13 au 22 février 1989) a été de 1 km.

En supposant cette valeur constante durant la période d'étude, nous avons obtenu une concentration  $C = 1,5 \text{ mg.m}^{-3}$  supposée constante pour toute la période d'étude.

L'enregistrement des échos du Sodar situé sur notre site (Fig.°6) a permis de détecter et de suivre une inversion de température qui a persisté durant tout le mois de février 1989 (KONATE, 1990). Comme on le sait, l'inversion de température bloque les mouvements verticaux ascendants des couches d'air, cette inversion qui a été permanente en février 1989 pourrait être à l'origine de la persistance des épisodes de poussières durant cette période. La hauteur de l'inversion de température a varié entre 200 et 400 m (Fig. 6) soit une moyenne de 300 m.

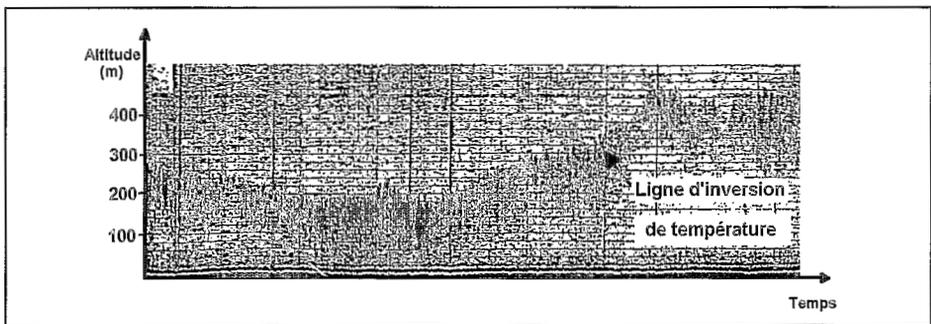


Figure 6. Enregistrement Sodar du 14/02/89.

Par ailleurs, sur le même axe Est-Ouest de transport des particules atmosphériques, nous avons adopté une épaisseur de couche de particules de 2 km (BERTRAND et al., 1974; CERF,

1985) en l'absence d'inversion de température, soit en moyenne 1430 m comme hauteur de la couche de poussières sur toute l'extension est-ouest.

Suivant le traitement numérique des images originales de la période du 13 au 22 février 1989, la bande de poussières s'étend sur 6° en latitude (soit environ 660 km) et entre 15°Est et 20°Ouest du Lac Tchad à l'Atlantique (environ 3 850 km).

En intégrant toutes ces données, nous obtenons une masse de 5,45 millions de tonnes de poussières en suspension durant la période du 13 au 22 février 1989.

## **4. Résultats et discussions**

La méthode d'identification des nuages de poussières par la différence logique offre un certain nombre d'avantages par rapport à la différence arithmétique. Quelle que soit la nature de l'image (image de jour ou de nuit, image prise en présence d'inversion de température ou non), les éléments atmosphériques (nuages d'eau et de poussières) sont représentés par un compte numérique positif; ce qui évite le recours à un terme correctif.

Nous avons pu caractériser la structure des poussières à la suite du traitement statistique. C'est ainsi que les zones couvertes de nuages de poussières ont eu un écart-type  $\sigma$  (des comptes numériques)  $\leq 4$ .

L'image traitée nous a permis d'identifier la région du Lac Tchad comme zone de génération de l'épisode de poussières qui a eu lieu du 13 au 22 février 1989. Nous avons pu également voir que les poussières ont été transportées suivant l'axe est-ouest avec une zone de dépôt au niveau de Dakar (Sénégal). Ce dépôt a été favorisé par la persistance d'une forte inversion de température au niveau du Sénégal (qui a piégé les particules atmosphériques au niveau des basses couches) et à la présence d'une zone de basse pression sur le Sénégal favorisant le recyclage des poussières dans un mouvement cyclonique.

Enfin, nous avons pu délimiter les extensions méridionale et zonale du nuage de poussières à partir des images traitées. En intégrant ces données à celles issues de nos mesures au sol, nous avons estimé la masse de poussières en suspension à 5,45 millions de tonnes. Ceci est un bon indicateur pour évaluer la dégradation des sols dans les régions sources et estimer les dépôts de particules dans les zones puits.

## **Conclusion**

Cet article est une contribution au suivi des sols par érosion éolienne. La méthode de la soustraction logique des nuages de poussières s'est révélée efficace pour supprimer la différence dans le traitement entre les images infrarouges Météosat de jour et de nuit d'une part ou entre les images de jour avec et sans inversion de température d'autre part.

Avec cette méthode, les images de jour comme de nuit sont traitées de la même manière pour l'identification des nuages de poussières.

Les résultats auxquels nous avons abouti ont montré l'utilité de l'imagerie satellitaire pour le suivi à grande échelle de l'érosion éolienne.

Cependant, pour des études quantitatives de l'impact de cette érosion sur les sols, les réseaux de mesures au sol de concentrations de particules ainsi que les sondages en altitude pour déterminer l'extension verticale des nuages de poussières sont encore indispensables. Les études en cours sur la détermination par imagerie satellitaire de l'épaisseur optique des particules atmosphériques et la liaison de cette dernière avec la concentration des nuages de poussières doivent être poursuivies pour mieux approcher les résultats des mesures au sol.

## Bibliographie

- BAYOKO A., « Etude du transport des poussières en Afrique Sahélienne entre 1984 et 1990 et de leur incidence sur le rayonnement solaire ».
- BERTRAND J., BAUDET, DROCHON A. (1974). « Importance des aérosols naturels en Afrique de l'Ouest », *J. Rech. Atmos.* 8, 845-860.
- BOLLIN N., TOURE C. (1989). « Brumes sèches et vents de sable au Sahel: analyse de la situation météorologique du 13 au 22 février 1989 », *Veille climat.*, 27, 24-27.
- CARLSON N., TOBY (1978). « Utilisation des images Météosat: Genèse et évolution d'une tempête de sable sur l'Ouest-Africain », *La météor.* VI, série, n°14, 113-145
- CERF A. (1985). *Contribution à l'étude des aérosols sahariens: influence sur le transfert du rayonnement dans l'atmosphère, caractéristiques optiques.* Thèse de Doct. ès Sciences Physiques, Université des Sciences et Techniques de Lille, 27-252.
- FRASER R. (1976). « Satellite measurement of man of Sahara dust in atmosphere », *Appl. Optics.* 15, n° 10, 2471-2479.
- GRIGGS M. (1979). « Satellite observations of atmospheric aerosols during the EOMET cruise », *J. Atmos. Scie.*, 36, 695-698.
- HOLM, JORGEN et al. (1988). Catalogue du constructeur, Université de Copenhague.
- KONATE S. (1990). *Etude climatologique des inversions de température à Dakar par sondage acoustique*, Thèse de Docteur-Ingénieur ENSUT (UCAD) Dakar.
- LEGRAND M., BERTRAND J.J. MENENGER L., FOUQUART (1989). « The potentiel of infrared satellite data for the retrieval of Saharian dust optical depth over Africa », *J. Appl. Meteor.*, 28, 309-318.
- 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 de Doctorat d'Etat ès Sce Phys. Univ. des Sces et Techn. de Lille Flandres Artois.