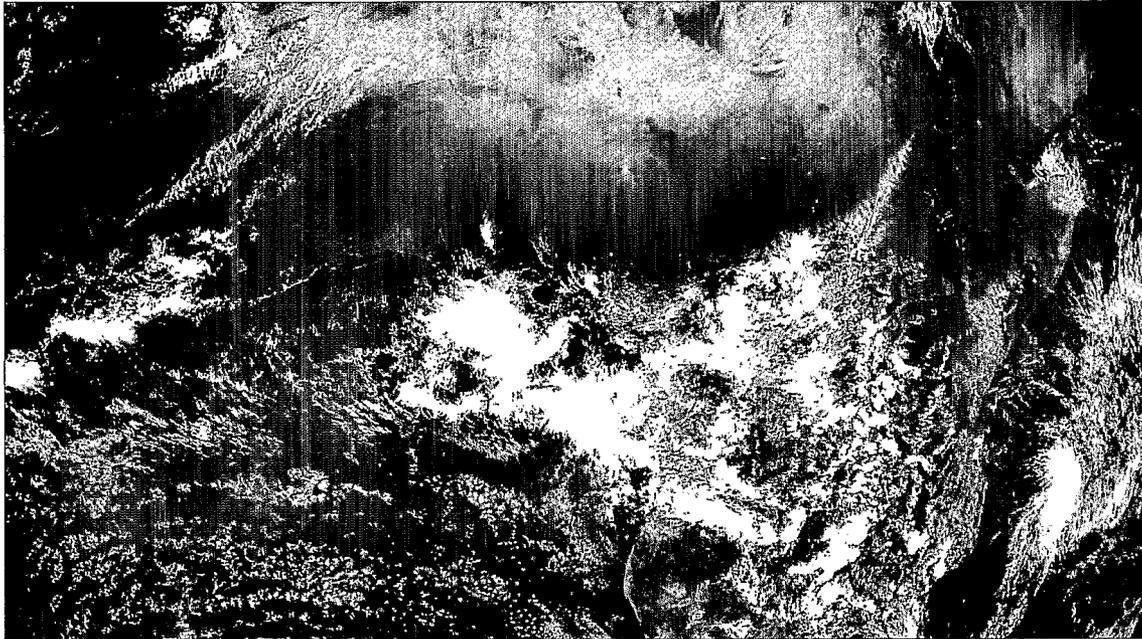
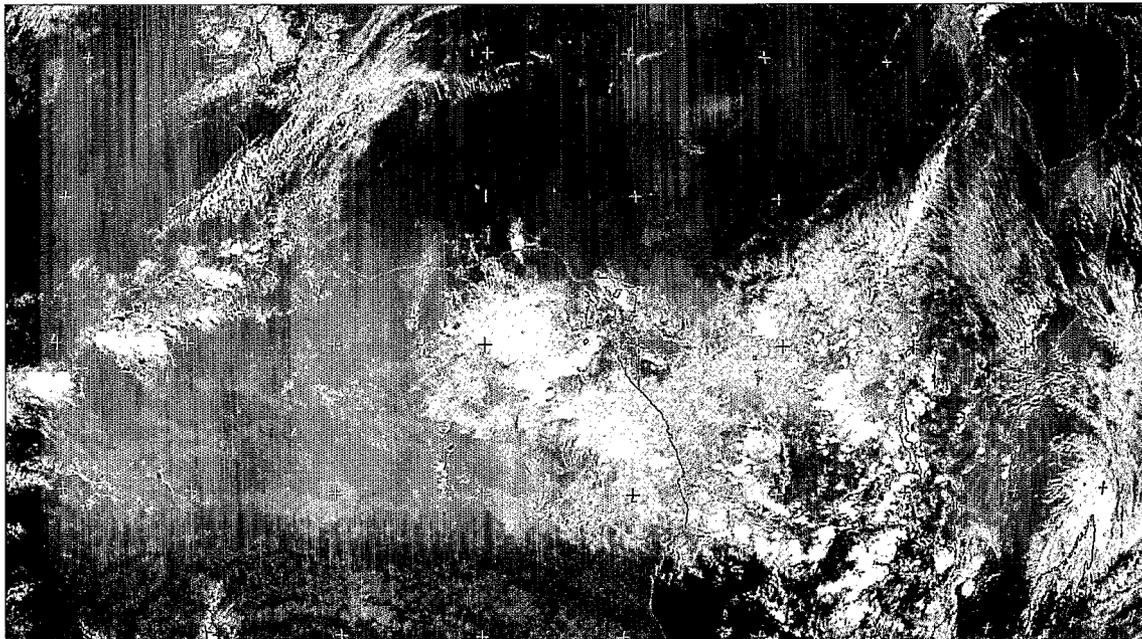


Ministère de la Coopération

VEILLE CLIMATIQUE SATELLITAIRE



METEO FRANCE CMS LANNION - METEOSAT 5 - CANAL VIS - 29/12/94 - 12:00 UTC



METEO FRANCE CMS LANNION - METEOSAT 5 - CANAL IR - 29/12/94 - 12:00 UTC

B* 14459, 464, 463, 465, 467 ex 7

ANALYSE PAR LES VECTEURS REGIONAUX DE LA VARIABILITE SPATIO-TEMPORELLE DES PRECIPITATIONS ANNUELLES LIEES A LA MOUSSON AFRICAINE

ANALYSIS OF THE SPACE-TIME VARIABILITY OF ANNUAL RAINFALL LINKED TO THE AFRICAN MONSOON USING REGIONAL VECTORS

Par G. WOTLING*, G. MAHE**, Y. L'HOTE***, L. LEBARBE****

RESUME

Jusqu'à présent, le manque d'informations pluviométriques, et en particulier les lacunes dans les séries chronologiques ont contrarié les analyses objectives à grande échelle de la variabilité des champs pluviométriques liés à la mousson africaine. La Méthode du Vecteur Régional (MVR) développée à l'ORSTOM et une banque de données très riche, nous ont permis de réaliser une telle analyse. En effet, grâce au logiciel MVR, nous avons pu déterminer 44 vecteurs régionaux (variables synthétiques et complètes) caractérisant l'ensemble de la pluviométrie annuelle liée au flux de mousson de 1951 à 1989. Les algorithmes classiques de l'analyse de données nous ont ensuite permis de présenter d'une part, une régionalisation objective de la zone d'étude et d'autre part, les champs d'anomalies les plus fréquents et les années qui leur sont associées. De plus, nous avons pu montrer que l'essentiel de la variabilité interannuelle des précipitations sur l'Afrique de l'ouest et centrale s'explique à partir de deux composantes, l'une traduisant un effet d'abondance, l'autre un effet de répartition. L'étude de ces deux composantes principales, et en particulier de leur relation avec les températures de surface des océans à l'échelle mondiale et régionale, révèle clairement que la sécheresse enregistrée depuis 1970 est probablement liée à un facteur climatique global affectant l'ensemble de l'Afrique de l'ouest.

INTRODUCTION

En 1992, Hiez et son équipe présentent une analyse de la pluviométrie annuelle du bassin amazonien par les vecteurs régionaux. La qualité des résultats obtenus (Hiez et al., 1986, 1992), nous a incité à reprendre et approfondir la démarche sur l'Afrique de l'ouest et centrale. Ainsi, nous exposons ici les résultats d'une nouvelle exploitation des capacités de synthèse de l'information pluviométrique offertes par la Méthode du Vecteur Régional (Wotling, 1994). Celle-

ABSTRACT

Up to now, the lack of pluviometric information, and in particular gaps in chronological series have been very problematic when large scale objective analyses were carried out on the variability of pluviometric fields linked to the African monsoon. The Regional Vector Method (RVM) developed at ORSTOM, plus a very rich data bank, has enabled us to carry out such an analysis. Thanks to RVM software, we were able to define 44 regional vectors (synthetic and complete variables) characterizing the whole of the annual pluviometry linked to the monsoon flow from 1951 to 1989. Then, classical algorithms for data analysis enabled both an objective regionalization of the study zone and the most frequent anomaly fields with their associated years to be illustrated. Moreover, we were able to show that the major part of the inter-annual variability of rainfall which occurs over West and Central Africa could be explained by two components, one expressing an abundance effect and the other a distribution effect. The study of these two principal components, and especially their relationship with the ocean surface temperatures on a world-wide and regional scale, has clearly shown that the drought which has been recorded since 1970 is probably linked to a global climatic factor affecting the whole of West Africa.

INTRODUCTION

In 1992, Hiez and his team, analysed the annual pluviometry of the Amazonian Basin using regional vectors. The quality of their results (Hiez and Al., 1986, 1992) has led us to apply this method to West and Central Africa. In this paper, we will present the results from a new utilization of the synthesis capacities of pluviometric information provided by the Regional Vector Method (Wotling, 1994). This method has also proved to be very efficient since it has confirmed

*ORSTOM, Laboratoire d'Hydrologie, BP A5, Nouméa Cedex, Nouvelle Calédonie.

**ORSTOM, BP 2528, Bamako, Mali.

***ORSTOM, Laboratoire d'Hydrologie, 911 avenue Agropolis, BP 5045, Montpellier Cedex.



ci s'est également révélé très efficace puisqu'elle a permis de confirmer et de préciser de manière objective les travaux sur la mousson africaine de Janicot (1985, 1989, 1992), Fontaine (1989, 1993), Moron (1992) et Nicholson (1986).

Nous commencerons par rappeler rapidement la définition d'un vecteur régional avant d'aborder l'élaboration des vecteurs régionaux puis leur analyse.

1. DEFINITION DU VECTEUR REGIONAL

Hiez (1977, 1992) a déjà présenté la méthode MVR, nous nous contenterons donc de rappeler ce qu'est un vecteur régional.

Sa définition s'appuie sur deux principes :

– **Le principe de pseudo-proportionnalité** : *“A l'intérieur d'une région homogène, les cumuls annuels observés sont pseudo-proportionnels entre eux”.*

Cela nous conduit à considérer pour une région correspondant à un même type d'évolution climatique la matrice des **données débarrassée des résidus**, (l'information vraie), comme le produit matriciel d'un vecteur colonne contenant l'information temporelle indépendante du poste (**le vecteur régional**) par un vecteur ligne contenant l'information spatiale indépendante du temps (la série des coefficients de stations).

– **Le principe du maximum de vraisemblance** : *“L'information la plus probable est celle qui se répète le plus fréquemment”.*

Cela signifie que le calcul du vecteur régional s'effectue en posant la valeur la plus probable du résidu égale à 0. D'après Hiez (1977, 1986) en utilisant le mode, on minimise numériquement les erreurs et non quantitativement comme les méthodes classiques fondées sur la moyenne ou la médiane. L'inconvénient de ce principe est que le mode n'a pas d'équivalent empirique direct et on ne pourra donc fournir qu'une estimation du modèle. C'est pourquoi nous avons tenu à évaluer la représentativité synthétique des vecteurs régionaux avant de les analyser.

Par conséquent :

– **Un vecteur régional est une suite chronologique d'indices annuels**, représentative de l'évolution des précipitations à l'intérieur d'une région correspondant à un même type d'évolution climatique ;

– aux fluctuations aléatoires près, à l'intérieur d'une région homogène toutes **les stations évoluent colinéairement au vecteur régional** ;

– **un indice annuel** peut être assimilé au rapport entre la pluviométrie régionale de l'année considérée et la pluviométrie régionale moyenne (la moyenne des indices annuels étant proche de 1).

and defined more accurately the studies carried out on the African monsoon by Janicot (1985, 1989, 1992), Fontaine (1989, 1993), Moron (1992) and Nicholson (1986).

We will begin by briefly defining a regional vector before going on to the elaboration of regional vectors and then their analysis.

1. DEFINITION OF A REGIONAL VECTOR

Hiez (1977, 1992) has already presented the RVM method, so we will just briefly go over what a regional vector is.

Its definition is based on two principles :

– **The principle of pseudo-proportionality** : *“Within a homogeneous region, the observed annual totals are pseudo-proportional”.*

This led us to consider the data matrix rid of the residuals (true information) for a region corresponding to the same type of climatic development, as the matricial product of a column vector containing temporal information independent of the station (the regional vector) by a row vector containing spatial information independent of time (the series of station coefficients).

– **The principle of maximum likelihood** : *“The most likely information is that which is repeated the most often”.*

This signifies that the calculation of the regional vector is carried out by putting the most probable value of the residual equal to 0. According to Hiez (1977, 1986) by using the mode, one numerically minimizes errors non-quantitatively, unlike classical methods based on the mean or the median. The drawback to this principle is that the mode does not have a direct empirical equivalent and so one can only provide an estimation of the model. This is why we have evaluated the synthetic representativeness of regional vectors before going on to analyse them.

Consequently :

– **A regional vector is a chronological sequence of annual indexes**, representative of rainfall development within a region corresponding to the same type of climatic development ;

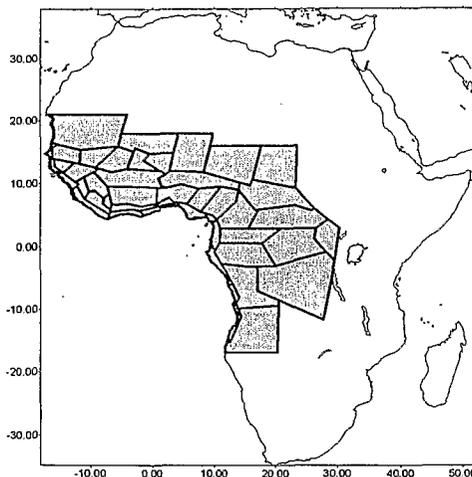
– within a homogeneous region all the **stations develop co-linearly with the regional vector**, apart from random fluctuations ;

– **an annual index** can be assimilated to the ratio between regional pluviometry of the year under consideration and mean regional pluviometry (the mean of the annual indexes being close to 1).

2. ELABORATION DES VECTEURS REGIONAUX

2.1. La zone d'étude

Elle couvre l'ensemble des régions soumises au flux de mousson, du Sahel au plateau angolais sur une surface d'environ 9,5 millions de kilomètres carrés (*figure 1a*). En effet, sa limite nord ($\approx 20^{\circ}\text{N}$) correspond approximativement à la position la plus septentrionale de la trace au sol de l'Equateur Météorologique (ou FIT, Front InterTropical) (Griffiths, 1972). Ses limites sud ($\approx 17^{\circ}\text{S}$) et est ($\approx 30^{\circ}\text{E}$) coïncident avec les positions extrêmes de la zone de Convergence Inter Océanique (CIO, autrement dit la discontinuité d'alizés et de moussons entre les flux atlantiques et indiens) (Leroux, 1980).



2. ELABORATION OF REGIONAL VECTORS

2.1. Study zone

It encompasses all the regions which are subject to the monsoon flow, from the Sahel to the Angolan plateau, covering approximately 9.5 million km² (*fig. 1a*). Its northern limit (about 20°N) approximately corresponds to the most northern position on the ground of the Meteorological Equator (InterTropical Front, ITF) (Griffiths, 1972). Its southern (about 17°S) and eastern limits (about 30°E) coincide with the farthest positions of the InterOceanic Convergence zone (IOC, in other words the discontinuity of the trade-winds and the monsoon flows between the Atlantic and Indian flows) (Leroux, 1980).

Figure 1a : LA ZONE D'ETUDE
THE STUDY ZONE.

2.2. Les données

Nous avons repris et complété sur la période 1951-1989, la banque de données constituée par Mahé et L'Hôte (1992). Celle-ci a un caractère unique pour cette partie du continent africain, par la quantité et la qualité des données qu'elle contient. En effet, sur les 897 stations enregistrées, 230 sont synoptiques donc en principe de très bonne qualité ; les autres postes ont été contrôlés et considérés de qualité satisfaisante. De plus, elle ne contient que 25% de valeurs manquantes sur 35000 années-stations. La densité moyenne est de 1 poste pour 10000 km², mais les stations ne sont pas réparties de façon homogène (*figure 1b*).

2.3. Le découpage en unités climatiques

Mahé (1993) avait défini 39 unités climatiques (régions homogènes respectant le principe de pseudo-proportionnalité) sur la zone d'étude, à partir des travaux de Nicholson et al. (1988), Janicot (1989, 1990a, 1990b) et Dubreuil et al. (1972). Nous avons dans l'ensemble conservé ce découpage, mais pour gagner en précision et en qualité nous avons subdivisé les unités climatiques lorsque les données le permettaient. Nous avons ainsi défini 44 unités climatiques (*figure 1b*). Leur superficie est donc en relation avec la variabilité spatiale des précipitations, mais malheureusement aussi avec la quantité d'information disponible.

2.2. Data

We took up and completed the data bank compiled by Mahé and L'Hôte (1992) for the 1951-1989 period. The quantity and quality of the data it contains is unique for this part of the African continent. Out of the 897 stations which were used, 230 were synoptic and therefore normally provide high quality results ; the other stations were checked and were considered to provide satisfactory results. Moreover, only 25% of the values were missing out of 35000 station-years. The average density was one station per 10 000 km², but the stations were not evenly spread out (*fig. 1b*).

2.3. Subdivision into climatic units

Mahé (1993) defined 39 climatic units (homogeneous regions respecting the principle of pseudo-proportionality) in the study zone, from the work of Nicholson and Al., (1988), Janicot (1989, 1990a, 1990b) and Dubreuil and Al., (1972). On the whole, we have kept this subdivision, but to increase both accuracy and quality we have further subdivided the climatic units when data permitted. We have so defined 44 climatic units (*fig. 1b*). Therefore, their area is related to the spatial variability of precipitations, but unfortunately also to the amount of information available.

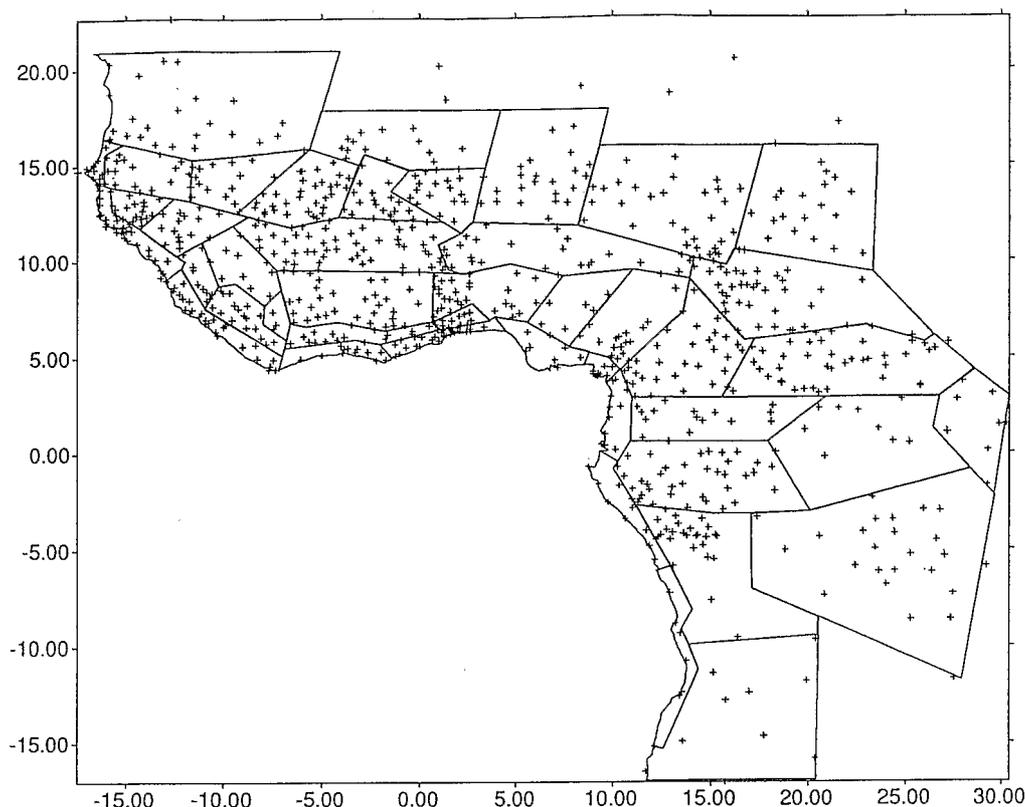


Figure 1b : **LES 44 UNITES CLIMATIQUES ET LA LOCALISATION DES 897 POSTES PLUVIOMETRIQUES.**

THE 44 CLIMATIC UNITS AND THE LOCALIZATION OF THE 897 PLUVIOMETERS.

A partir de ce découpage, nous avons fractionné la banque de données en 44 fichiers-régions que nous avons introduit tour à tour dans le logiciel MVR (Cochoineau et al., 1992), pour obtenir les 44 vecteurs régionaux.

2.4. Evaluation de la représentativité synthétique des vecteurs régionaux

En raison de la spécificité de la méthode MVR, liée à l'utilisation du mode, nous avons tenu à évaluer la représentativité des vecteurs. Pour ce faire, nous avons comparé 250 moyennes annuelles régionales strictement observées à celles reconstituées par les vecteurs régionaux (*tableau 1*). Les analyses statistiques descriptives et les tests paramétriques et non paramétriques que nous avons effectués révèlent que les deux échantillons sont issus d'une même population et que leurs fonctions de distribution sont identiques. Nous avons également établi un coefficient de corrélation de 0,99 avec 98% de variance commune entre les moyennes observées et estimées, ainsi qu'une erreur d'estimation inférieure à 25% dans 95% des cas. Par conséquent, l'utilisation des vecteurs régionaux, comme outil de synthèse pour caractériser les tendances pluviométriques et analyser les variations interannuelles des précipitations à l'intérieur des unités climatiques, semble justifiée tout au moins sur l'Afrique de l'ouest et centrale.

From this subdivision, we split the data bank into 44 region-files that we introduced one by one into the RVM software (Cochoineau and Al., 1992), to obtain 44 regional vectors.

2.4. Evaluation of the synthetic representativeness of regional vectors

Due to the specificity of the RVM method, linked to the use of the mode, we have tried to evaluate the representativeness of the vectors. In order to do this, we compared 250 strictly observed regional annual means with those reconstructed by regional vectors (*table 1*). The descriptive statistical analyses and the parametric and non-parametric tests that we carried out revealed that the two samples were from the same population and that their distribution functions were identical. We also established a 0.99 correlation coefficient with 98% of common variance between the observed and estimated means, as well as an estimation error below 25 % in 95 % of the cases. Consequently, the use of regional vectors, as a synthesis tool to characterize the pluviometric trends and to analyse the interannual variations in rainfall within climatic units, appears to be justified, at least over West and Central Africa.

Statistique descriptive			
Ecart relatif/Relative deviation obs/cal < 25 %		Seuil de confiance/Confidence limit 95 %	
Régression linéaire/linear regression obs = A*cal			
A = 1.02	Coef. corrélation/Corr. coefficient 0.99	Variance commune/Common variance 98 %	
Tests paramétriques/Parametric tests			
Test	Hypothèse	Seuil de signification	Conclusion $\alpha = 5 \%$
Student	$\mu_{obs} = \mu_{cal}$	0.75	Accepté/accepted
Student	$\mu(obs/cal) = 1$	0.43	Accepté/accepted
Fisher Snedecor	$\sigma_{obs} = \sigma_{cal}$		Accepté/accepted
Tests non paramétriques			
Kolmogorov-Smirnov	obs et cal même fonction de distribution	0.97	Accepté/accepted
Signes/Signs	obs et cal	0.18	Accepté/accepted
Wilcoxon	appartient à la même population	0.08	Accepté/accepted
Mann-Whitney	belonging to the same population	0.92	Accepté/accepted

Tableau 1 : EVALUATION DE LA REPRESENTATIVITE SYNTHETIQUE DES VECTEURS REGIONAUX PAR COMPARAISON DE 250 MOYENNES ANNUELLES REGIONALES STRICTEMENT OBSERVEES (OBS) A CELLES RECONSTITUEES PAR LES VECTEURS REGIONAUX (CAL).

EVALUATION OF THE SYNTHETIC REPRESENTATIVENESS OF REGIONAL VECTORS BY COMPARISON OF 250 OBSERVED REGIONAL ANNUAL MEANS (OBS) WITH THOSE RECONSTRUCTED BY REGIONAL VECTORS (CAL).

3. ANALYSE DES VECTEURS REGIONAUX

Nous avons commencé par analyser la matrice des 44 vecteurs régionaux avant d'étudier sa transposée, c'est-à-dire les 39 vecteurs annuels. Comme outil statistique, nous avons utilisé l'Analyse en Composantes Principales (ACP), mais également la Classification Ascendante Hiérarchisée (CAH), avec la distance euclidienne et le moment d'ordre deux comme critère d'agrégation.

3.1. Analyse spatiale des vecteurs régionaux

Notre premier objectif était d'effectuer une zonation des unités climatiques décrites par leur vecteur régional. Nous avons donc introduit les 44 vecteurs régionaux dans l'algorithme de CAH. Il faut rappeler que le critère d'agrégation est la distance euclidienne entre les vecteurs régionaux et non pas le coefficient de corrélation, ce qui diffère de la CAH présentée par Janicot (1992). En choisissant une partition en 7 classes (somme des inerties intra-classes = 40,5 % de l'inertie totale), nous avons défini 7 zones climatiques représentées sur la *figure 2a*. Les barycentres des différentes classes, c'est-à-dire les vecteurs moyens caractérisant l'évolution des précipitations à l'intérieur de chaque zone, sont présentés *figure 2b*.

La **zone 1** se caractérise par une très forte stabilité interannuelle liée soit au climat équatorial, soit à la présence de relief favorisant une forte pluviogénèse. La **zone 2** constitue une zone de transition entre les climats de type tropical et ceux de type équatorial. Cette distinction confirme les observations de Moron (1992, 1994). La **zone 3** déjà clairement individualisée par Janicot (1992) se caractérise par la présence d'une petite saison sèche d'importance très variable en relation avec l'intensité des upwellings équatoriaux. Les **zones 4 et 7** sont des régions côtières possédant une évolution particulière avec une très forte

3. ANALYSIS OF REGIONAL VECTORS

We began by analysing the matrix of 44 regional vectors before studying its transposition, that is the 39 annual vectors. For the statistical analysis, we used Principal Component Analysis and Hierarchical Ascending Clustering (HAC), with the Euclidean distance and the inertia as aggregation criteria i.e. Ward's minimum variance method.

3.1. Spatial analysis of regional vectors

Our primary objective was to carry out a zonation of climatic units described by their regional vector. Therefore, we introduced 44 regional vectors into the HAC algorithm. It must be remembered that the aggregation criterion is the Euclidian distance between the regional vectors and not the correlation coefficient, which is different from the HAC presented by Janicot (1992). By selecting partitioning into 7 classes (sum of the intra-class inertia = 40.5 % of the total inertia), we defined 7 climatic zones shown on *figure 2a*. The barycentres of the different classes, that is the mean vectors characterizing the development of rainfall within each zone, are shown in *figure 2b*.

Zone 1 is characterized by very strong interannual stability linked either to an equatorial climate or to a relief which favours heavy rainfall. **Zone 2** is a transition zone between tropical and equatorial type climates. This distinction confirms the observations of Moron (1992, 1994). **Zone 3** already clearly specified by Janicot (1992) is characterized by the presence of a small dry season of variable importance linked to the intensity of equatorial upwellings. **Zones 4 and 7** are the coastal regions which have a particular development with very pronounced interannual variability in relation to the inland regions of the continent. **Zone 5**

variabilité interannuelle par rapport à l'intérieur du continent. La **zone 5** correspond à la frange sahélienne, le climat est de type tropical à semi-aride (une seule saison sèche supérieure à 6 mois). Avec la **zone 6** fortement influencée par les alizés maritimes du nord-est et l'anticyclone des Açores, on retrouve la distinction zonale mise en évidence par Janicot (1992) et Moron (1992).

corresponds to the Sahelian band, with tropical to semi-arid type climate (only one dry season whose duration is greater than 6 months). Since **zone 6** is strongly influenced by the maritime trade-winds from the North-East and the Azores anticyclone, the zonal distinction observed by Janicot (1992) and Moron (1992) is again encountered.

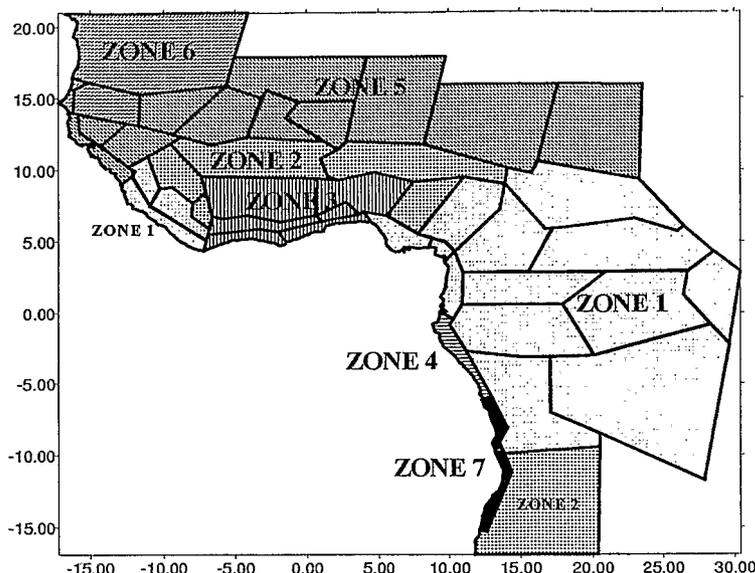


Figure 2a : **LES 7 ZONES CLIMATIQUES DEFINIES PAR LA CAH DES VECTEURS REGIONAUX.**
THE 7 CLIMATIC ZONES DEFINED BY THE HAC OF REGIONAL VECTORS.

Les barycentres vectoriels (*fig. 2b*) révèlent une tendance à la sécheresse à partir de 1970 pour l'ensemble des zones, mises à part les zones côtières (4 et 7) de l'hémisphère sud.

The vectorial barycentres (*fig. 2b*) highlight a dry trend from 1970 onwards for all the zones, apart from the coastal regions (zones 4 and 7) in the Southern Hemisphere.

Ainsi, nos résultats viennent confirmer et préciser les régionalisations de Janicot (1989, 1992) et Moron (1992, 1994), ainsi que les zonations plus subjectives présentées par Dubreuil et al. (1972) et Mahé (1993). Cette analyse a notamment révélé la présence de zones côtières (zones 4 et 7) dont l'évolution est particulière et corroboré l'existence d'une zone de transition (zone 2) déjà individualisée par Moron (1992, 1994). On peut encore signaler, que les zones définies par la CAH se distinguent clairement sur le **plan principal d'une ACP**.

Therefore our results confirm and refine the regionalizations of Janicot (1989, 1992) and Moron (1992, 1994), as well as the more subjective zonations presented by Dubreuil and Al. (1972) and Mahé (1993). This analysis has especially highlighted coastal zones (zones 4 and 7) which have a particular development and corroborated the existence of a transition zone (zone 2) already specified by Moron (1992, 1994). It must be again pointed out that the zones defined by HAC are clearly defined on the **principal plot of a PCA**.

3.2. Analyse temporelle des vecteurs régionaux

3.2. Temporal analysis of regional vectors

Nous étudions maintenant les 39 années de 1951 à 1989. Notre objectif est de caractériser des groupes d'années en fonction de l'abondance et de la répartition des précipitations. Pour ce faire, nous avons analysé la transposée de la matrice des 44 vecteurs régionaux. Nous définissons ainsi 39 vecteurs annuels constitués par la série des 44 indices annuels des régions composant la zone d'étude, pour chacune des 39 années considérées. De cette manière, toutes les unités climatiques ont a priori le même poids, et les excédents ou déficits sont relativisés par rapport à la moyenne de chaque région. Par conséquent, nous perdons un peu la notion de quantité,

Next, we will go on to the 39 years from 1951 to 1989. Our objective was to characterize groups of years as a function of the abundance and spatial distribution of rainfall. In order to achieve this, we analysed the transposition of the 44 regional vector matrix. We so defined 39 annual vectors formed by the 44 annual index series of regions making up the study zone. In this manner, all the climatic units have normally the same weighting, and the excesses and deficits are relative in relation to the mean of each region. Consequently, we slightly lose the notion of quantity, but this avoids our analysis being concentrated on regions with abundant rainfall or with a large surface

mais cela évite que notre analyse soit concentrée sur les régions à forte pluviométrie ou à grande superficie, au profit des régions à forte variabilité de l'Afrique de l'ouest vers lesquelles se tourne en priorité notre intérêt. Ainsi toute l'analyse est orientée vers la partie nord de la zone d'étude et donc sur les conditions climatiques d'été boréal. Aussi, les résultats concernant les régions australes sont à considérer avec précaution.

Afin de remédier à cet inconvénient, nous avons commencé par étudier l'évolution de la moyenne pluviométrique sur l'ensemble de la zone, c'est-à-dire l'aspect quantitatif pur, avant d'introduire les vecteurs annuels dans les algorithmes de CAH et d'ACP.

area, to the detriment of regions with high pluviometric variability in West Africa which especially interest us. So the whole analysis is directed towards the northern part of the study zone and so on southern summer climatic conditions. Therefore, results concerning the southern regions must be considered with precaution.

In order to remedy this drawback, we began by studying the development of the pluviometric mean over the whole zone, that is to say the pure quantitative aspect, before introducing annual vectors into HAC and PCA algorithms.

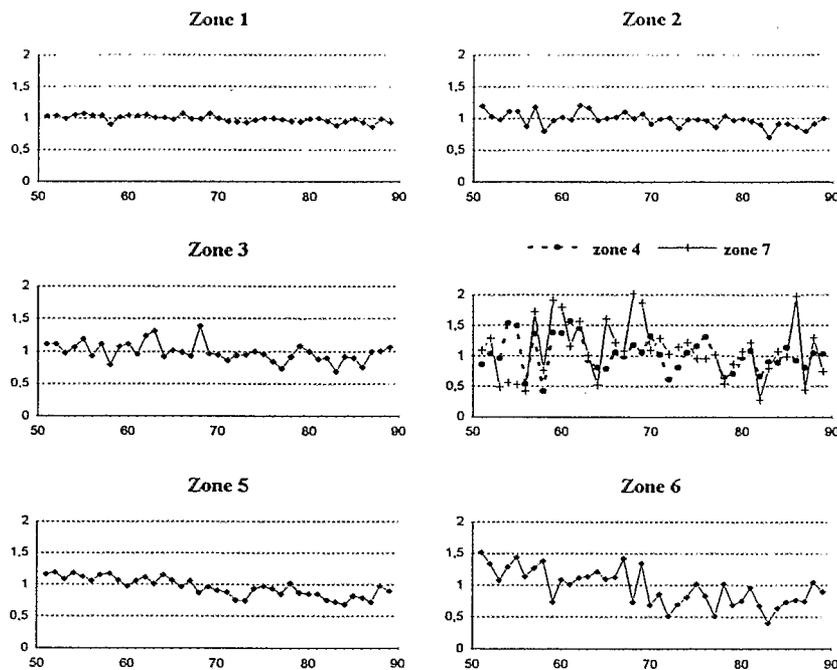


Figure 2b : **VECTEURS MOYENS POUR CHACUNE DES ZONES.**
MEAN VECTORS FOR EACH OF THE ZONES.

3.2.1. Evolution des précipitations sur l'ensemble des régions étudiées

La figure 3 retrace l'évolution de la pluviométrie annuelle moyenne sur l'ensemble de la zone. On note jusqu'en 1970 des valeurs toutes supérieures à la moyenne (sauf en 1958), et après 1970 une pluviométrie dans l'ensemble inférieure à la moyenne sauf en 1975 et 1988 où elle dépasse légèrement 1.430 mm. En examinant la moyenne mobile sur 5 ans, on remarque une tendance générale à la diminution des précipitations entre 1951 et 1989, avec près de $-6,5$ mm/an. En fait, la tendance générale est fortement conditionnée par la période d'observation choisie. Il semblerait plutôt que jusqu'en 1968 la tendance soit relativement stationnaire, et qu'entre 1968 et 1972 il y ait une véritable rupture avec une forte diminution d'environ -25 mm/an. Enfin, les deux dernières années ont une pluviométrie proche de la normale ce qui à tendance à inverser l'évolution de la moyenne mobile.

3.2.1. Development of precipitations over all the studied regions

Figure 3 retraces the development of the mean annual pluviometry over the whole zone. It can be noted that before 1970 all values are higher than average (apart from those of 1958), and that after 1970 pluviometric values are on the whole lower than average apart from in 1975 and 1988 where they are slightly above 1430 mm. When the running average over a 5 year period is examined, it can be noted that there is a general reduction in rainfall between 1951 to 1989, of about -6.5 mm per year. In fact the general trend is strongly influenced by the observation period which is selected. It appears that the trend is relatively stationary up to 1968, and that from 1968 to 1972 there is a real break with an important reduction in the order of -25 mm per year. Lastly, the last two years experienced close to normal rainfall which tends to inverse the development of the running average.

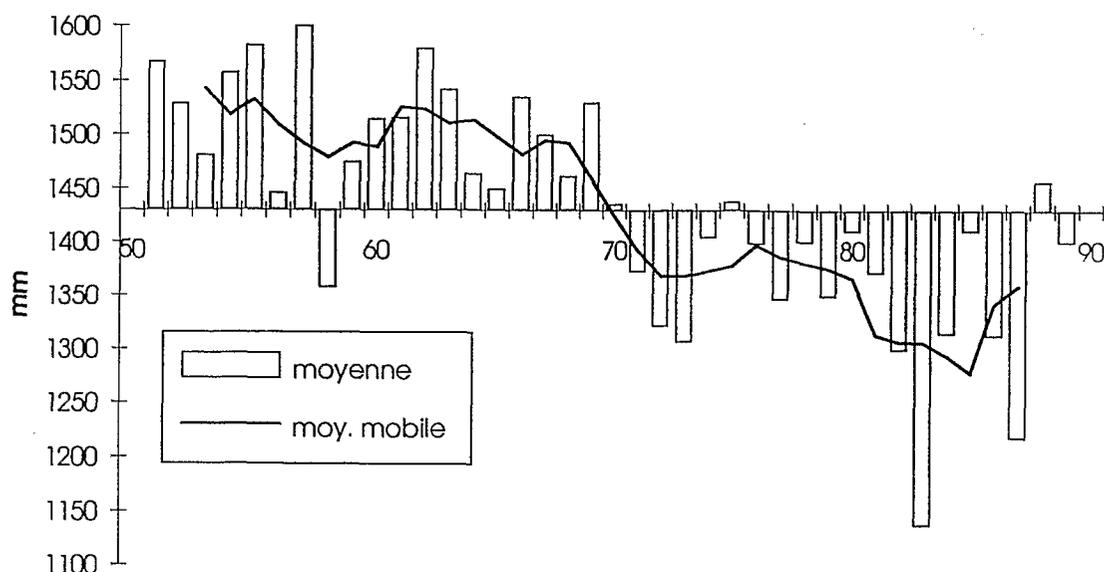


Figure 3: **EVOLUTION DE LA MOYENNE PLUVIOMETRIQUE ANNUELLE SUR L'ENSEMBLE DE LA ZONE ET MOYENNE MOBILE SUR 5 ANNEES (moyenne = 1.430 mm).**

DEVELOPMENT OF THE ANNUAL PLUVIOMETRIC MEAN OVER THE WHOLE ZONE AND THE RUNNING MEAN OVER 5 YEARS (mean = 1430 mm).

3.2.2. Classification Ascendante Hiérarchisée des Vecteurs Annuels

La CAH des vecteurs annuels nous permet de déterminer les champs d'anomalies les plus fréquents et les années qui leur sont associées. Nous avons choisi une partition en 6 classes (somme des inerties intra-classes = 56,5 %) dont les barycentres sont représentés sur la figure 4.

Les **classes 1 et 2** se caractérisent par des excédents généralisés sur l'ensemble de la zone, avec toutefois pour la classe 1 une localisation plus prononcée au nord-ouest. La **classe 3** s'individualise par des excédents au nord-ouest et des déficits au niveau de la zone à petite saison sèche (zone 3, figure 2a) et au sud-ouest. La **classe 4** correspond à la situation opposée et on retrouve ainsi les structures dipolaires autour de 10°N décrites par Nicholson (1986) et Janicot (1989, 1992). Cependant les excédents et déficits apparaissent plus localisés que ne le décrivaient ces deux auteurs, laissant une grande partie du domaine dans une situation proche de la moyenne. Les **classes 5 et 6** représentent des situations opposées aux classes 1 et 2, avec des déficits généralisés et une localisation plus marquée au nord-ouest pour la classe 5.

3.2.3. Analyse en Composantes Principales des Vecteurs Annuels

Afin d'expliquer les différentes structures et leurs relations, nous avons effectué une ACP des vecteurs annuels. La projection sur le plan principal, représentant 48 % de la variance des vecteurs, est donnée figure 5. Celle-ci confirme bien les oppositions entre les classes 6 et 2, 5 et 1, et entre les classes 3 et 4.

3.2.2. Hierarchical Ascending Clustering of Annual Vectors

The HAC of annual vectors has enabled us to define the most frequently occurring anomaly fields with their associated years. We have chosen a partitioning into six classes (sum of intra-class inertia = 56.5%) whose barycentres are shown on figure 4.

Classes 1 and 2 are characterized by generalized excesses over the whole zone, but class 1 has a more pronounced localization in the North-West. **Class 3** is individualized by excesses in the North-West and there are deficits on a level with the short dry season zone (zone 3, fig. 2a) and in the South-West. **Class 4** corresponds to the inverse situation and dipolar structures around 10°N occur, which were described by Nicholson (1986) and Janicot (1989, 1992) described. However, the excesses and deficits appear to be more localized than these two authors described, with a large part of the domain in a situation close to normal. **Classes 5 and 6** represent the opposite situation to what occurs in classes 1 and 2, with generalized deficits and a more marked localization in the North-West for class 5.

3.2.3. Principal Component Analysis of Annual Vectors

In order to explain the different structures and their relationships, we have carried out a PCA of annual vectors. The projection on the principal plane, representing 48 % of vector variance, is shown in figure 5. This clearly confirms the oppositions between classes 6 and 2, 5 and 1, and between classes 3 and 4.

★ **La première composante principale (CP1)**

Elle explique 35,8 % de la variance des précipitations sur la zone d'étude. Ce premier axe traduit un **effet d'abondance** (purement quantitatif) puisqu'il oppose les états globalement excédentaires (classe 2, année 1955) aux états globalement déficitaires (classe 6, année 1983). De plus, nous avons pu établir un coefficient de corrélation 0.96 et 92 % de variance commune entre cette première composante et l'évolution de la pluviométrie moyenne sur l'ensemble de la zone (figure 3).

★ **The first Principal Component (PC1)**

It explains 35.8 % of rainfall variance in the study zone. This first axis expresses the **abundance effect** (purely quantitative) since it opposes globally excess states (class 2, year 1955) with globally deficient states (class 6, year 1983). Moreover, we were able to establish a correlation coefficient of 0.96 and 92 % of common variance between the first component and the development of mean pluviometry over the whole zone (figure 3).

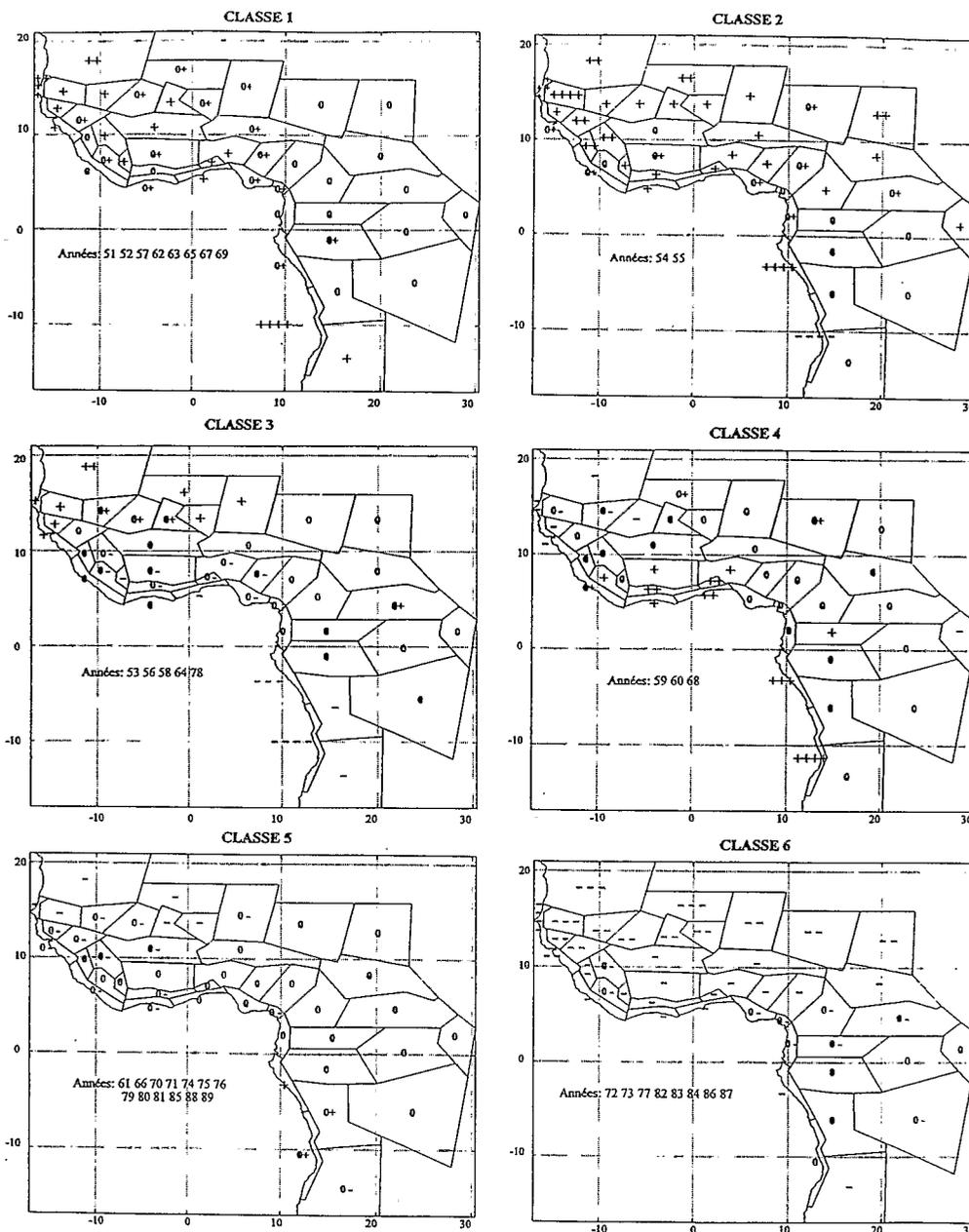


Figure 4 : LES 6 CHAMPS D'ANOMALIES LES PLUS FREQUENTS ET LES ANNEES QUI LEUR SONT ASSOCIEES, DEFINIES PAR LA CAH DES VECTEURS ANNUELS. Chaque signe + (resp. -) représente un excédent (resp. déficit) de 10% par rapport A la moyenne interannuelle de la région considérée. Un 0+ (resp. 0-) indique un excédent (resp. déficit) compris entre 5 et 10%.

THE 6 MOST FREQUENT ANOMALY FIELDS AND THEIR ASSOCIATED YEARS. Each sign + (resp. -) represents an excess (resp. deficit) of 10 % in relation to the interannual average of the region under study. A 0+ (resp. 0-) indicates an excess (resp. deficit) between 5 to 10 % inclusive.

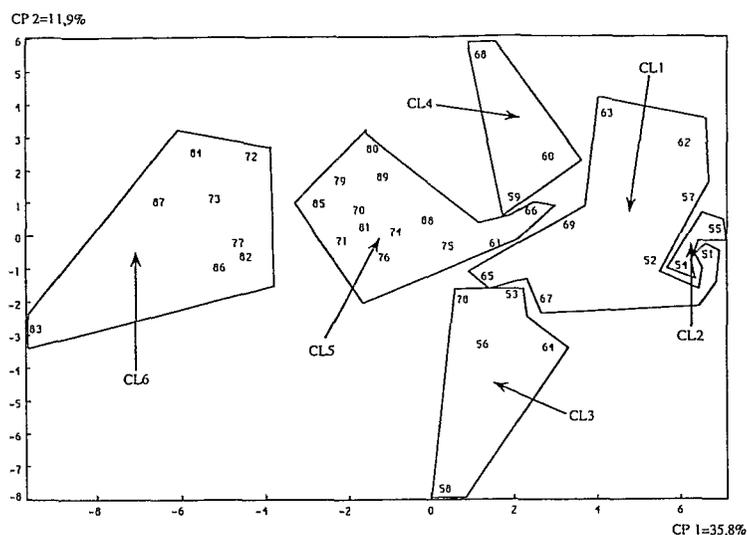


Figure 5 : **PROJECTION SUR LE PLAN PRINCIPAL (48% DE LA VARIANCE) D'UNE ACP DES 39 VECTEURS ANNUELS.**
PROJECTION ON THE PRINCIPAL PLOT (48 % OF THE VARIANCE) OF A PCA OF 39 ANNUAL VECTORS.

Sur le profil de la première composante (*figure 6a*) on relève une rupture très nette entre les années avant 1970 (positives) et celles après 1970 (globalement négatives). Il y aurait donc passage d'un état globalement humide vers un état sec à partir de 1970. Les courbes d'isocorrélation traduisant l'influence de la composante dans l'espace (*figure 6b*) montrent que l'ensemble de la zone est affecté par cette transition, mais qu'elle est la plus ressentie au niveau du domaine soudano-sahélien et surtout vers l'ouest et les côtes sénégalaises.

On the graph of the first component (*fig. 6a*) a clear break can be seen between the years before 1970 (globally positive) and the years after (globally negative). There would have been a change from a globally wet state to a dry state from 1970 onwards. The isocorrelation curves express the influence of the component in space (*fig. 6b*) demonstrating that the whole of the Sahelian zone is affected by this transition, but that it is the most felt on a level with the Sudanese-sahelian domain, especially towards the West and the Senegalese coasts.

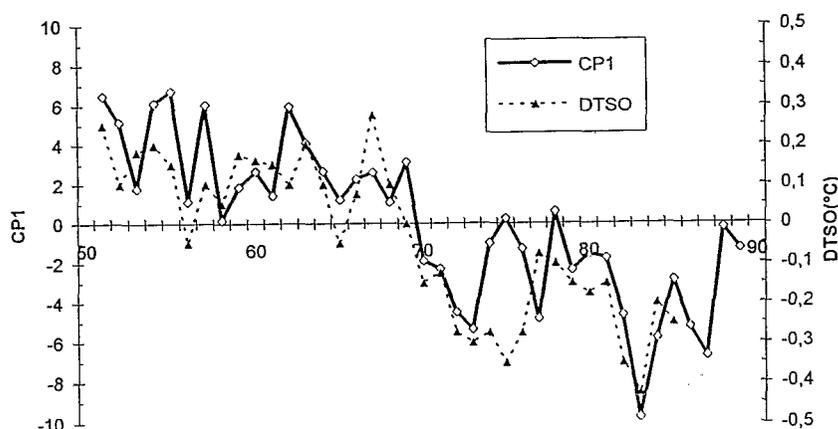


Figure 6a : **EVOLUTION COMPAREE DE LA PREMIERE COMPOSANTE PRINCIPALE (CP1) AVEC LA DIFFERENCE INTERHEMISPHERIQUE DE TEMPERATURE DE SURFACE DES OCEANS (DTSO) (FOLLAND ET AL. 1986).**

DEVELOPMENT COMPARED WITH THE FIRST PRINCIPAL COMPONENT (FPC1) WITH THE INTERHEMISPHERE DIFFERENCE OF THE OCEAN SURFACE TEMPERATURES (DOST) (FOLLAND AND AL., 1986).

On déduit également de ces résultats, que l'essentiel de la variabilité du total pluviométrique sur l'ensemble de la zone d'étude provient de la partie tropicale nord, bien que celle-ci ne représente qu'une faible partie du volume total précipité. Par conséquent, les conditions climatiques de l'été boréal semblent avoir une influence majeure sur la variabilité interannuelle du total pluviométrique de l'ensemble

From these results, it can also be deduced, that the main part of the variability of the pluviometric total over the study zone is due to the northern tropical part, although this only represents a small part of the precipitated total volume. Consequently, the climatic conditions of the southern summer appear to have a major influence on the interannual variability of the pluviometric total of the whole study zone. This is

de la zone étudiée. Cela paraît compréhensible puisque le flux de mousson atteint sa puissance maximale en cette période de l'année (Moron, 1994). De plus, nous avons observé des corrélations positives entre les zones tropicales (5 et 6) et la zone équatoriale, avec des coefficients de 0.63 et 0.61, ce qui peut expliquer dans une certaine mesure les observations précédentes.

understandable since the monsoon flow reaches its maximal power at this time of year (Moron, 1994). Moreover, we have observed positive correlations between the tropical zones (5 and 6) and the equatorial zone, with coefficients from 0.63 to 0.61, which can to some degree explain the previous observations.

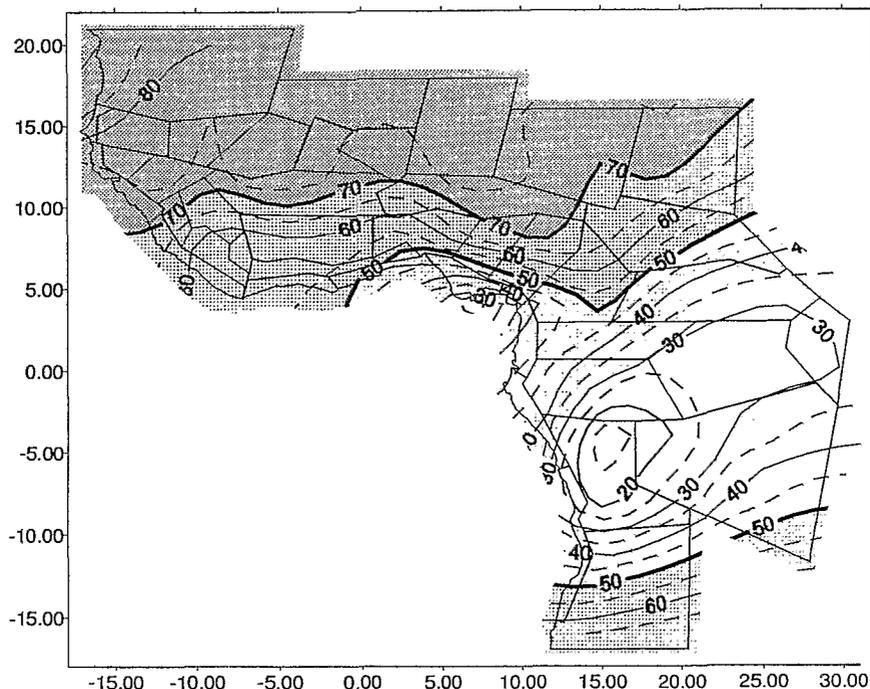


Figure 6b : COURBES D'ISOCORRÉLATIONS (*100) TRADUISANT L'INFLUENCE DE LA PREMIÈRE COMPOSANTE PRINCIPALE (CP1) DANS L'ESPACE.

ISOCORRELATION CURVES (*100) EXPRESSING THE DIFFERENCE OF THE FIRST PRINCIPAL COMPONENT (PC1) IN SPACE.

D'après les conclusions de Janicot (1990a, 1990b) et Fontaine (1989), les situations décrites par les classes 5 et 6 (au moins pour la partie nord), correspondraient à un renforcement et/ou un déplacement vers l'est de la branche subsidente de la cellule Atlantique de type Walker. Le lien avec les circulations divergentes zonales de type Walker laisse supposer l'existence de téléconnexions avec la dynamique atmosphérique intertropicale à l'échelle globale. Cela nous a conduit à comparer la série chronologique de la différence des anomalies annuelles (mesurées entre juillet et septembre) de température de surface des océans entre l'hémisphère nord et l'hémisphère sud (DTSO) fournie par Folland et al. (1986), avec la première composante principale (fig. 6a).

According to the conclusions of Janicot (1990a, 1990b) and Fontaine (1989), the situations described by classes 5 and 6 (at least in the northern part), would correspond to a strengthening and/or eastward shift of the downflow branch of the Walker type Atlantic cell. The link with Walker type zonal divergent circulations leads one to suppose that there are teleconnections with intertropical atmospheric dynamics on a global scale. This has led us to compare the chronological sequence of the difference between annual anomalies (measured between July and September) of the ocean surface temperatures between the Northern and Southern Hemisphere (DOST) provided by Folland and Al., (1986), with the principal component (fig. 6a).

Il apparaît que **la première composante est fortement liée à la différence de température interhémisphérique de l'été boréal, avec un coefficient de corrélation de 0,83 et 68 % de variance commune.** La première composante peut donc être approchée par un **facteur climatique global de l'été boréal.** Le *tableau 2* présente les coefficients de corrélation entre la DTSO, la première composante et le vecteur moyen de chaque zone (fig. 2b).

It appears that **the first component is strongly linked to the interhemisphere temperature difference during a southern summer, with a 0.83 correlation coefficient and 68% common variance.** The first component can therefore be approached using a **global climatic factor** of southern summer. *Table 2* presents the correlation coefficients between the DOST, the first component and the mean vector of each zone (fig. 2b).

	DTSO	CP1
Zone 1	0.63 (40 %)	0.82 (68 %)
Zone 2	0.63 (40 %)	0.83 (69 %)
Zone 3	0.55 (31 %)	0.64 (42 %)
Zone 4	0.32 (11 %)	0.43 (19 %)
Zone 5	0.77 (59 %)	0.89 (80 %)
Zone 6	0.72 (53 %)	0.86 (74 %)
Zone 7	0.21 (05 %)	0.16 (03 %)

★ La deuxième composante principale (CP2)

Elle traduit un effet de répartition expliquant 12 % de la variance des précipitations. En effet, elle oppose la classe 3 (année 1958) à la classe 4 (année 1968), c'est-à-dire des situations où l'on observe à la fois des excédents et des déficits sur la zone d'étude.

Janicot (1989, 1992) et Nicholson (1986) avaient décrit les structures dipolaires représentées par cette composante en traçant une limite rectiligne suivant la latitude 10°N. La courbe d'isocorrélation "0" (fig. 7b) précise cette limite. En fait, on peut distinguer 4 zones ; 2 zones positives (corrélation > 0.30), une zone négative (corrélation < -0.30) et une zone neutre ou stable (-0.30 < corrélation < 0.30). Ainsi, les reliefs camerounais semblent avoir un rôle déterminant, en séparant le domaine de corrélation positive en deux.

Sur le profil (fig. 7a), on ne distingue aucune rupture entre les valeurs avant et après 1970. On remarque également que les années 1958 et 1968 s'opposent très nettement, or il est connu qu'en 1958 les eaux du Golfe de Guinée étaient anormalement froides et qu'en 1968 elles étaient particulièrement chaudes (Hisard, 1980). Par conséquent, nous avons comparé l'évolution des Températures de Surface de la Mer mesurées entre juillet et septembre, au niveau de l'upwelling équatorial Atlantique (TSM) fournies par Mahé et Citeau (1993) à celle de la deuxième composante.

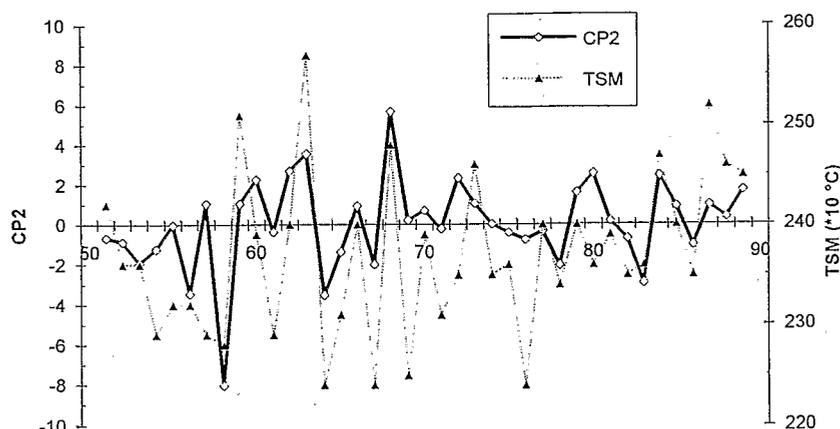


Figure 7a : EVOLUTION COMPAREE DE LA DEUXIEME COMPOSANTE PRINCIPALE (CP2) AVEC LES TEMPERATURES DE SURFACE DE LA MER MESUREES AU NIVEAU DE L'UPWELLING EQUATORIAL ATLANTIQUE (TSM) (MAHE ET CITEAU, 1993).

DEVELOPMENT COMPARED WITH THE SECOND PRINCIPAL COMPONENT (PC2) WITH THE SEA SURFACE TEMPERATURES MEASURED ON A LEVEL WITH THE ATLANTIC EQUATORIAL UPWELLING (SST) (MAHE AND CITEAU, 1993).

Tableau 2 : COEFFICIENT DE CORRELATION ET, ENTRE PARENTHESES, POURCENTAGE DE VARIANCE EXPLIQUEE ENTRE LA DTSO, LA CP1 ET LES VECTEURS MOYENS DE CHAQUE ZONE.

CORRELATION COEFFICIENT AND PERCENTAGE OF EXPLAINED VARIANCE (BETWEEN BRACKETS), BETWEEN DOST, PC1 AND THE MEAN VECTORS OF EACH ZONE.

★ The second principal component (PC2)

It expresses a distribution effect explaining 12 % of rainfall variance. It opposes class 3 (year 1958) to class 4 (year 1968), that is situations where both excess and deficit situations occur over the study zone.

Janicot (1989, 1992) and Nicholson (1986) described the bipolar structures represented by this component by plotting a rectilinear limit along latitude 10°N. The "0" isocorrelation curve (fig. 7b) defines this limit. In fact, one can distinguish four zones, 2 positive zones (correlation > 0.30), 1 negative zone (correlation < -0.30), and a neutral or stable zone (-0.30 < correlation < 0.30). Therefore, the Cameroons relief appears to play a decisive role, separating the positive correlation domain in two.

On graph (fig. 7a), no breaks can be seen between the values before and after 1970. It can also be noted that there is a great contrast between 1958 and 1968, but in 1958 the water in the Gulf of Guinea was abnormally cold and in 1968 it was especially warm (Hisard, 1980). Consequently, we have compared the development of Sea Surface Temperatures measured between July and September, on a level with the Atlantic equatorial upwelling (SST) provided by Mahé and Citeau (1993) to that of the second component.

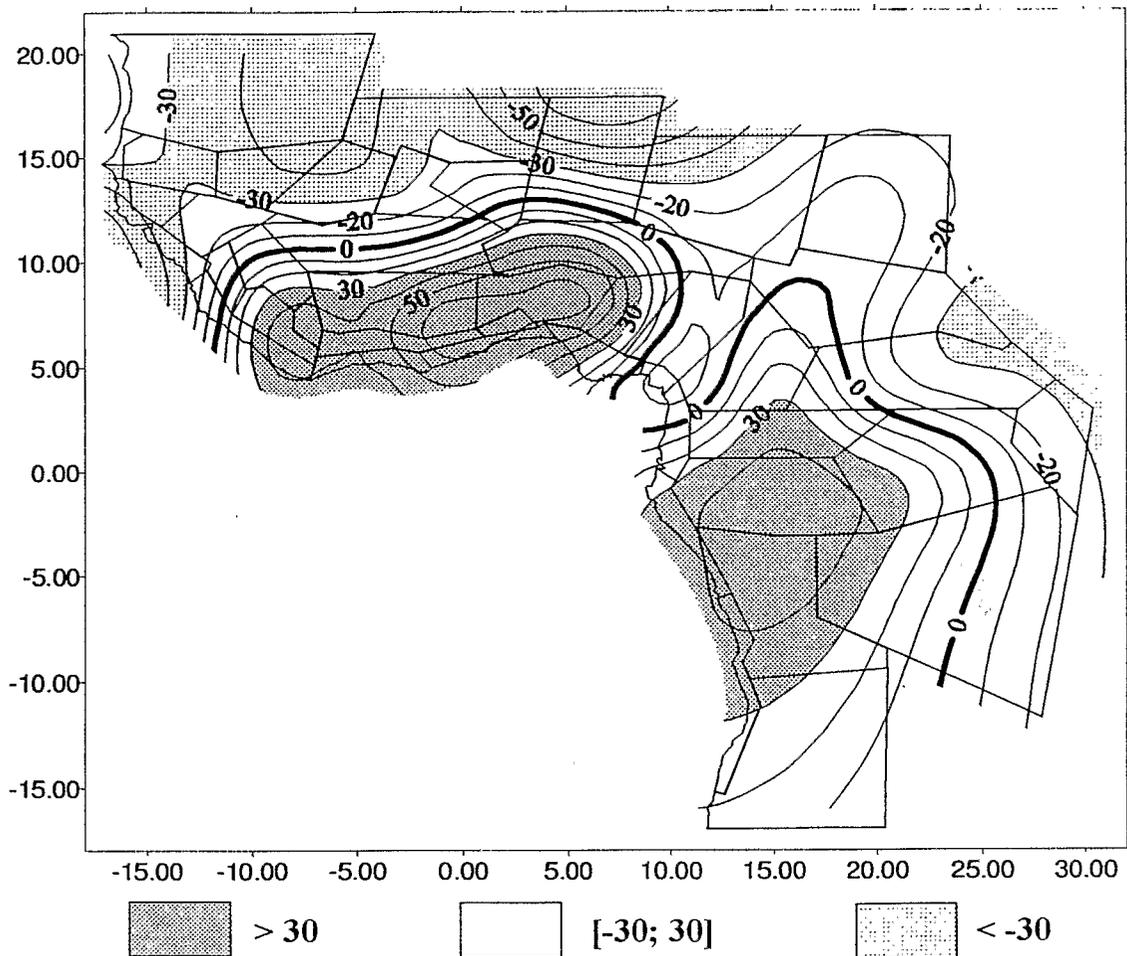


Figure 7b : **COURBES D'ISOCORRELATIONS (*100) TRADUISANT L'INFLUENCE DE LA DEUXIÈME COMPOSANTE PRINCIPALE (CP2) DANS L'ESPACE.**

ISOCORRELATION CURVES (*100) EXPRESSING THE INFLUENCE OF THE SECOND COMPONENT (PC2) IN SPACE.

Il apparaît que la **deuxième composante évolue de manière sensiblement colinéaire aux TSM de l'upwelling équatorial Atlantique. Le coefficient de corrélation est de 0.60 avec 37% de variance commune.** D'après Servain (1984), l'apparition de l'upwelling équatorial Atlantique est liée à l'intensification soudaine des alizés de sud-est, c'est-à-dire au déclenchement de la mousson. Mahé et Citeau (1993) ont également mis en évidence une relation entre la position de l'anticyclone de Sainte Hélène, les alizés du sud-est, et les TSM. Cette relation a par ailleurs été confirmée par Citeau et al. (1994). L'anticyclone étant situé à la subsidence de la branche sud de la cellule de Hadley sud, on peut voir dans la relation entre les TSM et la deuxième composante l'effet d'un **facteur régional**. Le *tableau 3* présente les coefficients de corrélation linéaire entre la TSM, la deuxième composante et le vecteur moyen de chaque zone (*fig. 2b*).

It appears that the **second component evolves in a similar co-linear manner to the SST of the Atlantic equatorial upwelling. The correlation coefficient is 0.60 with 37% of common variance.** According to Servain (1984), the appearance of the Atlantic equatorial upwelling is linked to the sudden strengthening of the South-East trade-winds, that is the triggering of the monsoon. Mahé and Citeau (1993) have also shown that there is a relationship between the position of the Saint-Helen anticyclone, the South-East trade-winds, and the SST. This relationship has been confirmed by Citeau and Al. (1994). Since the anticyclone is situated at the down-flow of the southern branch of the South Hadley cell, the effect of a regional factor can be seen in the relation between the SST and the second component. *Table 3* shows the linear correlation coefficients between the SST, the second component and the mean vector of each zone (*fig. 2b*).

	TSM	CP2
Zone 1	-0.24 (06 %)	0.15 (02 %)
Zone 2	-0.10 (01 %)	0.34 (12 %)
Zone 3	0.41 (16 %)	0.61 (38 %)
Zone 4	-0.03 (00 %)	0.38 (15 %)
Zone 5	-0.38 (14 %)	-0.38 (15 %)
Zone 6	-0.38 (14 %)	-0.33 (12 %)
Zone 7	0.13 (02 %)	0.43 (19 %)

★ Synthèse des deux premières composantes

Le *tableau 4* présente pour le vecteur moyen de chaque zone, le pourcentage de variance expliquée par les deux composantes principales et celui obtenu à partir des mesures de température de surface des océans à l'échelle globale et régionale.

Ainsi, l'essentiel (jusqu'à 94 %) de la variabilité interannuelle des précipitations sur les zones prédéfinies peut être décrit à partir de deux composantes :

- **Une composante d'abondance**, en relation avec la structure dipolaire interhémisphérique des températures de surface des océans en été boréal, traduisant un facteur global ;

- **Une composante de répartition**, en liaison avec les températures de surface dans le Golfe de Guinée en été boréal, représentant un **facteur régional**.

	f (CP1, CP2)	f (DTSO, TSM)
Zone 1	68 %	37 %
Zone 2	80 %	38 %
Zone 3	78 %	46 %
Zone 4	29 %	08 %
Zone 5	94 %	68 %
Zone 6	84 %	65 %
Zone 7	19 %	06 %

Par conséquent, l'abondance et la répartition interannuelle des précipitations sur la zone peuvent être approchées par des facteurs climatiques généraux et régionaux de l'été boréal. Ces résultats semblent cohérents avec les conclusions de Janicot (1990a, 1990b) et Fontaine (1989). En effet, la composante d'abondance approchée par un facteur climatique global, pourrait être associée à l'intensité de la convection au sein de la ZCIT (Zone de Convergence Inter-Tropicale) et à la dynamique atmosphérique zonale de type Walker. Tandis que la composante de répartition en bonne relation avec un facteur climatique régional pourrait être liée à la migration de la ZCIT et la dynamique atmosphérique méridienne de type Hadley au-dessus de l'Afrique.

Tableau 3 : COEFFICIENT DE CORRELATION ET, ENTRE PARENTHÈSES, POURCENTAGE DE VARIANCE EXPLIQUÉE ENTRE LA TSM, LA CP2 ET LES VECTEURS MOYENS DE CHAQUE ZONE.

CORRELATION COEFFICIENT, AND PERCENTAGE OF VARIANCE (BETWEEN BRACKETS), BETWEEN SST, CP2 AND THE MEAN VECTORS OF EACH ZONE.

★ Synthesis of the first two components

Table 4 illustrates for the mean vector of each zone, the percentage of variance explained by the two principal components and variance obtained from measurements of ocean surface temperatures on a global and regional scale.

Therefore, the main part of the interannual variability (up to 94 %) of rainfall over pre-defined zones can be described by two components :

- **An abundance component**, related to the inter-hemispheric dipolar structure of ocean surface temperatures during the southern summer, expressing a **global factor** ;

- **A distribution component**, linked to the surface temperatures in the Gulf of Guinea during a southern summer, representing a **regional factor**.

Tableau 4 : POURCENTAGE DE VARIANCE EXPLIQUÉE PAR LES DEUX COMPOSANTES PRINCIPALES ET CELUI OBTENU À PARTIR DES MESURES DE TEMPÉRATURE DE SURFACE DES Océans À L'ÉCHELLE GLOBALE ET RÉGIONALE, POUR LE VECTEUR MOYEN DE CHAQUE ZONE.

PERCENTAGE OF VARIANCE EXPLAINED BY THE TWO PRINCIPAL COMPONENTS AND THE PERCENTAGE OBTAINED FROM OCEAN SURFACE TEMPERATURE ON THE GLOBAL AND REGIONAL SCALE, FOR THE MEAN VECTOR OF EACH ZONE.

Consequently, the abundance and the interannual distribution of rainfall over the zone can be approached by the general and regional climatic factors of the southern summer. These results appear to be coherent with the conclusions of Janicot (1990a, 1990b) and Fontaine (1989). In fact, the abundant component approached by a global climatic factor, may be associated with the convection intensity within the ITZC (InterTropical Convergence Zone) and with Walker type zonal atmospheric dynamics. Whereas the distribution component in close relation with a regional climatic factor could be linked to ITCZ migration and Hadley type meridian atmospheric dynamics above Africa.

L'absence de rupture sur la deuxième composante permet d'affirmer que la sécheresse enregistrée à partir de 1970 est essentiellement de type classe 6 ou 5, c'est-à-dire qu'elle semblerait être surtout liée à un facteur climatique global affectant l'ensemble de la zone d'étude. Par conséquent, les déficits au Sahel de type classe 4 ne sont pas propres aux dernières décennies et semblent être associés à une composante de répartition en assez bonne relation avec un facteur climatique régional.

CONCLUSION

Cette étude a permis de délimiter objectivement et précisément les grandes zones climatiques en Afrique de l'ouest et centrale, dans le champ de la mousson africaine. Nous avons également pu préciser de manière objective les différents champs d'anomalies mis en évidence par Janicot (1989, 1992) et Nicholson (1986) ainsi que les années qui leur sont associées. Il est notamment apparu des situations intermédiaires et des limites dans la répartition des précipitations, plus complexes qu'elles n'avaient été décrites jusqu'à présent. L'étude des composantes principales de la variabilité interannuelle des précipitations sur l'Afrique de l'ouest et centrale et en particulier de leur relation avec les températures de surface des océans à l'échelle mondiale et régionale, semble indiquer la prédominance d'un facteur global dans le déterminisme de la sécheresse enregistrée ces dernières décennies. Enfin, cette étude a corroboré l'efficacité des vecteurs régionaux comme outil de synthèse pour caractériser les tendances pluviométriques à l'intérieur des unités climatiques et pour analyser objectivement les fluctuations spatio-temporelles des précipitations à grande échelle. Toutefois, une étude statistique complémentaire serait souhaitable pour analyser la résistance de la reconstitution par MVR des valeurs manquantes vis à vis de la dégradation de l'information initiale.

The absence of a break in the second component confirms the fact that the drought which has been recorded from 1970 onwards is mainly class 6 or 5 type, i.e. it would appear to be especially linked to a global climatic factor affecting the whole of the study zone. Consequently, class 4 type deficits in the Sahel are not specific to the last decades and appear to be associated with a distribution component fairly closely linked to a regional climatic factor.

CONCLUSION

This study has enabled large climatic zones in West and Central Africa to be objectively defined in the African monsoon field. We were also able to accurately describe in an objective manner the different anomaly fields highlighted by Janicot (1989, 1992) and Nicholson (1986) as well as their associated years. Intermediary situations in particular became clear and the limits of rainfall distribution were shown to be more complex than what was described up to now. The study of principal components and the inter-annual variability of rainfall over West and Central Africa and especially their relation with ocean surface temperatures on a global and regional scale, appears to indicate the predominance of a global factor in the determination of the drought which has been recorded these last few decades. Lastly this study has corroborated the efficiency of regional vectors as synthesis tools to characterize pluviometric trends within climatic units and to objectively analyse the spatio-temporal fluctuations of rainfall on a large scale. All the same, a complementary statistical study would be advisable to analyse restoral resistance by RVM of the missing values in relation to the degradation of the initial material.

BIBLIOGRAPHIE

- CITEAU J., CARN M., FONGANG S. & SAGNA P. (1994). – Relationships between western Africa ITCZ and St-Helena anticyclone suggested by a watch of Meteosat-MV channel. In : International Conference on Monsoon Variability and Prediction, Trieste, Italy, May 1994. WCRP-84, WMO/TD-N° 619, 93-98.
- COCHONNEAU G., HIEZ G., SECHET P. & L'HOTE Y. (1992). – MVR 1.5, Logiciel pour la critique, l'homogénéisation et la synthèse d'observations pluviométriques. Collection LOGORSTOM, Paris, 210p, 6 disq.
- DUBREUIL P., CHAPERON P., GUISCAFRE J. & HERBLAUD J. (1972). – Recueil des données de base des bassins représentatifs et expérimentaux de l'Office de la Recherche Scientifique et Technique Oûtre-Mer : Années 1951-1969. ORSTOM, Paris, 916 p.

- FOLLAND C.K., PALMER T. N & PARKER D.E. (1986). – Sahel rainfall and worldwide sea temperature 1901-1985. *Nature*, 320 : 602-607.
- FONTAINE B. (1989). – Les moussons pluvieuses dans l'espace africano-asiatique : Afrique occidentale et Inde. Thèse d'Etat, Univ. Dijon, France, 2 vol., 687 p.
- FONTAINE B., BIGOT S. (1993). – West african rainfall deficits and sea surface temperatures. *International Journal of Climatology*, vol. 13 : 271-285.
- GRIFFITHS J.F. (1972). – Climates of Africa. In : *World survey of climatology*, vol. 10. H.E. Landsberg, editor in chief. Elsevier, New-York. 604 p.
- HIEZ G (1977). – L'homogénéité des données pluviométriques. *Cah. ORSTOM, Sér. Hydrol.*, vol. XIV, n° 2 : 129-172.
- HIEZ G., RANCAN L., COSTA BARROS M. & PEDROLLO O. (1986). – Le vecteur régional et les fluctuations climatiques. In : *Climat et développement, Séminaire ORSTOM, 15-16 Oct. 1985, Paris, Ed. ORSTOM, Collection Colloques et Séminaires* : 113-122.
- HIEZ G., COCHONNEAU G., SECHET P. & FERNANDES U.M. (1992). – Application de la méthode du vecteur régional à l'analyse de la pluviométrie annuelle du bassin amazonien. *Veille Climatique Satellitaire*, n° 43 : 39-53.
- HISARD P. (1980). – Observations de réponse de type "El Niño" dans l'Atlantique tropical oriental, golfe de Guinée. *Océanologica Acta*, 3, 1 : 69-78.
- JANICOT S. (1985). – Analyse spatio-temporelle du champ de précipitations annuelles sur l'Afrique de l'ouest et l'Afrique Centrale. *Veille Climatique Satellitaire*, n°10 : 32-44.
- JANICOT S. (1989). – Deuxième partie. Article 1 : climatologie descriptive des précipitations en Afrique de l'ouest. Thèse de doctorat, Univ. Paris 6, 93 p.
- JANICOT S. (1990 a). – Variabilité des précipitations en Afrique de l'ouest et circulations quasi-stationnaires durant une phase de transition climatique. 1ère partie - Synthèse. Thèse de doctorat, Univ. Paris 6, 178 p. + annexes.
- JANICOT S. (1990 b). – Deux facteurs impliqués dans la sécheresse au Sahel. *Veille Climatique Satellitaire*, n° 32 : 24-33.
- JANICOT S. (1992). – Spatio-temporal variability of west african rainfall ; Part I : Regionalizations and typings, Part II : Associated surface air mass characteristics. *Journ. Clim.*, 5, 489-511.
- LEROUX (1980). – Le climat de l'Afrique tropicale. Dakar. Thèse d'état. Université de Dijon. 3 tomes. 1427 p.
- MAHE G. (1993). – Les écoulements fluviaux sur la façade atlantique de l'Afrique. Etude des éléments du bilan hydrique et variabilité interannuelle, analyse de situations hydroclimatiques moyennes et extrêmes. Thèse, Univ. Paris-sud-Orsay/ORSTOM, Ed ORSTOM. Coll. Etudes et Thèses, 438 p.
- MAHE G., L'HOTE Y. (1992). – Utilisation de la Méthode du Vecteur Régional pour la description des variations pluviométriques interannuelles en Afrique de l'ouest et centrale de 1951 à 1989. Huitièmes Journées Hydrologiques de l'ORSTOM, Montpellier, sept. 1992 : 14 p.
- MAHE G., CITEAU J. (1993). – Relations océan-atmosphère-continent dans l'espace africain de la mousson atlantique. Schéma général et cas particulier de 1984. *Veille Climatique Satellitaire*, n° 44 : 34-54.
- MORON V., (1992). – Variabilité spatio-temporelle des précipitations en Afrique sahélienne et guinéenne (1933-1990). *La Météorologie*, VII série : n° 43-44 : 24-31.
- MORON V., (1994). – Variabilité des précipitations en Afrique tropicale au nord de l'équateur (1933-1990) et relations avec les températures de surface océanique et la dynamique de l'atmosphère. Centre de Recherches de Climatologie, Univ. de Bourgogne, 219 p.
- NICHOLSON S. E (1986). – The spatial coherence of african rainfall anomalies : interhemispheric teleconnections. *Jour. Clim. Appl. Met.*, 25, 1365-1381.
- NICHOLSON S.E., KIM J. & HOOPINGARNER J. (1988). – Atlas of african rainfall and its interannual variability. Department of Meteorology, Florida State University, Tallahassee, Florida, USA, 237 p.
- SERVAIN J. (1984). – Réponse océanique à des actions éloignées du vent dans le golfe de Guinée en 1967-1968. *Océanologica Acta*, 7, 3 : 297-307.
- WOTLING G. (1994). – Analyse de la variabilité spatio-temporelle des précipitations annuelles liées à la mousson africaine de 1951 à 1989 - Application de la Méthode du Vecteur Régional - Mémoire de DEA National d'Hydrologie. Univ. Montpellier II/ORSTOM Montpellier. 121 p.

**SUIVI D'UN NUAGE DE POUSSIERE DU CONTINENT AFRICAIN
VERS L'OCEAN ATLANTIQUE A L'AIDE DE L'IMAGERIE
METEOSAT IR ET VISIBLE**

**MONITORING OF A DUST CLOUD FROM THE AFRICAN CONTINENT
TOWARDS THE ATLANTIC OCEAN USING INFRARED
AND METEOSAT VISIBLE IMAGERY**

Par C. N'DOUME*, M. LEGRAND**

1. INTRODUCTION

Les nuages de poussière peuvent s'étendre sur des surfaces de plusieurs millions de kilomètres carrés et évoluer au cours d'une période de quelques jours à une semaine, durant laquelle ils sont transportés par les vents sur des distances de l'ordre de quelques milliers de kilomètres. Au-delà du Sahara lui-même, la région la plus concernée par ce transport est l'Afrique subsaharienne, et plus particulièrement le Sahel (d'Almeida, 1985). La poussière y compose des paysages typiques de brume sèche, caractérisés par un trouble atmosphérique élevé et de fortes réductions de visibilité. Vers l'ouest, ces nuages de poussière se déplacent au-dessus de l'Atlantique tropical et peuvent atteindre les Antilles et le continent américain. Ainsi, Prospero et al., (1981) ont rapporté des observations d'aérosol saharien en Guyane Française. Compte tenu de sa position géographique, de la fréquence de ses observations et de l'étendue de sa couverture spatiale, le satellite Météosat est un outil idéal pour le suivi des nuages de poussière saharienne.

2. IMAGERIE METEOSAT VISIBLE ET IR

Cette étude conjugue les résultats de la technique infrarouge au-dessus du continent (Legrand et al., 1985 ; Legrand et N'doumé, 1993) et ceux de la technique développée à partir de l'imagerie Météosat "visible" au-dessus de l'océan Atlantique (Jankowiak et Tanré, 1992). Jankowiak et Tanré ont réalisé des cartes d'épaisseur optique visible des aérosols désertiques au-dessus de l'Atlantique tropical à partir de six années de données Météosat B2 visibles, de 1983 à 1988. Ces résultats ont été validés par des mesures sol (Tanré et al., 1988). Un moyen de contrôler et de valider les images différence IR sur l'Afrique consiste donc à les comparer près des côtes aux cartes d'épaisseur optique visible. Nous nous sommes intéressés à deux épisodes d'expulsion de poussière de l'Afrique vers l'océan Atlantique. Le premier s'est déroulé du 18 au 29 janvier 1984 et le second du 17 au 30 mars 1988 (Jankowiak et Tanré, 1992).

* *Météorologie d'Abidjan - 01 BP 3437 - Abidjan 01 - Côte d'Ivoire.*

** *Laboratoire d'Optique Atmosphérique, Université de Lille, 59655 Villeneuve d'Ascq.*

1. INTRODUCTION

Dust clouds can cover areas of several million square kilometres and may evolve over a period of time lasting a few days up to a week, during which winds may have blown them over a few thousand kilometres. Beyond the Sahara, the region which is the most affected by this kind of transport is Sub-Saharan Africa, in particular the Sahel (d'Almeida, 1985). The aerosols form typical dry-haze landscapes, characterized by high atmospheric perturbations and important reductions in visibility. Towards the West, these dust clouds move above the Tropical Atlantic and may reach the West Indies and the American Continent. Prospero and Al., (1981) reported observations of Saharan aerosols in French Guiana. Taking into account the geographical position of the Meteosat satellite, the frequency of its observations and the size of its spatial cover, it is an ideal tool to monitor Saharan dust clouds.

2. VISIBLE AND INFRARED METEOSAT IMAGERY

This study combines results from the infrared technique above the continent (Legrand and Al., 1985; Legrand and N'doumé, 1993) with those from visible Meteosat imagery above the Tropical Atlantic (Jankowiak and Tanré, 1992). Jankowiak and Tanré have drawn up optical thickness charts of desert aerosols above the Tropical Atlantic using visible Meteosat B2 data for a six-year period from 1983 to 1988. These results were validated by ground photometric measurements (Tanré and Al., 1988). A means of controlling and validating IR difference images over Africa consists of comparing IR difference images near the coasts with visible optical thickness charts. We were interested in two outbreaks of dust expulsion from Africa towards the Atlantic Ocean. The first one occurred between 18 to 29 January 1984 and the second one between 17 and 30 March 1988 (Jankowiak and Tanré, 1992).

3. VARIATIONS COMPAREES DU NIVEAU RADIO-METRIQUE DIFFERENCE ET DE L'EPAISSEUR OPTIQUE VISIBLE

De part et d'autre de la côte occidentale africaine, orientée sensiblement nord-sud, nous avons choisi 12 couples de cibles continent-océan. Les latitudes sont identiques pour les cibles de chaque couple. Nous avons pris un nombre assez grand de couples pour en conserver un nombre suffisant en situation non nuageuse. Nous avons retenu les couples de cibles qui présentent un minimum de 5 journées dégagées de nuages sur les 15 utilisées pour la réalisation d'une image référence IR (Legrand et al, 1985). Les positions géographiques de ces cibles sont indiquées dans le *tableau 1*.

CIBLE	LATITUDE	LONGITUDE O	LONGITUDE C
1	27.3°N	12.6°W	12.1°W
2	25.1°N	14.3°W	12.0°W
3	15.1°N	18.4°W	15.6°W
4	13.6°N	18.5°W	15.8°W
5	10.5°N	16.9°W	13.0°W

Nous présentons aux *figures 1 et 2* les évolutions comparées au cours du temps du niveau radiométrique infrarouge différence à 12:00 TU et de l'épaisseur optique visible des couples de cibles retenus pour les deux périodes étudiées (18-29 janvier 1984 et 17-30 mars 1988) à partir des observations de Météosat-2. Il faut noter l'écart entre nombres de points terrestres et océaniques. Dans le traitement au-dessus de l'océan, Jankowiak et Tanré ont éliminé les nuages puis calculé l'épaisseur optique par interpolation à partir des régions claires, au contraire du traitement au-dessus du continent où les cas nuageux ont été simplement éliminés. A cause du nombre de journées nuageuses, cette différence de traitement introduit quelques disparités entre niveau radiométrique infrarouge (sur le continent) et épaisseur optique visible (au-dessus de l'océan). Les deux séries temporelles sont assez concordantes. Au cours de l'événement de mars 1988, le niveau radiométrique infrarouge et l'épaisseur optique croissent, ce qui traduit certainement une arrivée progressive de la poussière. La tendance est plus difficile à dégager durant l'événement de janvier 1984.

3. COMPARISON OF VARIATIONS IN THE DIFFERENCE RADIOMETRIC LEVEL AND THE VISIBLE OPTICAL THICKNESS

On either side of the western African coast, roughly orientated North-South, we chose 12 continent-ocean target pairs. The latitudes were the same for the targets of each pair. We chose a fairly large number of target pairs in order to have a sufficient number in a cloud-free situation. We selected target pairs which presented at least 5 cloud-free days out of the 15 used to draw up an IR reference image (Legrand and Al., 1985). The geographical positions of these targets are shown in *table 1*.

Tableau 1 : COORDONNÉES GÉOGRAPHIQUES DES COUPLES DE CIBLES EN DEGRÉS DÉCIMAUX (O : OCÉAN ; C : CONTINENT).

GEOGRAPHIC CO-ORDINATES OF TARGET PAIRS EXPRESSED IN DECIMAL DEGREES (O : OCEAN ; C : CONTINENT).

Figures 1 and 2 illustrate the compared developments of the difference infrared radiometric level at 12:00H UT and the visible optical thickness of selected target pairs with time, for the two study periods (18-29 January, 1984 and 17-30 March, 1988) using Meteosat-2 observations. The difference between numerous of continental and oceanic points must be noted. Jankowiak and Tanré eliminated clouds during the processing above the ocean then computed the optical thickness by interpolation using cloud-free regions, contrary to the processing above the continent where cloudy cases were simply eliminated. Due to the number of cloudy days, this difference in the processings introduced a few disparities between the infrared radiometric level (over the continent) and the visible optical thickness (over the ocean). The two temporal series are fairly concordant. During the outbreak in March 1988, the infrared radiometric level and the optical thickness increase, which must indicate the progressive arrival of dust. In January 1984, the trend was more difficult to isolate.

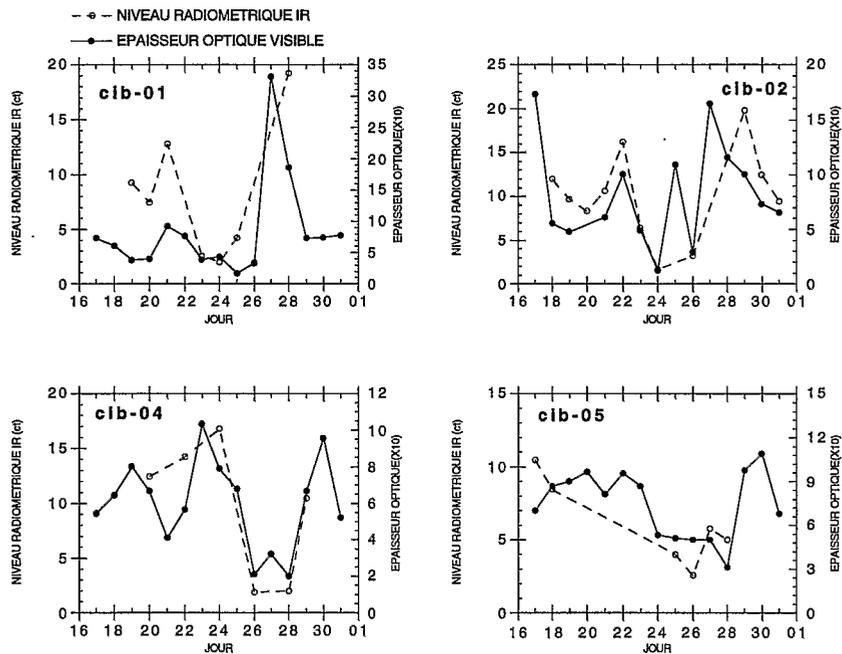


Figure 1 : COURBES D'EVOLUTION DU NIVEAU RADIOMETRIQUE INFRAROUGE (TERRE) ET DE L'ÉPAISSEUR OPTIQUE VISIBLE (OCEAN) PENDANT UN ÉVÉNEMENT DE JANVIER 1984.
 CURVES SHOWING THE EVOLUTION OF THE INFRARED RADIOMETRIC LEVEL (LAND) AND THE VISIBLE OPTICAL THICKNESS (OCEAN) DURING THE OUTBREAK IN JANUARY 1984.

4. COEFFICIENT SATELLITAIRE DE SENSIBILITE A LA POUSSIÈRE

Nous avons cherché à déterminer expérimentalement à partir des couples de paramètres (différence radiométrique infrarouge et épaisseur optique visible), les valeurs du coefficient de sensibilité satellitaire IR à la poussière β , rapport des variations

4. SATELLITE COEFFICIENT OF SENSITIVITY TO DUST

We have tried to define in an experimental manner, from pairs of parameters (infrared radiometric difference, and visible optical thickness), the values of the coefficient of IR satellite sensitivity to dust β , in relation to the corresponding variations of the IR

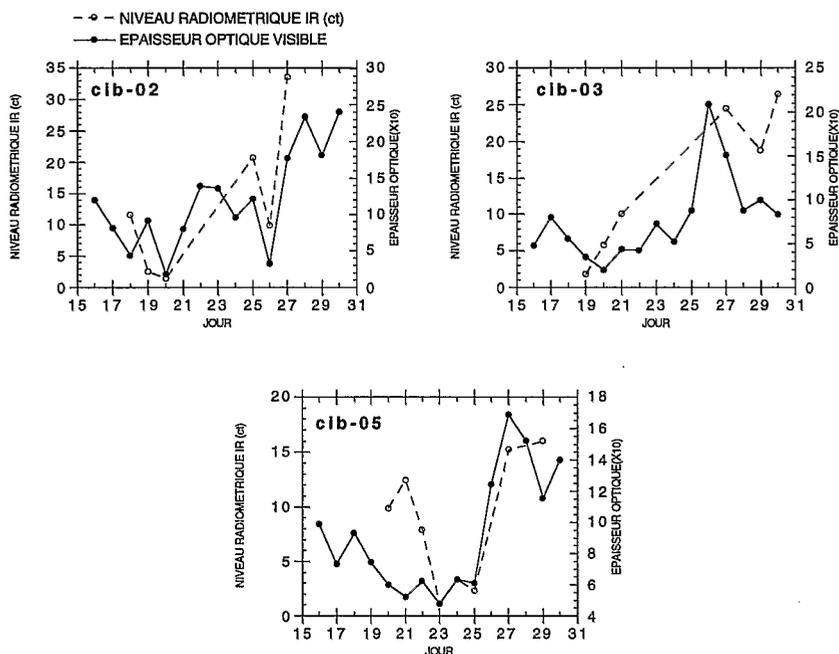


Figure 2 : COURBES D'EVOLUTION DU NIVEAU RADIOMETRIQUE INFRAROUGE (TERRE) ET DE L'ÉPAISSEUR OPTIQUE VISIBLE (OCEAN) PENDANT UN ÉVÉNEMENT DE MARS 1988.
 CURVES SHOWING THE EVOLUTION OF THE INFRARED RADIOMETRIC LEVEL (LAND) AND THE VISIBLE OPTICAL THICKNESS (OCEAN) DURING THE OUTBREAK IN MARCH 1988.

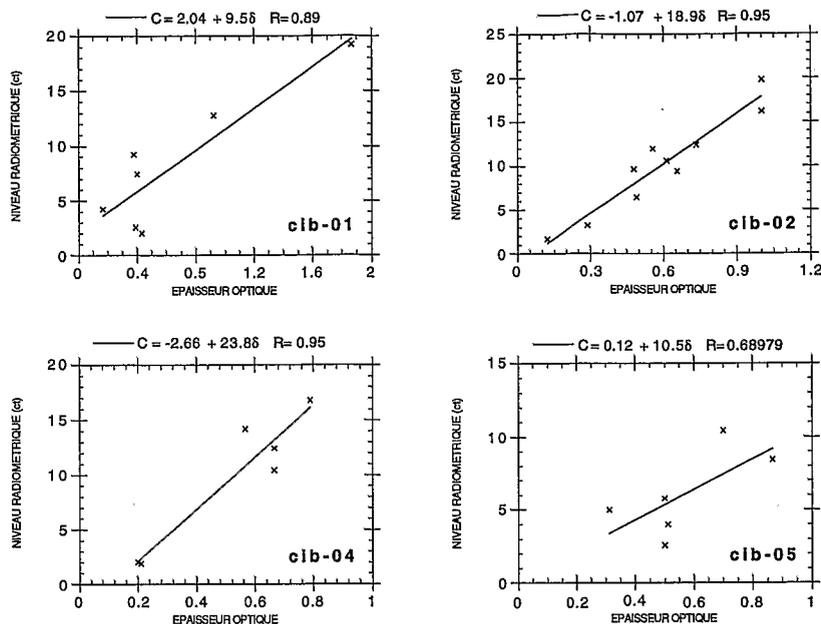


Figure 3 : DROITES DE REGRESSION DU NIVEAU RADIOMETRIQUE INFRAROUGE DIFFERENCE C DES CIBLES CONTINENTALES, EN FONCTION DE L'ÉPAISSEUR OPTIQUE VISIBLE δ (EXTRAITES DES DONNÉES METEOSAT VISIBLE) POUR DES CIBLES OCEANIQUE APPARIEES : UN EVENEMENT DE JANVIER 1984. REGRESSION LINES OF THE DIFFERENCE INFRARED RADIOMETRIC LEVEL C OF CONTINENTAL TARGETS, AS A FUNCTION OF VISIBLE OPTICAL THICKNESS δ (FROM METEOSAT VISIBLE DATA) FOR PAIRED OCEAN TARGETS ; OUTBREAK IN JANUARY 1984.

correspondantes de la réponse radiométrique IR et de l'épaisseur optique. Pour cela nous avons réalisé les régressions linéaires entre différence infrarouge des cibles continentales et épaisseur optique visible des cibles océaniques correspondantes (fig. 3 et 4). La dispersion des points est élevée, ce qui résulte de plusieurs raisons. L'incertitude sur l'épaisseur

radiometric response and the optical thickness. In order to achieve this, we carried out linear regressions between infrared difference of continental targets and visible optical thickness of the corresponding oceanic targets (figs. 3 and 4). Scattering of the points was high, which was due to several reasons. The uncertainty about the optical thickness of points relative to

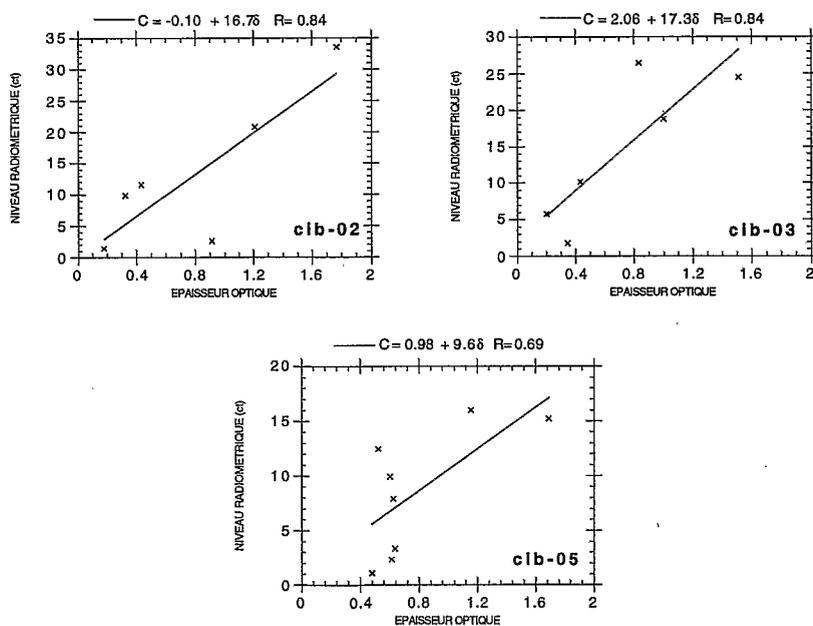


Figure 4 : DROITES DE REGRESSION DU NIVEAU RADIOMETRIQUE INFRAROUGE DIFFERENCE C DES CIBLES CONTINENTALES, EN FONCTION DE L'ÉPAISSEUR OPTIQUE VISIBLE δ (EXTRAITES DES DONNÉES METEOSAT VISIBLE) POUR DES CIBLES OCEANIQUE APPARIEES : UN EVENEMENT DE MARS 1988. REGRESSION LINES OF THE DIFFERENCE INFRARED RADIOMETRIC LEVEL C OF CONTINENTAL TARGETS, AS A FUNCTION OF VISIBLE OPTICAL THICKNESS δ (FROM METEOSAT VISIBLE DATA) FOR PAIRED OCEAN TARGETS ; OUTBREAK IN MARCH 1988.

CIBLE	Janvier 1984	Mars 1988
1	9.5	-
2	18.9	16.7
3	-	17.3
4	23.8	-
5	10.5	9.6

optique des points relatifs à mars 1988, issue de la comparaison avec des mesures photométriques sol, est de 0.25 en écart-type (Jankowiak et Tanré, 1992). L'incertitude due à la sensibilité de la mesure du canal IR à la vapeur d'eau est susceptible d'entraîner des écarts importants sur cette mesure, particulièrement lorsque les variations d'humidité sont fortes ce qui est le cas sur la région maritime étudiée (Tanré et Legrand, 1991 ; N'doumé et Legrand, 1995) – 5 à 10 comptes numériques sont envisageables. Enfin la distance entre les cibles appariées, qui atteint plusieurs centaines de kilomètres, peut s'accompagner d'écarts non négligeables des quantités d'aérosol mesurées. Nous avons en conséquence imposé une valeur de 0.6 comme minimum du coefficient de corrélation, ceci afin d'obtenir des valeurs de β assez significatives. Nous avons reporté dans le *tableau 2* les valeurs de β ainsi obtenues.

Le coefficient β varie dans un rapport 2 selon la cible. La dispersion des points des *figures 3 et 4*, quelle que soit son origine, jointe au faible nombre de points, s'accompagne d'incertitudes sur les valeurs obtenues. Cependant les écarts entre les valeurs expriment certainement aussi des différences objectives, en particulier concernant des propriétés différentes des surfaces (émissivité et albedo). On n'observe pas de variation importante dans les valeurs de β sur le même couple de cibles entre janvier 1984 et mars 1988 (mais nous n'avons étudié que deux périodes pour lesquelles nous n'avons pu comparer que deux couples de cibles, ce qui interdit tout jugement définitif). Les valeurs obtenues sont du même ordre de grandeur que celles déjà publiées (voir récapitulatif dans N'doumé, 1993).

5. VISUALISATION DES NUAGES DE POUSSIÈRE

Nous avons créé une image composite, différence infrarouge au-dessus de l'Afrique et épaisseur optique visible au-dessus de l'Océan Atlantique (*fig. 5*). Une correspondance entre les deux parties de l'image a été établie de façon à obtenir la meilleure continuité des couleurs le long de la côte. Cette correspondance est pratiquement une relation de proportionnalité avec un facteur de 24 comptes numériques entre les deux paramètres différence infrarouge et épaisseur optique visible. L'accord observé est globalement satisfaisant, avec des différences de détail. La cohérence des structures océaniques et

Tableau 2 : VALEURS EXPÉRIMENTALES DU COEFFICIENT β DE SENSIBILITÉ À LA POUSSIÈRE.

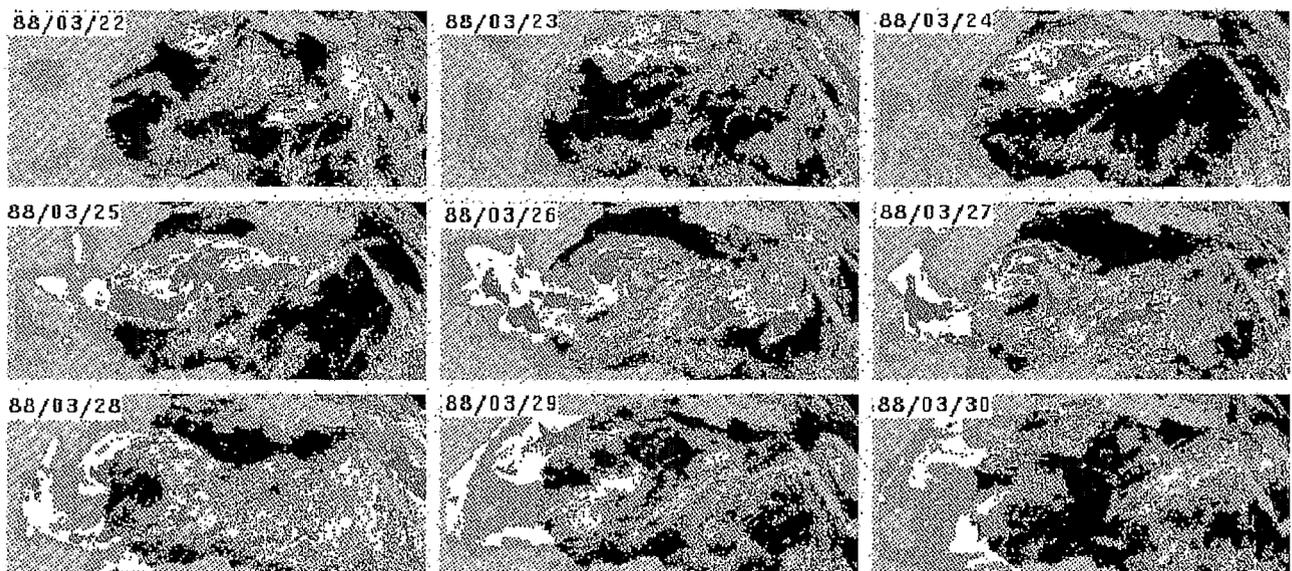
EXPERIMENTAL VALUES OF SENSITIVITY COEFFICIENT β TO DUST.

March 1988, stemming from the comparison of ground photometric measurements, is 0.25 as a standard deviation (Jankowiak and Tanré, 1992). The uncertainty about the sensitivity of the measure of the IR channel to water vapour may lead to important deviations in this measurement, especially when variations in humidity are great which is the case in the studied maritime region (Tanré and Legrand, 1991 ; N'doumé and Legrand, 1995) – 5 to 10 numerical counts are possible. Lastly, the distance between the matched pairs, which is several hundred kilometers, may be accompanied by non-negligible quantities of measured aerosols. Therefore, the correlation coefficient R was allocated a minimum value of 0.6 in order to obtain fairly significant values of β . The values of β which were so obtained are shown in *table 2*.

The coefficient β varied in a ratio 2 according to the target. The scattering of the points in figures 3 and 4, whatever their origin, coupled with the low number of points, goes with uncertainties about the values obtained. However, the deviations between the values must also express the objectives differences, especially the different properties of surfaces (emissivity and albedo). No important variation could be seen in the values of β on the same target pairs between January 1984 and March 1988 (but we only studied two periods for which we were only able to compare two pairs of targets, which prevents any definitive judgement from being reached). The obtained values were in the same range as those already published (see summary in N'doumé, 1993).

5. VISUALISATION OF DUST CLOUDS

We have created a composite image, infrared difference above Africa and the visible optical thickness above the Atlantic Ocean (*figure 5*). A correspondence between the two parts of the image was established to provide the best continuity for the colours along the coast. This correspondence is almost a proportionality relationship with a factor of 24 numerical counts between both the infrared difference and visible optical thickness parameters. The observed concordance is globally satisfactory, with differences in detail. The coherence of oceanic and continental structures over their common limit is a good indication



ocean. continent

≥ 1.5  ≥ 36

$[1, 1.5[$ $[26-36[$

$[0.5, 1[$  $[12-26[$

 $[0, 0.5[$ $[0-12[$ 

Figure 5: EVOLUTION TEMPORELLE D'UN EVENEMENT DE POUSSIERES AU DESSUS DU CONTINENT AFRICAIN (IMAGE DIFFERENCE INFRAROUGE) ET DE L'OCEAN ATLANTIQUE (EPAISSEUR OPTIQUE VISIBLE) EN MARS 1988. LE CODE COULEUR "CONTINENT" EST DEFINI EN COMPTES RADIOMETRIQUES.

TEMPORAL EVOLUTION OF A DUST OUTBREAK ABOVE THE AFRICAN CONTINENT (INFRARED DIFFERENCE IMAGE) AND OF THE ATLANTIC OCEAN (VISIBLE OPTICAL THICKNESS) IN MARCH 1988. THE "CONTINENT" COLOUR CODE IS DEFINED IN RADIOMETRIC COUNTS.

continentales sur leur limite commune est une indication de la confiance que l'on peut accorder aux "produits poussière" obtenus par l'une ou l'autre des techniques, et particulièrement à la différence infrarouge.

La figure 5 montre l'évolution terre-océan d'un nuage de poussière au cours de l'événement de mars 1988. Cet événement semble prendre naissance au-dessus de l'Afrique du Nord (Algérie et Tunisie) le 22 Mars. Puis le nuage s'étend progressivement les 23 et 24 mars vers le sud de l'Algérie et la Mauritanie. L'expulsion du nuage de poussière vers l'océan Atlantique débute le 25 et est très marquée les 26 et 27 mars, époque à laquelle la poussière recouvre la grande majorité du Sahara. La présence probable d'un anticyclone (certainement celui des Açores), autour duquel le mouvement d'enroulement des poussières dans le sens rétrograde est particulière-

of the confidence which may be given to "dust products" obtained by either one or the other techniques and in particular to the infrared difference.

Figure 5 shows the continent-ocean development of a dust cloud during the outbreak in March 1988. This outbreak seemed to originate in Northern Africa (Algeria and Tunisia) on 22 March. Then, gradually the cloud spread towards southern Algeria and Mauritania on 23 and 24 March. The expulsion of the dust cloud towards the Atlantic Ocean began on 25 and was very marked on 26 and 27 March, when the dust covered most of the Sahara. The likely presence of an anti-cyclone (certainly the Azores one) around which the anti-clockwise winding movement of dusts was especially clear on the 27, 28 and 29 of March, led to returns of dust from the ocean towards the Moroccan

ment évident les 27, 28 et 29 mars, entraîne des retours de poussière de l'océan vers les côtes du Maroc. La partie centrale de l'anticyclone est visualisée en négatif par l'absence de poussière (en bleu sur les images).

6. CONCLUSION

Cette étude valide la méthode infrarouge de télédétection des aérosols désertiques au-dessus de l'Afrique à partir de la technique d'extraction de leur épaisseur optique visible au-dessus de l'océan (dans une certaine mesure on peut parler d'intervalidation). Ces deux traitements utilisant les données Météosat, respectivement dans les canaux IR et "Visible", nous offrent diverses possibilités. Ils nous permettent d'envisager le suivi du transport des nuages de poussière dans leur déplacement au-dessus de l'Afrique et des surfaces océaniques voisines. Ils nous ont permis de tester la relation entre niveaux radiométriques différence IR et aux épaisseurs optiques (deux produits satellitaires Météosat). Cependant, ce test a montré que pour traiter avec une précision satisfaisante la question de la correspondance entre les deux paramètres, des informations supplémentaires étaient nécessaires. Des données de la vapeur d'eau atmosphérique apparaissent indispensables. Une meilleure résolution spatiale, qu'on peut atteindre avec des images pleine résolution permettrait de rapprocher les points de comparaison sur terre et sur mer.

coast. The central part of the anti-cyclone can be recognized by the absence of dust (blue on the images).

6. CONCLUSION

This study validates the infrared method of remote sensing of desert aerosols above Africa by the extraction of their visible optical thickness above the ocean (in a certain manner one can speak of intervalidation). Both these processing techniques using Meteosat data, in the IR and Visible channels respectively, offer various possibilities. They enable the transport of dust clouds above the African continent and neighbouring ocean surfaces to be monitored. They have enabled us to test the relationship between the IR difference radiometric levels and optical thicknesses (both Meteosat satellite products). However, this test has shown that in order to accurately deal with the question of correspondence between both parameters, complementary information was necessary. Values of atmospheric water vapour appear to be indispensable. A better spatial resolution, than one can obtain with full resolution images, would enable land and sea comparison points to be brought nearer together.

BIBLIOGRAPHIE

- D'ALMEIDA G.A., 1985. – Report on the study of transport of Sahelian particulate matter using sunphotometer observations. *WMTO/TD-45, WMO*, 32 pp.
- JANKOWIAK I. et TANRE D., 1992. – Satellite climatology of Saharian dust outbreaks : Method and preliminary results. *J. Climate*, 6, 646-656.
- LEGRAND M., BERTRAND J.J. et DESBOIS M., 1985. – Dust clouds over West Africa : A characterization by satellite data. *Ann. Geophys.*, 3, 777-784.
- LEGRAND M. et N'DOUME C., 1993. – Tracking the dust clouds over Africa by means of the Meteosat thermal IR imagery. *A. Deepak Publishing. IRS'92 : Current problems in Atmospheric Radiation*, 342-344.
- N'DOUME C., 1993. – Traitement de l'imagerie Météosat IR pour l'observation des aérosols désertiques au dessus de l'Afrique : Optimisation, Validation et Application à l'établissement des distributions spatio-temporelles. *Thèse d'Université n°1151, Université des Sciences et Technologies de Lille*, 137 pp.
- PROSPERO J.M., GLACCUM R.A. et NESS R.T., 1981. – Atmospheric transport of soil dust from Africa to South America. *Nature*, 289, 570-572.
- TANRE D., DEVAUX C., HERMAN M., SANTER R. et GAC J.Y., 1988. – Radiative properties of desert aerosols by optical ground-based measurements at solar wavelengths. *J. Geophys. Res.*, 93, 15955-15964.