

**RELATIONS OCEAN - ATMOSPHERE - CONTINENT  
DANS L'ESPACE AFRICAIN DE LA MOUSSON ATLANTIQUE  
SCHEMA GENERAL ET CAS PARTICULIER DE 1984**

**INTERACTIONS BETWEEN THE OCEAN, ATMOSPHERE AND CONTINENT  
IN AFRICA, RELATED TO THE ATLANTIC MONSOON FLOW  
GENERAL PATTERN AND THE 1984 CASE STUDY**

par Gil MAHE \* et Jean CITEAU \*\*

**RESUME**

Du Sénégal à l'Angola, en Afrique de l'ouest et centrale sous l'influence du flux de mousson atlantique, on analyse la variabilité spatio-temporelle des pluies de 1951 à 1989. On cherche ensuite à établir des relations entre cette variabilité au sol et les variations de paramètres océanique (Températures de Surface Marines - TSM) et atmosphériques (vents et vapeur d'eau), sur une période d'étude commune de 1980 à 1987. La diminution des pluies est très forte depuis 1970 dans les régions soudano-sahéliennes et les versants au vent des monts de Guinée, et plus généralement dans toute l'Afrique de l'ouest, et s'est renforcée depuis 1980. Le déficit diminue en direction de l'équateur, pour n'être presque plus sensible en moyenne interannuelle dans le sud du Gabon et du Congo. Par l'analyse des paramètres climatiques pendant la saison des pluies au Sahel de juillet à septembre, on peut relier à un déficit (excédent) de pluie au Sahel, un AEJ (Jet d'Est Africain) plus rapide (lent), un TEJ (Jet d'Est Tropical) plus faible (fort), une quantité de vapeur d'eau plus faible (forte) dans l'AEJ, une anomalie (négative) de TSM dans l'upwelling équatorial, et une position plus occidentale (orientale) du centre de l'anticyclone de Sainte-Hélène. Mais l'analyse des données pluviométriques, atmosphériques et océaniques ne permet pas d'établir de schéma de circulation fiable pour toutes les situations si l'on ne considère que des moyennes annuelles ou même saisonnières. Un exemple d'analyse des variations mensuelles ou bimensuelles des paramètres en 1984, met en évidence le rôle important de la position de l'anticyclone de Sainte-Hélène sur les variations de qualité du flux de mousson, et autorise une meilleure compréhension de la variabilité spatio-temporelle des interactions entre océan, continent et atmosphère.

**Mots-clés :** Afrique - Flux de mousson - Variations climatiques - Précipitations - Upwelling équatorial atlantique - Vapeur d'eau troposphérique - Jets.

\* ORSTOM, BP 5045, 34032 Montpellier cedex 1, France

\*\* ORSTOM, BP 1386, Dakar, Sénégal

**ABSTRACT**

This study has taken place in the Atlantic monsoon flow regions from Senegal to Angola, in West and Central Africa. Firstly, the spatio-temporal variability of precipitations from 1951 to 1989 was analysed. Then, we tried to establish relations between this ground variability and variations in oceanic (Sea Surface Temperature - SST) and atmospheric parameters (wind and water vapour), from 1980 to 1987. There has been a great reduction in rainfall since 1970 in Sahelian areas and in the whole of West Africa, west of the Guinean Mounts. This trend has been strongly re-enforced since 1980. The drought severity decreased towards the Equator, and is hardly noticeable when expressed as an interannual average in southern Gabon and the Congo. By analysing climatic parameters in Sahel during the rainy season (July to September), the following patterns can be seen : during a dry ("wet") year in Sahel one can observe a stronger (weaker) AEJ (African Easterly Jet), a weaker (stronger) TEJ (Tropical Easterly Jet), less (more) water vapour in the AEJ, a positive (negative) SST anomaly in the Equatorial Atlantic upwelling, and a more western (eastern) position of the Saint-Helena high pressure centre. However, the analysis of pluviometric, atmospheric and oceanic data based only on annual or just seasonal averages, does not enable a circulation schema to be drawn up which would be reliable for all the climatic situations encountered in Sahel. An example of the analysis of monthly or fortnightly variations in the parameters in 1984, highlights the influence of the position of the Saint-Helena anticyclone on the qualitative variations of the monsoon flow. This leads to a better understanding of the spatio-temporal variability of interactions between the ocean, continent and the atmosphere.

**Key-words :** Africa - Monsoon flow - Climatic variations - Precipitations - Equatorial Atlantic upwelling - Tropospheric water vapour - Jets.

## 1. INTRODUCTION

Cette communication est une contribution pluridisciplinaire à une meilleure connaissance des relations qui existent entre les variations des différents paramètres atmosphériques et océaniques et les disparités spatio-temporelles de répartition des pluies (et par là des écoulements) dans l'espace de la mousson atlantique africaine, et plus particulièrement du Sénégal à l'Angola.

Le travail est divisé en deux parties. Dans la première on analyse les grandes variations annuelles et interannuelles de pluies dans tous les Etats d'Afrique de l'ouest et centrale soumis au flux de mousson. Les variations interannuelles de pluies, et surtout leurs disparités régionales, sont la base fondamentale du volet climatologie. On met ainsi en évidence plusieurs grands domaines climatiques à partir des types de variations interannuelles. Dans la seconde partie on va focaliser l'étude sur le domaine sahélo-soudanien, et donc centrer notre approche sur les trois mois de pluie principaux, soit juillet, août et septembre. Le but du second volet est d'arriver à trouver des variations cohérentes et concomitantes de plusieurs variables atmosphériques et océaniques avec les observations au sol des variations spatio-temporelles de pluie. On va étudier plus particulièrement les TSM (Températures de Surface Marines) en Atlantique équatorial, et des analyses du Centre Hadley (Centre Européen de Prévision Météorologique à Moyen Terme – CEPMMT – de Reading, Royaume-Uni) concernant le vent et la vapeur d'eau. Ces analyses ne sont disponibles que depuis 1980, ce qui limite la période d'étude commune à l'intervalle 1980-1987.

On présente enfin les résultats de l'analyse de la situation hydrométéorologique au Niger en juillet et août 1984, avec des données de pluies mensuelles. Ces résultats nous permettent d'introduire l'idée d'une relation entre les variations climatiques en Afrique de l'ouest et la position en longitude du centre de l'anticyclone de Sainte-Hélène.

## 2. VARIABILITE DES PLUIES EN AFRIQUE DE L'OUEST ET CENTRALE DE 1951 A 1989

L'analyse des longues séries pluviométriques et hydrométriques a toujours été à la base de la description des variations climatiques. La persistance du déficit pluviométrique en Afrique de l'ouest depuis environ 20 ans a été abondamment décrite à partir de ces données au sol. On citera par exemple les travaux de Sircoulon (1976, 1986, 1990), Nicholson (1981), Olivry (1983), Dosseur (1984), Lamb (1985), Nicholson et al. (1988) ou Janicot (1990-1992) entre autres. A travers ces différentes études est apparue de plus en plus nette la nécessité de régionaliser les approches en définissant des unités climatiques regroupant des postes d'observation soumis à des conditions climatiques interannuelles proches.

## 1. INTRODUCTION

The aim of this paper is to provide, through a multidisciplinary contribution, a better understanding of the relations which exist between the variations in different atmospheric and oceanic parameters, spatio-temporal differences in rainfall distribution (and therefore runoffs) in the African Atlantic monsoon area, especially from Senegal to Angola.

This paper is divided into two parts. Firstly, the large annual and interannual variations of rainfall are studied in all the states of West and Central Africa which are subjected to the monsoon flow. The interannual variations and above all, the regional differences in rainfall, are the basis of climatology. Therefore, the types of interannual variations reveal several great climatic areas. The second part of the paper deals with the Sahelian-Sudanese region and therefore will focus on the three most rainy months, that is July, August and September. The aim here is to find coherent and concomitant variations of several atmospheric and oceanic variables, with ground observations of spatio-temporal variations in rainfall. In particular, the Sea Surface Temperatures (SST) in the equatorial Atlantic will be studied, and the analyses carried out by the ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasting at Reading, UK) concerning wind and water vapour will be used. These analyses have only become available since 1980, and so the common study period is limited to 1980-1987.

The recent drought years in Sahel have led to many studies being carried out, and which have, among other things, enabled meteorological and climatological mechanisms in West Africa to be better understood. During these years of research, some authors have succeeded in defining parameters, often atmospheric ones, related to the upper wind field, varying concomitantly with rainfall variations. The SST and water-vapour variations have also been studied, the monsoon flow taking up humidity as it passed above the equatorial Atlantic waters. In the following pages, a few elements situating our present level of understanding for each parameter will be presented, in relation to the variations of rainfall in the Sahel. Finally, the results of the analysis of the hydrometeorological situation in Niger, during July and August 1984 are presented, with monthly rainfall data. These results suggest a relation between the climatic variations in West Africa and the longitudinal position of the centre of subsidence linked to the Saint-Helena anticyclone.

## 2. VARIABILITY OF RAINFALL IN WEST AND CENTRAL AFRICA FROM 1951 TO 1989

The analysis of long pluviometric and hydrometric series has always been the basis of the description of climatic variations. The persistence of a pluviometric deficit for the last 20 years in West Africa has been lengthily described from these ground data. For example, the studies carried out by Sircoulon (1976, 1986, 1990), Nicholson (1981), Olivry (1983), Dosseur (1984), Lamb (1985), Nicholson and Al. (1988) or

## A. Origine des données

Les données proviennent de 22 Etats depuis le Sénégal jusqu'à l'Angola (*fig. 1*). Toute l'information journalière des postes répertoriés par l'ORSTOM est utilisée pour les Etats suivants : Sénégal, Gambie, Mali, Côte d'Ivoire, Burkina Faso, Togo, Bénin, Niger, Cameroun, Centrafrique, Congo, Gabon et Tchad. Pour le Zaïre, l'Angola, le Nigéria, le Ghana, le Libéria, la Sierra Leone, la Guinée Bisseau et la Guinée Equatoriale, on utilise dans la mesure du possible des informations mensuelles. Les compléments ont été obtenus des Services Météorologiques Nationaux.

Janicot (1990, 1992) can be quoted among others. These different studies have shown more and more clearly, the necessity to regionalize the approaches by defining climatic units, grouping together observation stations subjects to similar interannual climatic conditions.

## A. Source of data

Data was collected 22 African States, from Senegal up to Angola (*fig. 1*). All the data provided on a daily basis from the stations indexed by Orstom was used for the following states : Senegal, Gambia, Mali, Ivory Coast, Burkina Faso, Togo, Benin, Niger, the Cameroons, Central African Republic, Congo, Gabon and Chad. When possible, monthly data was used for Zaïre, Angola, Nigeria, Ghana, Liberia, Sierra Leone, Guinea-Bissau and Equatorial Guinea. Complementary data was provided by the National Meteorological Departments.

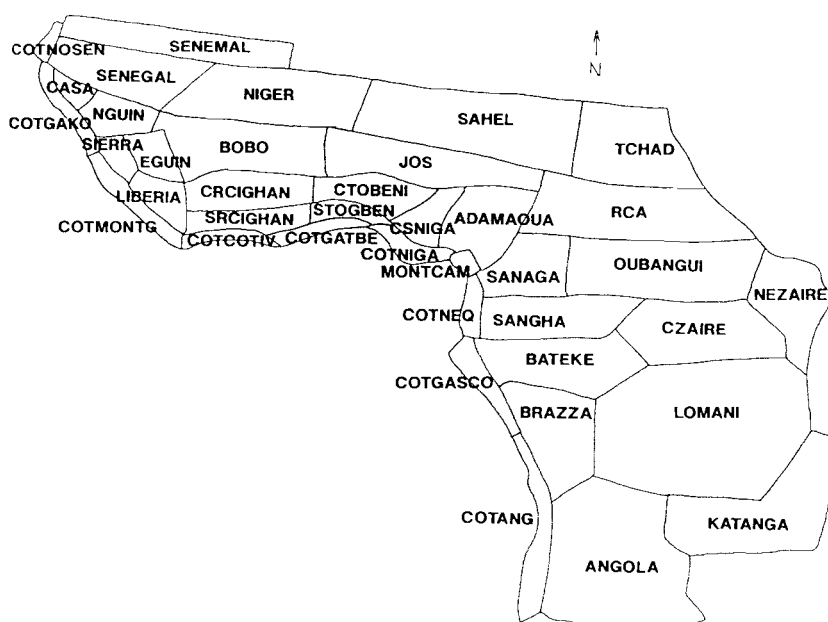


Figure 1 : LES 39 UNITÉS CLIMATIQUES DÉFINIES POUR L'HOMOGENÉISATION DES PLUIES PAR LA MÉTHODE DU VECTEUR RÉGIONAL (MVR) (A), RESITUÉES PAR RAPPORT AUX FRONTIÈRES POLITIQUES (B).

Figure 1 : THE 39 CLIMATIC UNITS DEFINED FOR THE HOMOGENIZATION OF PRECIPITATIONS BY THE REGIONAL VECTOR METHOD (RVM) (A), RESTITUTED WITH THE POLITICAL FRONTIER (B)

## B. Traitement des données

Les données de précipitation ont été homogénéisées à l'aide d'une méthode d'analyse automatique développée à l'ORSTOM appelée la Méthode du Vecteur Régional (MVR) (Hiez, 1977 ; L'Hôte, 1990 ; Cochonneau et al., 1991). Les détails de l'analyse se trouvent dans Mahé et L'Hôte (1992). On peut rappeler que l'utilisation de cette méthode nécessite la délimitation de zones morpho-climatiques homogènes. Sur la *figure 1* sont représentées les limites des unités climatiques utilisées et sur la *figure 2* le nombre de stations utilisées dans chaque unité pour calculer les vecteurs régionaux. La définition d'un vecteur régional, support de l'information régionale moyenne la plus probable, permet la reconstitution des valeurs annuelles manquantes des postes à série d'observations incomplètes.

## B. Data processing

Rainfall data was homogenized with the help of an automatic analysis method developed by Orstom entitled the Regional Vector Method (RVM) (Hiez, 1977 ; L'Hôte, 1990 ; Cochonneau and AL., 1991). Details of the analysis are found in Mahé and L'Hôte (1992) and Mahé (1992). It must be remembered that this method requires homogeneous morpho-climatic zones to be delimited. *Figure 1* shows the boundaries of the climatic units used and *figure 2* shows the number of stations used in each unit, in order to compute the regional vectors. The definition of a regional vector, the basis of the most probable mean regional data, enable the missing values to be reconstructed from stations with incomplete series of observations.

La qualité de la reconstitution des pluies annuelles manquantes dépend donc essentiellement, de la qualité des données existantes bien sûr, mais en grande partie également de la significativité climatique des unités géographiques à l'intérieur desquelles on va procéder à l'homogénéisation entre les stations. Le nombre d'années-stations observées est de 23.571 (66,6 %) ; il est de 35.411 après reconstitution (96,6 %), pour un maximum de 36.543.

Therefore, the quality of the reconstruction of missing annual rainfall data, of course is greatly dependent upon the quality of existing data but is also, to a great extent, dependent upon the climatic significance of the geographic units within which the homogenization between stations will be made. The number of station-years observed is 23.571 (66.6 %) ; it is 35.411 after reconstruction (96.6%), for a maximum of 36.543.

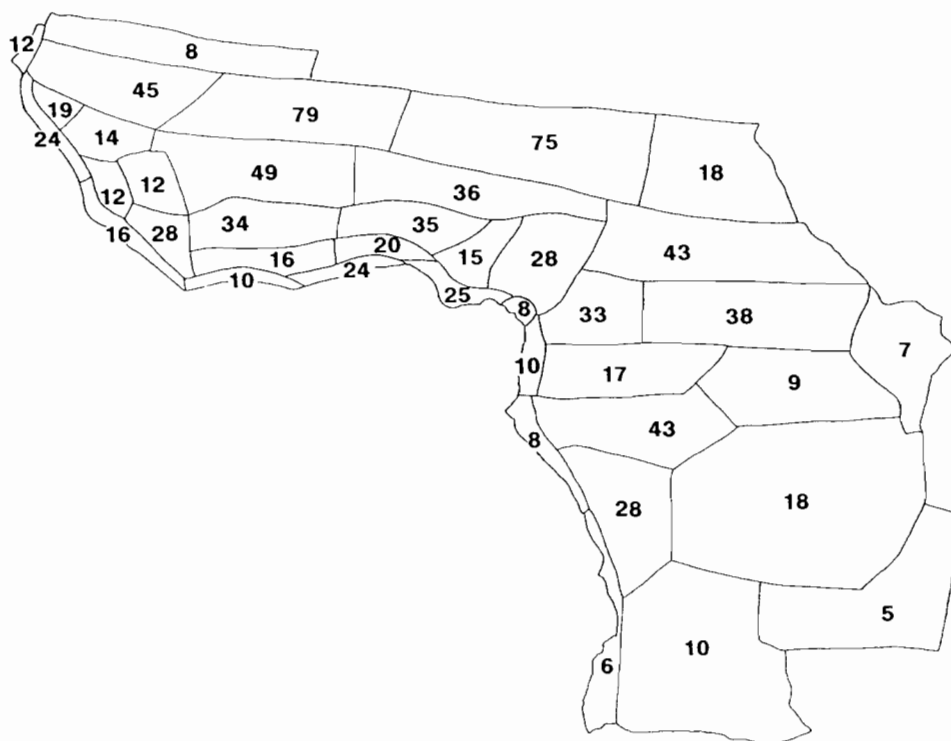


Figure 2 : NOMBRES DE POSTES D'OBSERVATIONS PLUVIOMÉTRIQUES PAR UNITÉS CLIMATIQUES.  
Figure 2 : NUMBERS OF RAINFALL OBSERVATION STATIONS PER CLIMATIC UNITS.

### C. Variabilité des pluies de 1951 à 1989 (fig. 3)

Sur la *figure 3* sont représentées les courbes lissées sur cinq années des pluies annuelles moyennes régionales dans les unités climatiques définies précédemment. Aux décennies 1950 et 1960 relativement pluvieuses à peu près partout, succède une période de déficit plus ou moins intense selon les régions. La diminution des pluies et des écoulements depuis 1970 environ est très forte dans les régions soudano-sahéliennes et les versants au vent des monts de Guinée, mais c'est plus généralement toute l'Afrique de l'ouest, à l'ouest des reliefs de l'Atakora, qui subit un déficit important. Le déficit diminue en direction de l'équateur (il est minimum, voire imperceptible dans le sud du Gabon et du Congo), mais également de l'ouest vers l'est, les monts camerounais jouant un grand rôle sur la régulation de la variabilité interannuelle des précipitations des régions sous le vent. On remarque également que dans la bande sahélienne l'amplitude des variations interannuelles a tendance à être plus forte à l'ouest (Sénégal) qu'à l'est (Tchad).

### C. Rainfall variability from 1951 to 1989 (fig. 3)

*Figure 3* shows the smoothed curves of five years of regional mean annual rainfall, in the previously defined climatic units. The 1950's and 1960's, which were rather wet years everywhere, were followed by a period which lacked rain, the severity of the deficit varied according to the regions. The reduction in rainfall and runoffs since about 1970, was very marked in the Sudanese-Sahelian regions, and on the windward slopes of the Guinea Mounts, but more generally, the whole of West Africa, west of the Atakora mounts was affected by a considerable deficit. The deficit decreased towards the Equator (it reached a minimum, even imperceptible, in southern Gabon and the Congo), but also from the west towards the east, the Cameroon Mounts playing an important role in the regulation of the interannual variability of rainfall in leeward regions. Also, in the Sahelian belt, it can be seen that the range of the interannual variations tends to be higher in the west (Senegal) than in the east (Chad).

Enfin, l'est de la Centrafrique, la presque totalité du Zaïre et l'est et le sud de l'Angola sont sous influence parfois prépondérante de flux de basses couches en provenance de l'océan Indien ou d'Afrique australe, qui sont à l'origine de variations interannuelles de pluies un peu différentes de celles observées en Afrique de l'ouest, ou même centrale mais côtière.

Le déficit enregistré durant les années 1970 s'est accentué durant les années 1980, malgré un retour en 1988 et 1989 à des pluviosités plus proches de la moyenne en Afrique de l'ouest.

Finally, the east of the Central African Republic, almost the whole of Zaire and eastern and southern Angola are under the influence, sometimes prevailing, of lower layer flows, from the Indian Ocean or from South Africa. These lead to interannual rainfall variations somewhat different from those observed in West Africa, or even in Central but coastal Africa.

The deficit recorded in the 1970's accentuated in the 1980's, despite the fact that rainfall in 1988 and 1989 in West Africa, returned to values which were nearer to the mean.

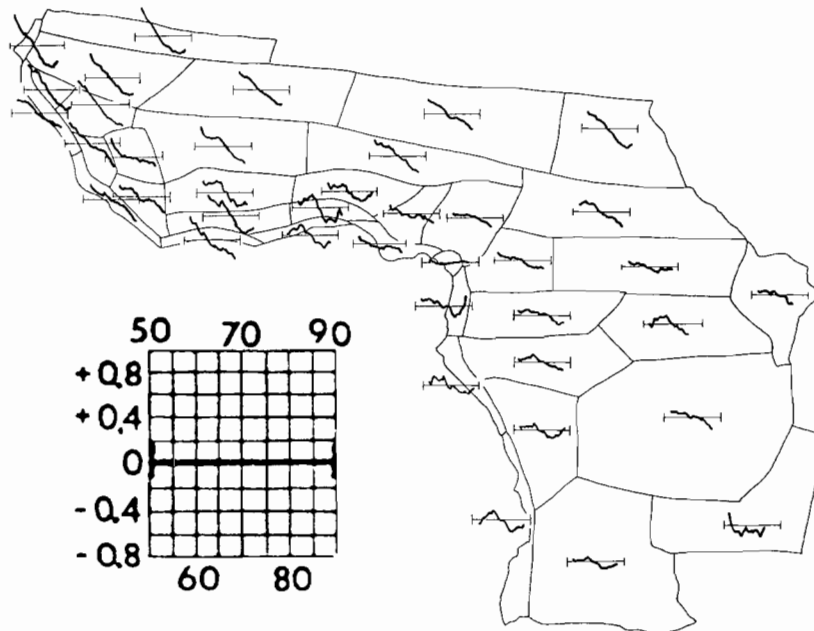


Figure 3 : COURBES LISSÉES SUR 5 ANS DES PLUIES ANNUELLES MOYENNES PAR UNITÉ, CENTRÉES ET RÉDUITES SUR LA PÉRIODE 1951-1989. L'abaque au centre donne la grille des années (1950 à 1990) et des indices de déviation (-0.8 à +1.0). Le trait fin au centre de chaque courbe rappelle la déviation 0, sa longueur représente la largeur de l'abaque. Par suite du lissage les trois premières et dernières valeurs ont été ôtées.

Figure 3 : SMOOTHED CURVES OF THE MEAN ANNUAL RAINFALL PER UNIT OVER FIVE YEARS, FOCUSED AND LIMITED TO THE 1951-1989 PERIOD. The chart in the centre gives the grid points corresponding to 1950 to 1990 and the deviation indexes (-0.8 to +1.0). The thin line in the centre of each curve is 0 deviation, length represents the width of the chart. Due to smoothing, the first three and the last three values have been removed.

#### D. Variabilité régionale des pluies de 1980 à 1987

Les données atmosphériques et océaniques n'étant disponibles que sur la période commune 1980-1987, on présente les variations régionales de pluies pour ces huit années (*fig. 4*) par rapport à la moyenne 1980-1987, sur des surfaces qui sont la somme de plusieurs unités climatiques, et qui correspondent aux zones d'étude de la vapeur d'eau atmosphérique. Les zones d'étude de la vapeur d'eau et celles des précipitations correspondantes sont indiquées sur la *figure 5*.

Durant la période 1980-1987 les variations hydroclimatiques atteignent des niveaux record pour le siècle, qu'il s'agisse des pluies, des débits ou des TSM en Atlantique équatorial. Durant ces années aucun total annuel de pluie n'est supérieur à la moyenne 1951-1989.

#### D. Regional rainfall variability from 1980 to 1987

Since the atmospheric and oceanic data are available only for the common 1980-1987 period, the regional rainfall variations concerning these eight years (*fig. 4*) are presented in relation to the 1980-1987 mean, over surfaces which are the sum of several climatic units, and which correspond to the study zones of the atmospheric water vapour. The study zones of the water vapour and those of the corresponding rainfall are shown in *figure 5*.

In the course of the 1980-1987 period, the hydroclimatic variations reached record century levels in the Equatorial Atlantic, whether they were rainfall, runoffs or sea surface temperatures. During these years, no annual rainfall total was higher than the 1951-1989 average.

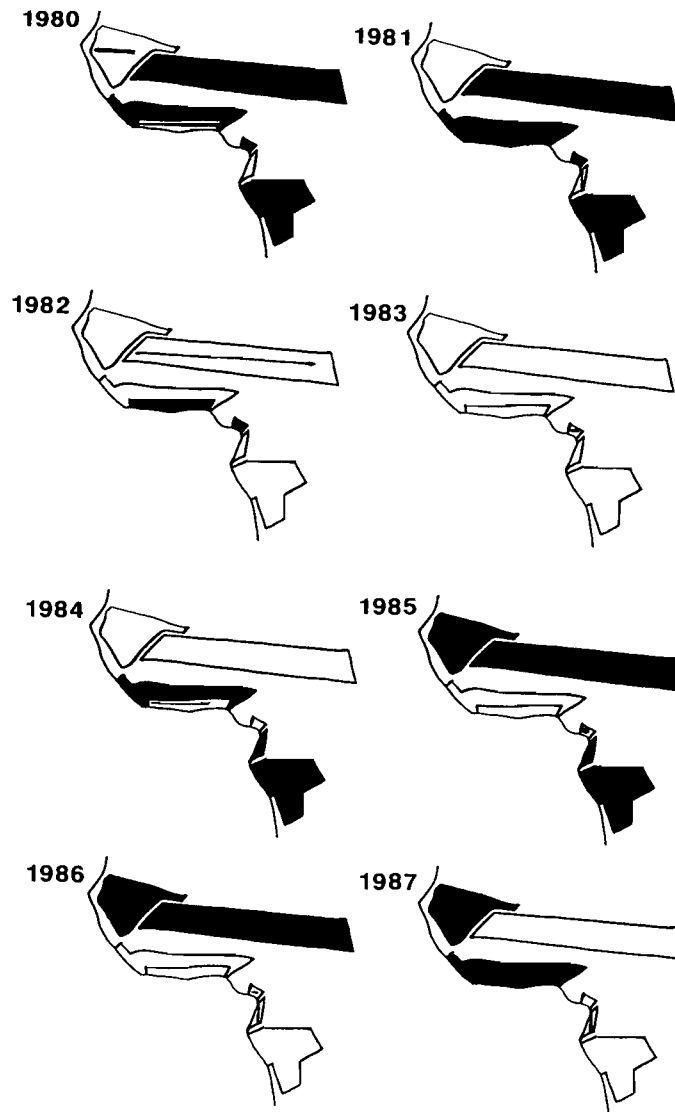


Figure 4 : PLUIES RÉGIONALES EN AFRIQUE DE L'OUEST ET CENTRALE DE 1980 À 1987, SUPÉRIEURES À LA MOYENNE DES HUIT ANNÉES EN NOIR, INFÉRIEURES EN BLANC, MOYENNES EN TIRET (DE 95 % À 105 % DE LA NORMALE). Les noms des régions et des unités climatiques qui les composent sont donnés sur la figure 5.

Figure 4 : REGIONAL RAINFALLS IN WEST AND CENTRAL AFRICA, FROM 1980 TO 1987, HIGHER THAN THE AVERAGE OVER THE EIGHT YEARS REPRESENTED IN BLACK, LOWER THAN THE AVERAGE REPRESENTED IN WHITE, AND AVERAGE PRECIPITATIONS REPRESENTED BY DASHED LINES (FROM 95 % TO 105 % OF THE NORMAL VALUE). The names of the regions and of the constituent climatic units are given in figure 5.

En 1985 le total annuel atteint 90 % de la normale dans la région Sahel, et n'est que de 67 % en 1984. Cette remarque est importante dans l'optique d'étude des configurations météo-océanographiques types d'années sèches et humides au Sahel, puisqu'il n'y a pas d'année excédentaire en pluie au Sahel pendant cette période ; on peut seulement penser que les sens de variation observés par différence entre les configurations des années très sèches et de 1985 doivent être identiques en années réellement humides, mais avec une plus forte intensité. A partir de la figure 4 il apparaît que les années les plus déficitaires au Sahel sont 1982, 1983, 1984 et 1987. Les déficits sont plus faibles en 1980, 1981 et 1986. L'année la moins déficitaire est 1985.

In 1985, the annual rainfall total reached 90 % of the normal value in the Sahelian region, and was only 67 % in 1984. This observation is significant when studying the typical meteo-oceanographic configurations of dry and wet years in the Sahel, because during this period in the Sahel, no year showed surplus rainfall. One can only think that the variation directions observed from the difference between the configurations of very dry years and those of 1985, must be identical during really wet years, but with a higher intensity. Figure 4 shows that in the Sahel, the years showing the greatest deficits are 1982, 1983, 1984 and 1987. Deficits are lower in 1980, 1981 and 1986. The year showing the smallest deficit is 1985.

### 3. TEMPÉRATURES DE SURFACE MARINES (TSM), VENTS EN ALTITUDE ET VAPEUR D'EAU ATMOSPHÉRIQUE DANS L'ESPACE DE LA MOUSSON AFRICAINE DE 1980 A 1987

#### A. Origine des données

##### a. Température de Surface de la Mer (TSM)

Les TSM mensuelles sont moyennées dans une petite zone océanique repérée sur la *figure 5*, dans laquelle les variations de TSM sont représentatives de celles de l'upwelling équatorial atlantique. L'upwelling est une remontée d'eaux froides saisonnière qui a lieu principalement durant les mois de pluie au Sahel, de juillet à septembre (Hisard, 1980). L'intérêt de l'étude des TSM de cet upwelling tient aux deux points suivants :

1. l'intensité de l'upwelling équatorial résulte des interactions météo-océanographiques dans l'ensemble de l'Atlantique austral, elle est donc témoin des variations climatiques globales dans cet espace ;

2. l'intensité du refroidissement (3 à 5°C en moyenne) par rapport aux eaux équatoriales plus chaudes pourrait jouer un rôle sur la qualité du flux de mousson qui transite au-dessus de l'upwelling lors de son trajet vers l'Afrique de l'ouest. L'intérêt de cette zone d'étude, définie entre les latitudes 2°N et 2°S et les longitudes 8°W et 12°W, a été remarqué par Citeau et al. (1986). La méthode de calcul des TSM moyennes dans cette zone a été décrite par Mahé et al. (1990). Elle est basée sur l'utilisation combinée de l'imagerie satellitaire Météosat et des données des navires marchands.

##### b. Vents et vapeur d'eau atmosphérique : les analyses du CEPMMT de Reading

Ce Centre traite un ensemble de données météorologiques mondiales provenant de radiosondages, des bateaux ou des satellites entre autres, qui sont intégrées dans un modèle d'analyse de la circulation globale. Ce modèle crée des champs quotidiens mondiaux de valeurs de différents paramètres. La zone que nous avons retenue s'étend entre les latitudes 30°N et 35°S, et les longitudes 20°E et 60°W. Les paramètres étudiés, à raison d'une valeur par 2,5° de côté, sont le vent zonal et le vent méridien sur 7 niveaux (1.000, 850, 700, 500, 300, 200 et 100 hPa), et la température et l'humidité sur les cinq premiers niveaux, le contenu en vapeur d'eau de l'atmosphère étant très faible au-dessus de 300 hPa entre 30°N et 30°S (Oort, 1983, cité par Hastenrath, 1991). Dans une première étape on établit des climatologies par quinzaines (ou bimensuelles), en moyennant les valeurs journalières. Le résultat est plus facilement comparable aux données de TSM et de pluies, plus couramment utilisées au pas de temps mensuel.

La méthodologie du traitement des analyses du CEPMMT, ainsi que la critique de ces analyses sont présentées dans Mahé (1992).

### 3. SEA SURFACE TEMPERATURES (SST), HIGH-ALTITUDE WINDS AND ATMOSPHERIC WATER VAPOUR, IN THE AFRICAN MONSOON AREA FROM 1980 TO 1987

#### A. Source of data

##### a. Sea Surface Temperature (SST)

The monthly SST are averaged in a small oceanic zone identified in *figure 5*, where the variations of SST are representative of those of the Atlantic equatorial upwelling. The upwelling is an upward movement of seasonal cold waters which occurs mainly during the rainy months in the Sahel, from July to September (Hisard, 1980). The study of the SST of this upwelling is interesting in that :

1. the intensity of the equatorial upwelling results from the meteo-oceanographic interactions in the whole South Atlantic, it is therefore an indicator of the general climatic variations in this area ;

2. the intensity of the cooling (3 to 5°C on average) compared to the warmer equatorial waters, could affect the quality of the monsoon flow which is conveyed above the upwelling, on its course to West Africa. The interest of this study zone, defined between latitudes 2°N and 2°S and longitudes 8°W and 12°W, was pointed out by Citeau and Al. (1986). The method of computation of mean SST in this zone has been described by Mahé and Al. (1990). It is based on the combined use of Meteosat satellite imagery and data collected by merchant vessels.

##### b. Winds and atmospheric water vapour : the Reading ECMWF analyses

This centre processes a set of world-wide meteorological data from radiosounding measurements, provides by ships or satellites etc., which are integrated into an analysis model of the general circulation. This model creates world-wide daily fields of values of different parameters. The zone which we selected is between latitudes 30°N and 35°S and longitudes 20°E and 60°W. The parameters studied, at the rate of one value per 2.5° grid box, are the zonal and the meridional wind based on 7 pressure levels (1.000, 850, 700, 500, 300, 200 and 100 hPa), and the temperature and moisture content of the first five levels, the atmospheric water vapour content being very low above 300 hPa, between 30°N and 30°S (Oort, 1983 quoted by Hastenrath, 1991). Firstly, climatologies were established every fortnight, by averaging the daily values. The result can be compared more easily to SST and rainfall data, which are more frequently used on a monthly time scale.

The processing methodology of the ECMWF analyses, as well as the critical examination of these analyses, are described by Mahé (1992).

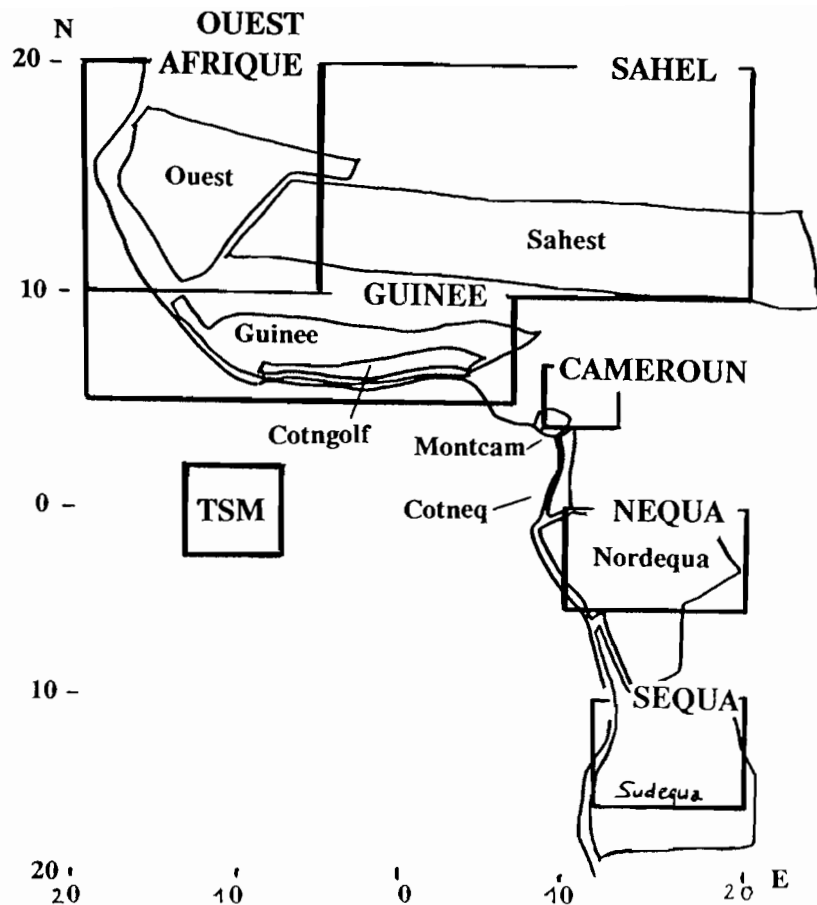


Figure 5 : LIMITE DES ZONES D'ÉTUDE DES TSM, DE LA VAPEUR D'EAU (MAJUSCULES), ET DES RÉGIONS PLUVIOMÉTRIQUES ASSOCIÉES (MINUSCULES). La région Sahest correspond aux unités Tchad, Sahel et Niger ; la région Ouest aux unités Sénémal, Cotnosén, Sénégal, Casa, Nguin et Cotgako ; la région Guinée aux unités Cotmontg, Cotcotiv, Cotgatbe, Srcighan, Crcighan, Ctobeni, Stogben et Csniga ; la région Cotngolf aux unités Cotcotiv et Cotgatbe ; la région Nordequa aux unités Cotgasco, Brazza et Batéké ; la région Sudequa aux unités Cotang et Angola ; enfin Montcam et Cotneq sont des unités climatiques.

Figure 5 : BOUNDARIES OF THE SST STUDY AREAS, OF THE WATER VAPOUR (CAPITAL LETTERS) AND OF THE RELATED RAINFALL AREAS (SMALL LETTERS). The Sahest area corresponds to the Chad, Sahel and Niger units ; the western area to the Senemal, Cotnosén, Senegal, Casa, Nguin and Cotgako units ; the Guinean area to the Cotmong, Cotcotiv, Cotgatbe, Srcighan, Crcighan, Ctobeni, Stogben and Csniga units ; the Cotngolf region to the Cotcotiv and Cotgatbe units ; the Nordequa region to the Cotgasco, Brazza and Bateke units ; the Sudequa area to the Cotang and Angola units ; lastly, Montcam and Cotneq are climatic units.

On rappellera que suivant Arpe (non daté), l'évolution du modèle de circulation globale du CEPMMT a engendré des modifications de la qualité des analyses au cours de la période d'étude. On notera en particulier que de 1985 à février 1986 les valeurs d'humidité (et par là de vapeur d'eau) sont légèrement sous-estimées (de 10 à 15 % environ) par rapport aux périodes précédentes et suivantes.

It must be remembered that according to Arpe (undated), the evolution of the general circulation model established by the ECMWF, has led to some modifications of the quality of the analyses in the course of the study period. It must be noted, in particular, that from 1985 to February 1986, the moisture values (and therefore the water vapour values) were slightly underestimated (by approximately 10 to 15 %) compared to the previous and following periods.

**b1. Le champ de vent en altitude : jet d'est tropical (TEJ) et jet d'est africain (AEJ)**

Le champ de vent établi à partir des radiosondages a été largement étudié au-dessus de l'Afrique de l'ouest.

**b1. The high-altitude wind field : Tropical Easterly Jet (TEJ) and African Easterly Jet (AEJ)**

The wind field defined from the radiosounding measurements has been studied in detail over West Africa.

AEJ et TEJ sont deux courants atmosphériques tropicaux tubulaires soufflant d'est en ouest principalement de juin à septembre au-dessus de l'Afrique de l'ouest. Le TEJ, bien connu depuis Flohn (1964) et Leroux (1980), est situé vers 100-200 hPa ; l'AEJ, décrit par Aspliden et Adefolalu (1976), se situe vers 500-700 hPa. Leurs vitesses moyennes varient respectivement de 12 à 20 m.s<sup>-1</sup> et de 7 à 12 m.s<sup>-1</sup>. Les variations d'AEJ et de TEJ ont été mises en relation avec les variations de pluie au Sahel. D'après les travaux de plusieurs auteurs dont Kidson (1977), Kanamitsu et Krishnamurti (1978), Newell et Kidson (1984), Dhonneur (1985), Fontaine (1989), Hulme et Tosdevin (1989) et Janicot (1990), il ressort que les périodes déficitaires (excédentaires) de pluie au Sahel sont associées à un AEJ plus fort (faible) et à un TEJ plus faible (fort), en valeurs moyennes. Malheureusement cette schématisation à partir de valeurs moyennes est prise en défaut certaines années (1984 par exemple).

Le TEJ est bien représenté par la composante zonale à 200 hPa. Nous avons déterminé plusieurs caractéristiques de ce vent à partir des champs de valeurs moyennes bimensuelles dont la largeur entre les plages 10 m.s<sup>-1</sup> sur le méridien origine.

Le noyau de l'AEJ se déplace en altitude entre 500 et 800 hPa durant la saison, il semble toutefois être plus souvent près de 500 hPa. Pour décrire les variations d'intensité de ce jet en une variable synthétique, nous avons fait la somme des 7 valeurs fournies par le modèle entre 5°N et 20°N à 500 hPa. Le même calcul appliqué à 700 hPa fournit des résultats très proches.

### **b2. La vapeur d'eau atmosphérique**

Elle est obtenue à partir de l'humidité relative et de la température à chaque niveau de pression. Comme pour les vents on établit une climatologie bimensuelle qui sert de référence pour le calcul des anomalies. Nous avons calculé le contenu en vapeur d'eau sur deux épaisseurs d'atmosphère : de 1.000 à 750 hPa et de 700 à 300 hPa. Les premières valeurs correspondent environ à l'épaisseur du flux de mousson (1.500 à 2.000 m d'épaisseur), plus une petite tranche supérieure où le flux vient de l'est à une vitesse très faible, de 2 à 4 m.s<sup>-1</sup>, très inférieure à celle observée dans le noyau de l'AEJ. Le noyau d'AEJ se trouve dans la tranche supérieure délimitée. Le noyau de TEJ est nettement localisé dans les couches supérieures à 300 hPa, il ne peut donc pas y avoir de confusion. Nous avons calculé des valeurs moyennes de vapeur d'eau pour des zones géographiques correspondant à des entités significatives par rapport à la climatologie des pluies (*fig. 6*).

## **B. Variations comparées de TSM, vents et vapeur d'eau de 1980 à 1987**

### **a. Résultats**

Les résultats sont présentés en valeurs bimensuelles sur la période de temps allant de la première quinzaine de juillet (juillet 1) à la première quinzaine

The AEJ and TEJ are two tubular tropical atmospheric currents, blowing from east to west, mainly from June to September, above West Africa. The TEJ, well known since Flohn (1964) and Leroux (1980) is situated at approximately 100-200 hPa ; the AEJ described by Aspliden and Adefolalu (1976), is at approximately 500-700 hPa. Their mean velocities vary respectively from 12 to 20 ms<sup>-1</sup> and from 7 to 12 ms<sup>-1</sup>. The AEJ and TEJ variations have been compared to rainfall variations in the Sahel. According to the studies carried out by several authors, for example, Kidson (1977), Kanamitsu and Krishnamurti (1978), Newell and Kidson (1984), Dhonneur (1985), Fontaine (1989), Hulme and Tosdevin (1989) and Janicot (1990), it appears that in terms of mean values, the rainfall deficit (excess) periods in the Sahel are associated with a stronger AEJ (weak) and a weaker TEJ (strong). Unfortunately, this schematization based on mean values, is sometimes caught out (for instance 1984).

The TEJ is well represented by the zonal component at 200 hPa. We have determined several characteristics of the wind from fields of fortnightly mean values, among which the width between the 10 ms<sup>-1</sup> areas at the standard meridian.

The AEJ nucleus moves at a high altitude between 500 and 800 hPa during the season, however, it seems to be the most often near 500 hPa. In order to describe the variations in intensity of this jet as a synthetic variable, we added the seven variables provided by the model between 5°N and 20°N at 500 hPa. The same computation applied to 700 hPa gives very similar results.

### **b2. The atmospheric water vapour**

This is obtained from the relative humidity and the temperature at each pressure level. Like in the case of winds, a fortnightly climatology was established which was used as a reference for the computation of anomalies. We computed the water vapour content of two atmospheric thicknesses from 1.000 to 750 hPa and from 700 to 300 hPa. The first values approximately corresponded to the thickness of the monsoon flow (1.500 to 2.000 m thick), plus a small part of the upper layer where the flow comes from the east at a very low velocity, from 2 to 4 m.s<sup>-1</sup>, very much lower than that observed in the AEJ nucleus. The AEJ nucleus is found in the demarcated upper layer. The TEJ nucleus was clearly positioned in the levels above 300 hPa, therefore there cannot be any confusion. We computed mean values of water vapour for geographic areas corresponding to significant entities in relation to the rainfall climatology (*fig. 6*).

## **B. Compared variations of SST, winds and water vapour from 1980 to 1987**

### **a. Results**

The results are expressed in terms of fortnightly values over the period extending from the first fortnight of July (July 1) up to and including the first fort-

de septembre (septembre 1), soit 5 quinzaines par an, centrées sur la saison des pluies sahélo-soudanienne.

night of September (September 1), that is five fortnights per year, focused on the Sahelian-Sudanese rainy season.

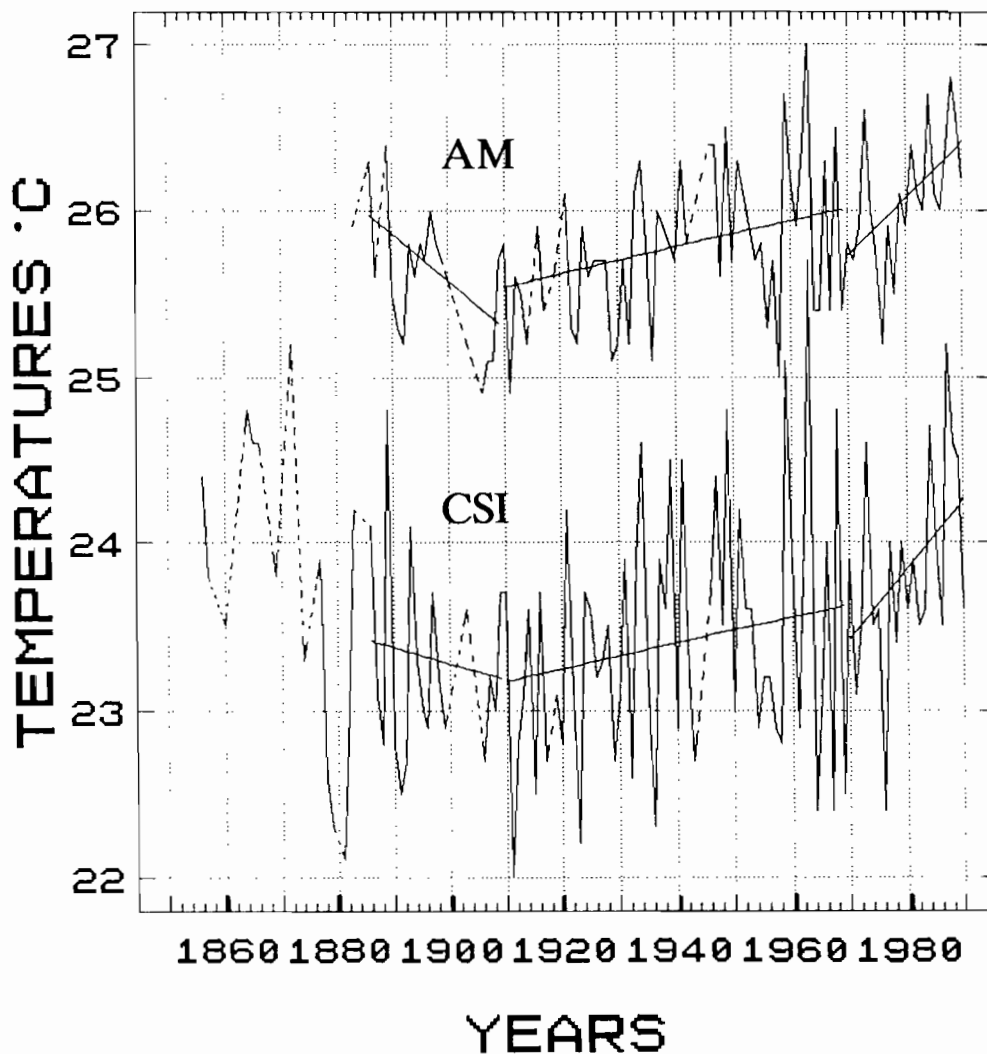


Figure 6 : TEMPÉRATURES DE SURFACES MARINES DANS LA ZONE D'ÉTUDE REPÉRÉE SUR LA FIGURE 5 : MOYENNES ANNUELLES (AM) ET INDICES DE SAISON FROIDE (CSI, MOYENNE DES MOIS DE JUILLET À SEPTEMBRE). Les traits discontinus indiquent une rupture dans les séries de données. Les tendances pour trois périodes sont représentées : 1886-1909 ; 1910-1969 et 1970-1990. (D'après Mahé et al., 1992).

Figure 6 : SEA SURFACE TEMPERATURES IN THE STUDY AREA IDENTIFIED IN FIGURE 5 : ANNUAL AVERAGES AND COLD SEASON INDEXES (CSI, AVERAGE OF THE MONTHS OF JULY TO SEPTEMBER). The discontinuous lines show a break in the data series. The trends concerning three periods are represented : 1886-1909 ; 1910-1969 and 1970-1990. (According to Mahé and Al., 1992).

#### **a1. Température de Surface de la Mer (TSM)**

Ce type de présentation est peu significatif en ce qui concerne les TSM dans notre zone d'étude, car il a été démontré que les variations des TSM dans l'upwelling équatorial résultent en grande partie d'une action éloignée du vent, dans l'Atlantique équatorial ouest (Moore et al., 1978 ; Adamec et O'Brien, 1978), suivant un temps de réponse allant de 10-15 jours (Katz et al., 1986) à un mois (Servain et al., 1982) selon les auteurs. Les corrélations que l'on a pu effectuer entre valeurs mensuelles de pluies sahéliennes et de TSM sont peu significatives.

#### **a1. Sea Surface Temperature (SST)**

This type of description is not very significant as far as the SST is concerned in our study area, for it has been shown that SST variations in the Equatorial upwelling are mainly a result of distant wind action, in the west Equatorial Atlantic (Moore et Al, 1978 ; Adamec and O'Brien, 1978), according to a response time ranging from 10-15 days (Katz et Al, 1986) to a month (Servain et Al, 1982), according to the authors. The correlations which we able to carry out, between the monthly values of Sahelian rainfalls and SST were not very significant.

Dans la zone d'étude, les variations de TSM annuelles et mensuelles et celles d'un indice de saison froide (CSI, moyenne des TSM de juillet à septembre), de 1854 à 1990 (Mahé et al., 1992), mettent en évidence une augmentation des TSM depuis 1910, particulièrement durant les mois d'upwelling (CSI) (ce qui correspond à une diminution de l'intensité de ce dernier). L'augmentation des TSM est particulièrement élevée depuis le début des années 1970 (fig. 7), et sur la période 1980-1987, les CSI sont toujours supérieurs à la moyenne interannuelle 1856-1990, même en 1985. Durant les années 1984 et 1987 les anomalies positives sont très fortes.

### a2. Vents et vapeur d'eau

Parmi les résultats obtenus on a choisi de présenter une comparaison entre AEJ et TEJ en ce qui concerne les vents, et une comparaison entre la vapeur d'eau des zones Sahel sup (700-300 hPa) et Guinée inf (1.000-700 hPa).

In the study area, the annual and monthly SST variations and those of a Cold Season Index (CSI, SST mean from July to September), from 1854 to 1990 (Mahé and Al, 1992) reveal an increase in the SST since 1910, particularly during the upwelling months (CSI) (which corresponds to a decrease in the intensity of the latter). The increase in SST has been particularly high since the early 1970's (fig. 7) and over the 1980-1987 period, the CSI were always higher than the 1856-1990 interannual mean, even in 1985. In 1984 and 1987, the positive anomalies were very strong.

### a2. Winds and water vapour

From among the results which were obtained, we have decided as far as the winds are concerned, to present a comparison between the AEJ and TEJ, and a comparison between the water vapour of the upper Sahelian areas (700-300 hPa) and lower Guinea (1.000-700 hPa).

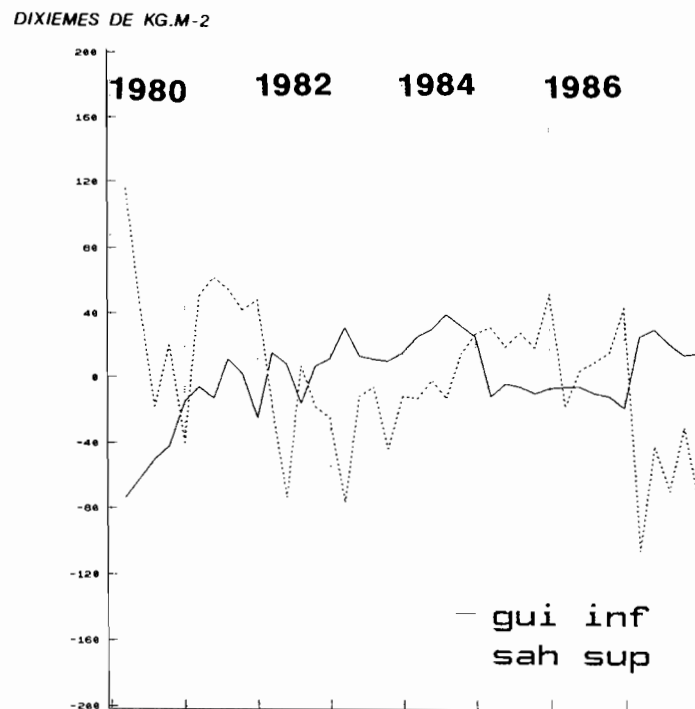


Figure 7 : VAPEUR D'EAU DANS LES NIVEAUX GUINÉE INF (1.000-700 HPA) (TRAIT CONTINU) ET SAHEL SUP (700-300 HPA) (TRAIT POINTILLÉ) DE 1980 À 1987 À RAISON DE 5 VALEURS BIMENSUELLES PAR AN DE JUILLET 1 À SEPTEMBRE 1.

Figure 7 : WATER VAPOUR IN THE LOWER GUINEA LEVELS (1.000-700 HPA) (CONTINUOUS LINE) AND UPPER SAHEL (700-300 HPA) (DOTTED LINE) FROM 1980 TO 1987 AT A RATE OF FIVE FORTNIGHTLY VALUES PER YEAR FROM JULY 1ST TO SEPTEMBER 1ST.

Le contenu en vapeur d'eau du flux de mousson varie assez peu d'une année à l'autre dans la zone sahélienne, moins que sur la bande côtière nord du golfe de Guinée (Guinée inf). Le flux de vapeur en altitude (700-300 hPa) varie par contre de façon beaucoup plus marquée interannuellement. Comme l'indiquent De Felice et al. (1982) la moitié au moins de la vapeur d'eau au-dessus du Sahel est véhiculée en altitude par les vents d'est au-dessus du flux de mousson.

The water vapour content of the monsoon flow does not greatly vary from one year to the next in the Sahelian area, less than over the northern coastal belt of the Gulf of Guinea (lower Guinea). On the other hand, the vapour flow at a high altitude (700-300 hPa) varies interannually in a far more marked manner. As De Felice and Al. (1982) have indicated, at least half the water vapour above the Sahel is conveyed at a high altitude by eastern winds above the monsoon flow.

Cette vapeur d'eau serait transportée par l'AEJ (Cadet et Nnolli, 1987). Ces mêmes auteurs remarquent que ce flux est principalement divergent, ce qui limite très fortement son potentiel d'interactions avec la convection dans les lignes de grains, qui serait surtout entretenue par la vapeur du flux de mousson.

D'autre part Mahé (1992) indique que les corrélations entre les variations de pluies sahéniennes et les variations de vapeur d'eau au-dessus de la zone Sahel ne sont significatives que pour la couche 700-300 hPa et non pour la couche (1.000-700 hPa). Ces corrélations portant sur 8 couples de valeurs moyennes saisonnières et concernant une période de déficit pluviométrique prolongé, il est possible que l'utilisation d'un autre jeu de valeurs, en particulier des valeurs plus récentes et mieux contrôlées du CEPMMT, mais également restreintes à la couche 1.000-850 hPa plus représentative du flux de mousson, donne des résultats un peu différents. Mais Lamb (1983) notait déjà que la quantité de vapeur d'eau au Sahel variait assez peu entre années sèches et humides.

This water vapour would be conveyed by the AEJ (Cadet and Nnolli, 1987). The same authors point out that this flow is mainly divergent, which considerably limits its potential of interacting with convection in the squall lines, which would be mainly maintained by the vapour content of the monsoon flow.

Moreover, Mahé (1992) noted that the correlations between Sahelian rainfall variations and the variations of water vapour above the Sahel zone are only significant for the upper layer (700-300 hPa) and not for the lower layer (1.000-700 hPa). These correlations are based on 8 pairs of seasonal mean values and on a long period of rainfall deficit, it is possible that the use of another set of data, particularly more recent and better controlled values from the ECMWF, but also restricted to the 1.000-850 hPa layer, more representative of the monsoon flow, should give somewhat different results. But Lamb (1983) had already noted that difference in the quantity of water vapour between wet or dry years in Sahel did not vary much.

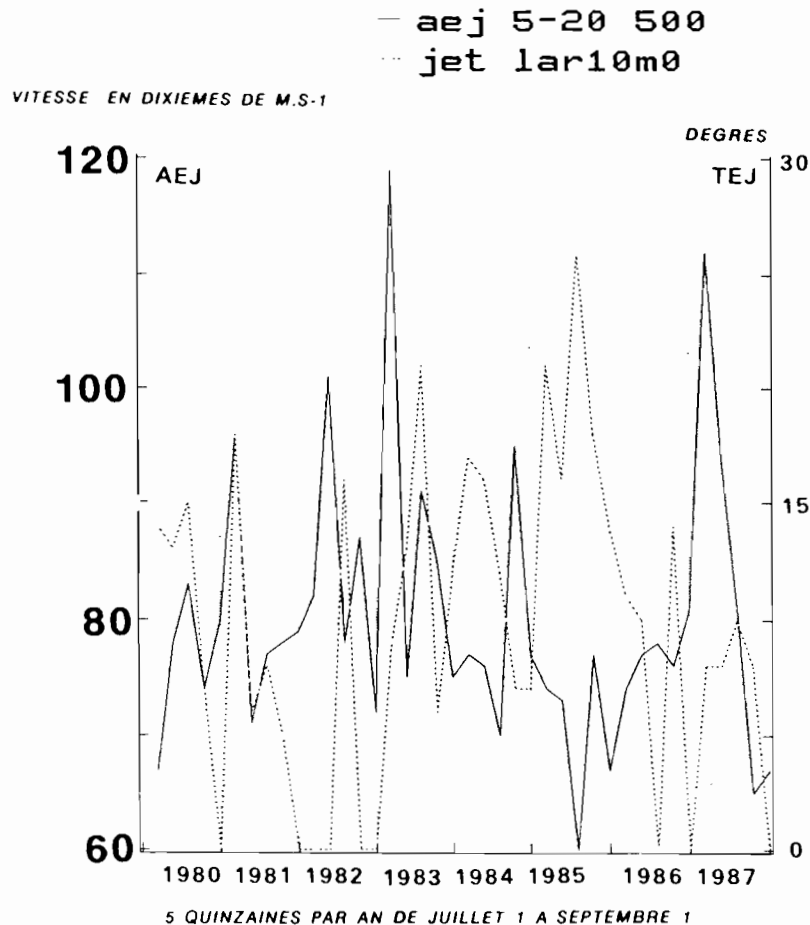


Figure 8 : COMPARAISON DE LA VITESSE DE L'AEJ À 500 HPA (À GAUCHE) ET DE L'ÉVOLUTION CONJOINTE DE LA LARGEUR ENTRE LES PLAGES 10 M.S<sup>-1</sup> DU TEJ SUR LE MÉRIDIEN ORIGINE (À DROITE), RESPECTIVEMENT EN DIXIÈMES DE M.S<sup>-1</sup> ET DEGRÉS DE LATITUDE. Pour chaque année on donne 5 valeurs bimensuelles, de juillet 1 à septembre 1.

Figure 8 : COMPARISON BETWEEN THE AEJ VELOCITY AT 500 HPA (ON THE LEFT) AND THE CONJOINT EVOLUTION OF THE WIDTH BETWEEN TH 10 M.S<sup>-1</sup> AREAS OF THE TEJ AT THE STANDARD MERIDIAN (ON THE RIGHT), EXPRESSED RESPECTIVELY IN TERMS OF TENTHS OF M.S<sup>-1</sup> AND DEGREES OF LATITUDE. For each year, five fortnightly values are given from July 1st to September 1st.

Sur la *figure 8* sont reportés en ordonnée à gauche la vitesse de l'AEJ en dixièmes de  $m.s^{-1}$  et à droite la largeur entre les plages  $10 m.s^{-1}$  du TEJ à 220 hPa sur le méridien origine. Cinq valeurs bimensuelles sont juxtaposées par année. L'AEJ est plus rapide en 1982, 1983 et 1987, soit trois années sèches au Sahel. Il est moins rapide en 1985 et relativement moyen les autres années. Le TEJ suit une évolution globalement inverse : plus rapide en 1985, plus faible en 1981, 1982 et 1987, plutôt moyen les autres années. L'opposition entre les sens de variation des deux jets est manifeste à partir de 1985, année d'un changement majeur dans les algorithmes du modèle du CEPMMT. C'est peut-être en partie pour cette raison que l'année 1984, la plus sèche au Sahel, n'apparaît pas clairement comme telle suivant les valeurs d'AEJ et de TEJ.

De même en ce qui concerne la vapeur d'eau (*fig. 9*), les valeurs des premières années sont sans doute moins comparables à celles des dernières. On observe une anomalie positive de vapeur d'eau sur la côte nord du golfe de Guinée durant les années très sèches au Sahel (1983, 1984, 1987 et dans une moindre mesure, 1982), ce qui indiquerait une stagnation de la Zone de Convergence InterTropicale sur la côte nord du golfe de Guinée quand elle devrait se décaler vers  $10^{\circ}N$ , provoquant des pluies anormalement élevées sur le littoral, habituellement en petite saison sèche, en 1984 et 1987, alors que ce n'est pas le cas en 1982 et 1983. On peut apporter plusieurs éléments pour tenter d'expliquer le cas de ces deux dernières années. Tout d'abord on sait que la qualité des analyses du modèle était moins bonne au début de notre série qu'à la fin en ce qui concerne la vapeur d'eau. A ce propos Citeau (1992) effectue une comparaison des humidités relatives à Dakar déduites des radiosondages ASECNA et des analyses du CEPMMT (*fig. 9*), où il met en évidence une bonne concordance entre les valeurs déduites des deux différentes sources à partir de 1985, tandis que l'humidité est surévaluée à 500 hPa de 1982 à 1984 et à 1.000 hPa en 1983 et 1984. Il faut ensuite remarquer que l'AEJ est plus rapide que la moyenne pour ces deux années, surtout en 1983, et que le TEJ est plus puissant, surtout en 1982. Ces configurations aérologiques sont celles observées durant les années sèches au Sahel, et leur présence en même temps que les anomalies de vapeur d'eau supérieures ou égales à la moyenne sur la côte nord du golfe de Guinée, incite à penser que, d'une part on se trouve en présence de situations sèches sur l'ensemble de l'Afrique de l'Ouest (voir Leroux, 1988, ou Janicot, 1990), et d'autre part que la présence de vapeur d'eau en quantité supérieure à la moyenne n'est pas associée systématiquement à une bonne pluviométrie.

*Figure 8* depicts the AEJ velocity expressed in tenths of  $m.s^{-1}$  on the left of the Y axis, the width between the TEJ  $10 m.s^{-1}$  points at 200 hPa at the standard meridian are represented on the right. Five fortnightly values per year are placed side by side. The AEJ is faster in 1982, 1983 and 1987, that is three dry years in the Sahel. It is slower in 1985 and relatively average the other years. Generally, the evolution of TEJ is the inverse : faster in 1985, slower in 1981, 1982 and 1987 and relatively average the other years. The inverse relationship between the variation of both jets is obvious from 1985, the year when a major change was made in the algorithms of the ECMWF model. It is perhaps partly for this reason that 1984, the driest year in Sahel, did not clearly appear as such according to the AEJ and TEJ values.

Similarly, as far as the water vapour is concerned (*fig. 9*), the first year values are undoubtedly less comparable with those of the later years. A positive water vapour anomaly was observed over the northern coast or the Gulf of Guinea during the very arid years in the Sahel (1983, 1984, 1987, and to a lesser extent, 1982) which would indicate a stagnation of the Inter-Tropical Convergence Zone over the northern coast of the Gulf of Guinea when it should be moving towards  $10^{\circ}N$ , thus causing abnormal high rainfall over the littoral which is usually under the influence of the short dry season, in 1984 and 1987 but which was not the case in 1982 and 1983. One can evoke several elements in order to try to explain the case of these two years. Firstly, as far as water vapour is concerned, we know that the quality of the analyses of the model was not as good at the beginning of the series as at the end. In connection with this, Citeau (1992) carried out a comparison between relative humidities at Dakar, deducted from ASECNA radiosounding data and ECMWF analyses (*fig. 9*). He showed a high correlation between the values deducted from the two different sources from 1985, whereas the relative humidity was overestimated at 500 hPa from 1982 to 1984 and at 1.000 hPa in 1983 and 1984. Secondly, it must also be noted that the AEJ velocity is above the 1980-1987 average during these two years, especially in 1983, and that the TEJ is stronger, especially in 1982. These aerological patterns are the ones observed during dry years in Sahel, and their presence at the same time as the water vapour anomalies, greater or equal to the 1980-1987 average over the Gulf of Guinea shore, leads one to think that, on the one hand typical dry situations existed in 1982 and 1983 over the whole of West Africa (see Leroux, 1988, or Janicot, 1990) and on the other hand, that the presence of a higher than normal water vapour content is not systematically linked to good rainfall.

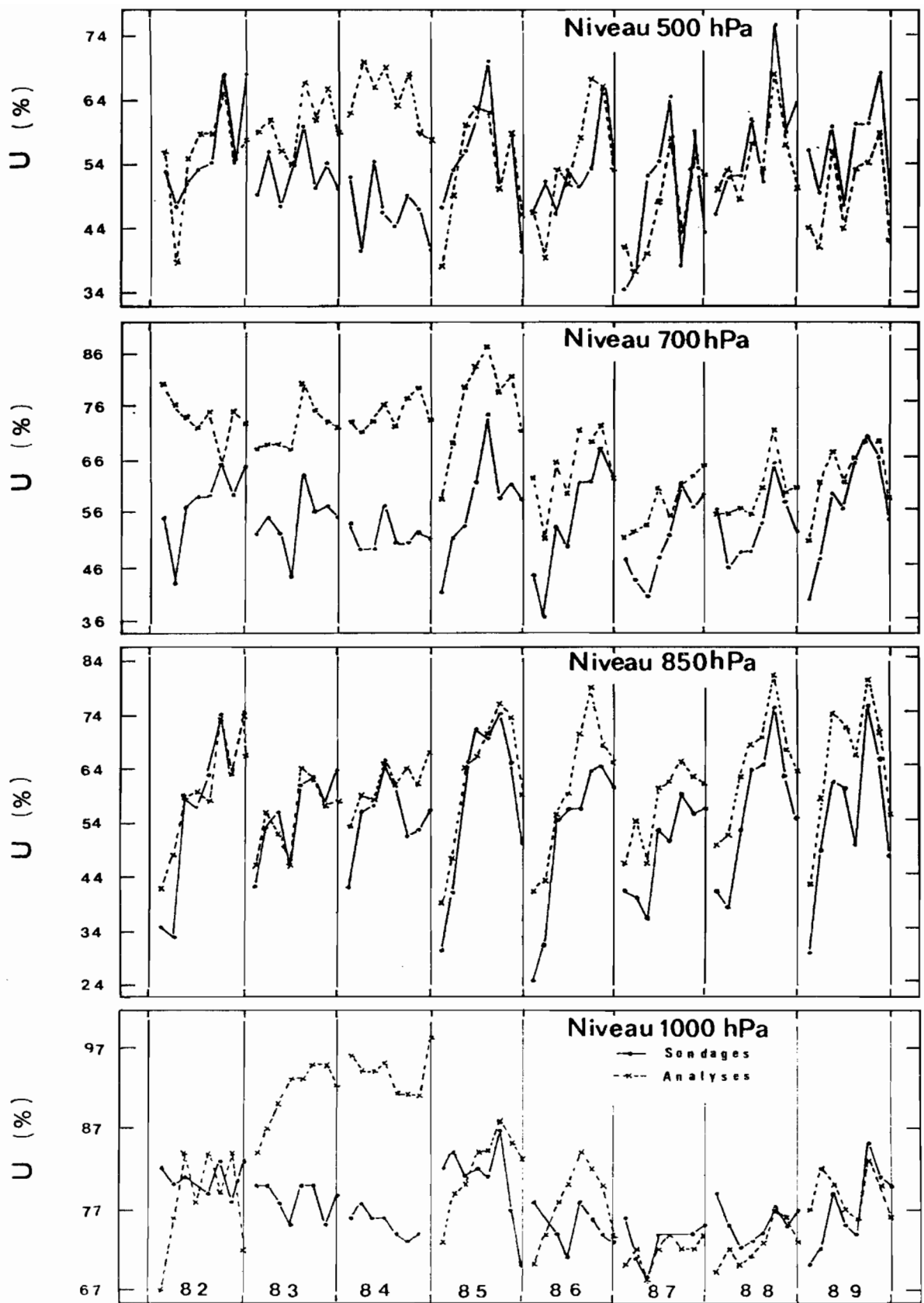


Figure 9 : HUMIDITÉ RELATIVE À DAKAR DÉDUITE DES RADIO-SONDAGES DE L'ASECNA (TRAITS CONTINUS) ET DES ANALYSES DU CEPMMT (TRAITS POINTILLÉS) POUR LES MOIS DE JUIN, JUILLET ET SEPTEMBRE, DE 1982 À 1988. Les valeurs journalières ont été ramenées à deux valeurs par mois. (D'après Citeau, 1992).

Figure 9 : RELATIVE HUMIDITIES AT DAKAR DEDUCTED FROM ASECNA RADIOSOUNDING (CONTINUOUS LINE) AND FROM THE ECMWF ANALYSES (DOTTED LINE), FOR THE MONTHS OF JUNE, JULY AND SEPTEMBER, FROM 1982 TO 1988. Daily values were averaged over fortnightly periods. (From Citeau, 1992).

On observe une anomalie négative dans la zone Sahel sup en 1982, 1983 et 1987. L'inverse est vérifié en 1985. En 1984 la valeur moyenne de la zone Sahel sup est un peu inférieure à celle de 1985, mais est quand même assez élevée par rapport à celles des autres années sèches.

On voit donc que l'observation des valeurs moyennes annuelles ou saisonnières des paramètres climatiques, si elle permet d'établir des schémas types secs ou humides de relations entre paramètres, est insuffisante pour décrire l'ensemble des situations climatiques observées au sol, comme celle de 1984.

#### **4. ANALYSE COMPARÉE DES VARIATIONS BIMENSUELLES DES SITUATIONS ATMOSPHÉRIQUES ET PLUVIOMÉTRIQUES AU NIGER EN 1984**

##### **A. Les pluies au Niger en juillet et août 1984**

La *figure 10* représente les cartes d'anomalies de pluies au sud Niger en juillet et août 1984. Les surfaces hachurées indiquent les zones où les pluies mensuelles ont atteint ou dépassé 50 % de la normale interannuelle (communiqué par la Météorologie Nationale Nigérienne). Au mois d'août la presque totalité du territoire enregistre des pluies inférieures à la moitié de la normale, alors qu'en juillet la situation, bien qu'également globalement déficitaire, n'est pas aussi dramatique (en plusieurs endroits même les pluies dépassent la normale). C'est en fait dans tout le Sahel que la sécheresse est intense.

##### **B. TSM, vents et vapeur d'eau**

L'upwelling équatorial est très faible dans le golfe de Guinée, où les TSM sont très supérieures aux normales. L'anomalie est comparable à celle de 1968, et est un peu inférieure à celles de 1963 et de 1987. D'après les résultats de Bah (1987), Hastenrath et al. (1987), Wright (1985), Druyan (1991) et Mahé (1992), une anomalie positive de TSM en Atlantique équatorial, surtout pendant les mois de juillet, août et septembre, est très souvent observée durant les années de pluies déficitaires au Sahel. Mais la comparaison à une échelle de temps plus réduite, mensuelle ou bimensuelle par exemple, entre valeurs de TSM et de pluies au Sahel ne fait apparaître aucune bonne corrélation.

Les valeurs moyennes de vents sur la saison des pluies indiquent un TEJ plutôt fort et un AEJ plutôt faible, soit une configuration globalement favorable aux pluies au Sahel. Sur la *figure 11* on compare les valeurs bimensuelles d'AEJ et de TEJ pour 1982 (sec), 1985 (moyen) et 1984. Jusqu'à la première quinzaine d'août les valeurs de TEJ et d'AEJ sont presque identiques en 1984 et en 1985. C'est entre la première et la seconde quinzaine d'août que la configuration plutôt favorable aux pluies au Sahel bascule vers une situation fortement inhibitrice de pluies ; l'AEJ se renforce, le TEJ au contraire s'affaiblit subitement.

A negative water vapour anomaly was also observed in the upper Sahelian zone in 1982, 1983 and 1987. The opposite phenomenon was observed in 1985. In 1984, the average value of the upper Sahelian zone is slightly lower than that of 1985 but is nevertheless quite high in comparison to those of the other dry years.

Therefore, if the observation of annual or seasonal average values of climatic parameters enables typical dry or wet schemas of relations between parameters to be established, it is insufficient to describe all the climatic situations observed at the ground level, such as the one in 1984.

#### **4. COMPARATIVE ANALYSIS OF THE FORTNIGHTLY VARIATIONS OF THE ATMOSPHERIC AND RAINFALL SITUATIONS ENCOUNTERED IN NIGER, IN 1984**

##### **A. Rainfalls in Niger in July and August 1984**

Figure 10 represents the charts of rainfall anomalies in southern Niger, in July and August 1984. The hatched areas show the zones where monthly rainfalls amounted to, or were more than 50 % of the interannual normal values (data provided by the Niger National Weather Office). In August, almost the whole country recorded precipitations lower than half of the normal values, whereas in July, the situation although globally deficient too, was not so dramatic (in several places, rainfall went above the normal values). It is in fact in Sahel that drought was severe everywhere.

##### **B. SST, winds and water vapour**

The equatorial upwelling was very weak in the Gulf of Guinea, where the SST were considerably higher than normal. The anomaly was similar to that observed in 1968 and was a little lower than the ones observed in 1963 and 1987. According to the results obtained by Bah (1987), Hastenrath and Al. (1987), Wright (1985), Druyan (1991) and Mahé (1992), a positive SST anomaly in the equatorial Atlantic, mainly in July, August and September, was very often observed during the years characterized by rainfall deficits in the Sahel. But the comparison on a smaller time scale, monthly or fortnightly, of the SST values and Sahelian rainfall does not show any good correlation.

The mean values of winds in the rainy season indicate a rather strong TEJ and a rather weak AEJ, that is to say a configuration generally favourable to rainfall in Sahel. Figure 11 shows fortnightly values of AEJ and TEJ for 1982 (dry), 1985 (average) and 1984 compared. Up to the first fortnight of August, the 1984 and 1985 TEJ and AEJ values are almost identical. It is between the first and second fortnight of August that the situation which is rather favourable to rainfall in the Sahel swings towards a rain inhibitory situation ; the AEJ was re-enforced and the TEJ, on the contrary suddenly weakened.

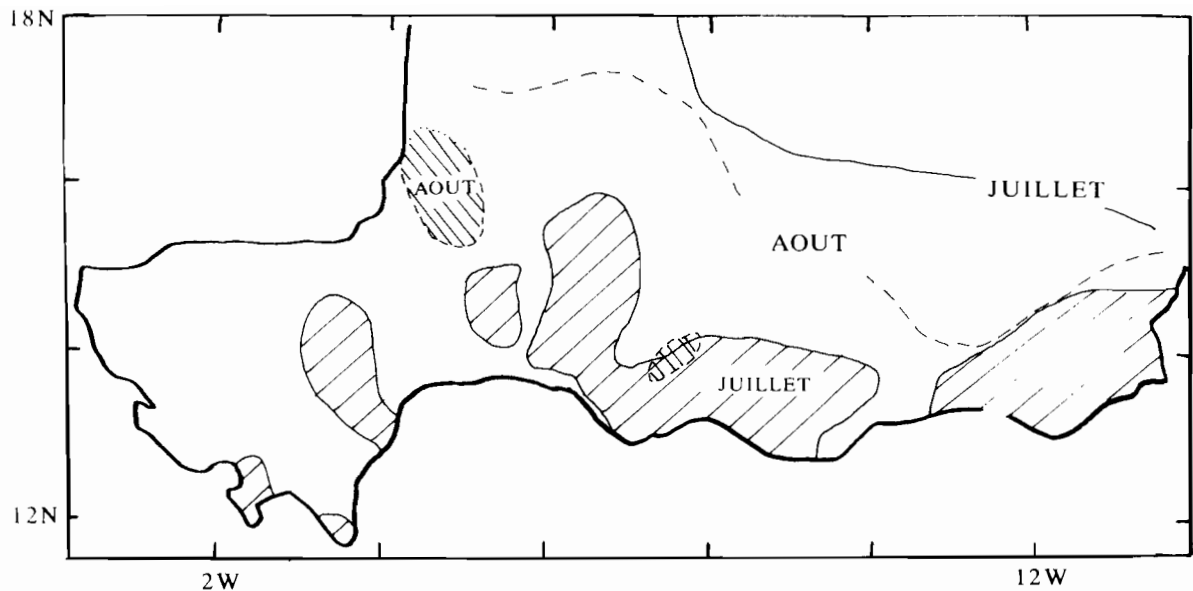


Figure 10 : CARTES D'ANOMALIES DE PRÉCIPITATIONS EN POURCENTAGES DE LA NORMALE INTERANNUELLE AU NIGER EN JUILLET 1984 (TRAITS CONTINUS) ET AOUT 1984 (TRAITS DISCONTINUS). Les surfaces hachurées correspondent aux zones de précipitations supérieures à 50 % de la normale. Dans la partie Nord-Est du pays on a fait figurer également la limite des précipitations mensuelles nulles.

Figure 10 : MAPS OF RAINFALL ANOMALIES IN TERMS OF PERCENTAGES OF THE INTERANNUAL NORMAL VALUE IN NIGER, IN JULY 1984 (CONTINUOUS LINES) AND AUGUST 1984 (DOTTED LINES). The hatched areas correspond to zones of precipitations higher than 50 % of the normal value. In the North East part of the country, the limit of zero monthly precipitations is also shown.

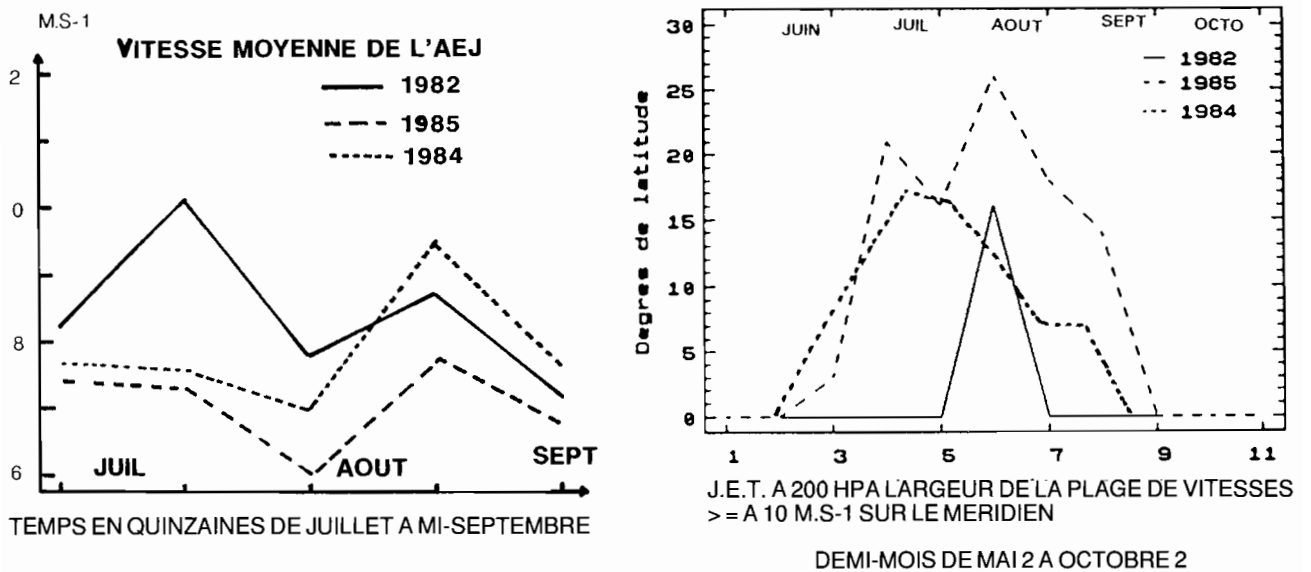


Figure 11 : A GAUCHE : VITESSES MOYENNES BIMENSUELLES DE L'AEJ À 500 HPA (JUILLET 1 À SEPTEMBRE 1) EN M.S<sup>-1</sup>, POUR L'ANNÉE 1984 COMPARÉE AUX ANNÉES 1985, LA PLUS HUMIDE AU SAHEL SUR LA PÉRIODE 1980-1987, ET 1982, ANNÉE SÈCHE. – A DROITE : LARGEURS DE LA PLAGE 10 M.S<sup>-1</sup> DU TEJ SUR LE MÉRIDIEN ORIGINE, POUR LES MÊMES ANNÉES QUE POUR L'AEJ, MAIS SUR UNE PÉRIODE DE TEMPS PLUS LONGUE, DE MAI 2 À OCTOBRE 2 (JUILLET 1 CORRESPOND À 4).

Figure 11 : LEFT : FORTNIGHTLY MEAN VELOCITIES OF THE AEJ AT 500 HPA (FROM JULY 1ST TO SEPTEMBER 1ST) - EXPRESSED IN M.S<sup>-1</sup> FOR 1984 COMPARED TO 1985, THE WETTEST YEAR IN THE SAHEL IN THE 1980 TO 1987 PERIOD, AND TO 1982, A DRY YEAR. – RIGHT : WIDTHS OF THE 10 M.S<sup>-1</sup> AREA OF THE TEJ AT THE STANDARD MERIDIAN, FOR THE SAME YEARS AS THOSE CONCERNING THE AEJ, BUT OVER A LONGER PERIOD OF TIME FROM MAY 2ND TO OCTOBER 2ND (JULY 1ST CORRESPONDS TO 4).

La situation entre TEJ et AEJ devient totalement opposée à celle qui va se maintenir durant tout l'été 1985 ; elle est très proche de celle qui s'est maintenue durant tout l'été 1982. Comme on l'a déjà vu sur la *figure 8* l'anomalie de vapeur d'eau dans la zone Guinée inf est la plus forte des huit années. Parallèlement la quantité de vapeur d'eau dans l'AEJ est plutôt moyenne. De même que pour les TSM, on s'aperçoit que les variations de vapeur d'eau dans la région Sahel sont plus significatives en moyenne saisonnière qu'en valeurs bimensuelles suivant notre méthode d'étude.

### C. L'anticyclone de Sainte-Hélène

Citeau et al. (1992) ont comparé les champs de vapeur d'eau obtenus à partir des analyses du CEPMMT et les observations du canal vapeur d'eau Météosat. Ils concluent que l'on peut raisonnablement assimiler le minimum de vapeur d'eau au centre de la zone de subsidence liée à l'anticyclone de Sainte-Hélène au niveau 500 hPa (que pour simplifier on appellera centre de l'anticyclone dans la suite), et que les résultats obtenus à partir des données des deux origines précédentes sont comparables. Ces observations concordent avec les travaux de Desbois et al. (1986) sur les données du canal vapeur d'eau de Météosat de 1983 à 1985.

Sur la *figure 12* on présente les variations de position en longitude du centre de l'anticyclone de Sainte-Hélène pour deux années types et pour 1984. On présente l'année type déficitaire au Sahel 1983 à la place de l'année 1982 car le traitement des données dont la vapeur d'eau est issue n'a débuté qu'en 1983. Durant la seconde quinzaine d'août 1984, le minimum de vapeur d'eau, situé les autres années plus proche de la côte africaine, se décale subitement de 20 à 30° de longitude vers les côtes brésiliennes alors qu'il reste tout l'été près des côtes africaines durant l'été 1985. Ce décalage de l'anticyclone de Sainte-Hélène en août 1984 pourrait entraîner une diminution de l'intensité des alizés de sud-est près de la côte africaine et créer un flux d'ouest dans la région centre-sud de l'océan Atlantique, habituellement sous un flux d'est (Mahé, 1992).

Le déplacement du centre de l'anticyclone induit un cortège de modifications météorologiques en Atlantique austral. On peut relier à ce déplacement la diminution d'intensité des alizés de sud-est au large des côtes du Sud-Ouest africain, le passage d'un flux d'est à un flux d'ouest dans l'Atlantique centre-sud, et la diminution d'intensité de l'upwelling équatorial atlantique.

Ce schéma de variation est vérifié de 1983 à 1986, mais en 1987, bien que l'anticyclone reste bloqué à l'est tout l'été, comme en 1985, l'upwelling est très peu développé. Cette anomalie par rapport à la configuration qui ressort de la comparaison des situations des années 1983 à 1986 met l'accent sur le peu de

The situation between TEJ and AEJ became completely opposite to the one which was going to be maintained throughout the whole of the 1985 summer ; it was very similar to the one which was maintained during the whole of the 1982 summer.

As we have already seen on *figure 8*, the water vapour anomaly in lower Guinea is the strongest one observed over the eight years. At the same time, the amount of water vapour in the AEJ is rather average. As is the case of the SST, it appears that the variations of water vapour in the Sahelian area are more significant when expressed as a seasonal mean rather than as fortnightly values, according to our study method.

### C. The Saint-Helena anticyclone

Citeau and Al. (1992) compared the fields of water vapour obtained from the analyses carried out at ECMWF and the observations of the Meteosat water vapour channel. They concluded that one can reasonably assimilate the minimum water vapour with the position of the centre of the subsidence zone, linked to the Saint-Helena anticyclone, at the 500 hPa level (which, for simplification purposes, will from now on, be called the anticyclone centre), and that the results obtained from the data from the two sources mentioned above, are comparable. These observations are in agreement with the studies carried out by Desbois and Al. (1986) concerning the data provided by the Meteosat water vapour channel from 1983 to 1985.

*Figure 12* shows the variations in the longitudinal position of the centre of the Saint-Helena anticyclone for two typical years and 1984. The typical rainfall deficit 1983 year in Sahel is shown rather than 1982 one, since data processing, and therefore the processing of water vapour data, only began in 1983. During the second fortnight of August 1984, the water vapour minimum, which was closer to the African coast in the course of the other years, suddenly moved by 20° to 30° of longitude towards the Brazilian coasts. It remained near the African coasts during the whole of the 1985 summer. This shift of the Saint-Helena anticyclone in August 1984, might cause a decrease in the intensity of the south-east trade winds near the African coast, and give rise to a western flow in the central-southern region of the Atlantic Ocean, which is usually subject to an eastern flow (Mahé, 1992).

The shift of the centre of the anticyclone caused a series of meteorological modifications in the southern Atlantic. This shift can be related to the reduction in the intensity of the south-east trade winds, off the coasts of the South West Africa, to the transition of an eastern flow to a western flow in the central-southern Atlantic, and to the decrease in the intensity of the Atlantic equatorial upwelling.

This variations was confirmed from 1983 to 1986, but in 1987, although the anticyclone remained trapped in the east all through the summer, like in 1985, the upwelling was not very developed. This anomaly compared to the configuration which results from the comparison of the situations from 1983 to 1986,

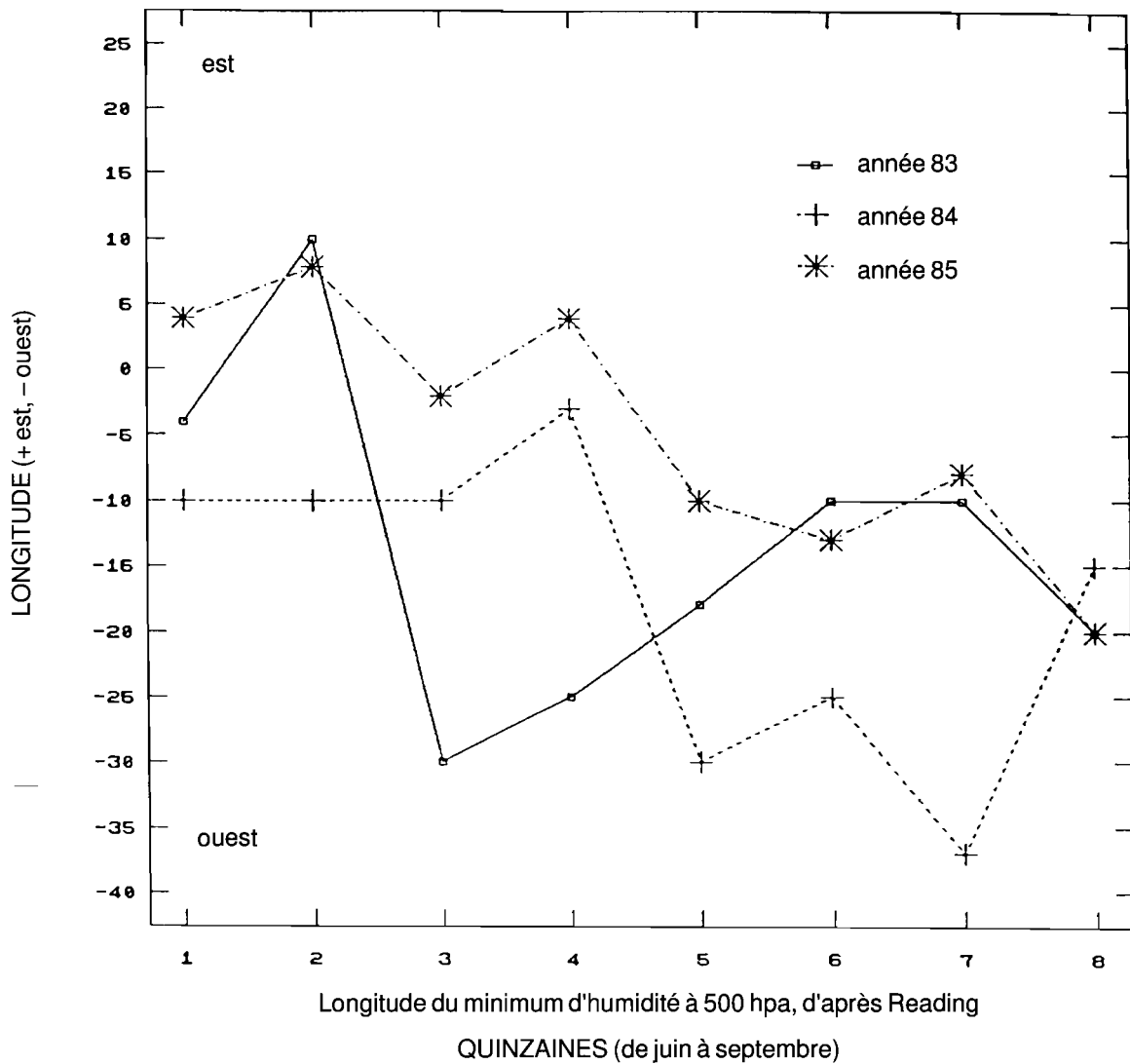


Figure 12 : LONGITUDES DU MINIMUM DE VAPEUR D'EAU (D'APRES LES ANALYSES DU CEPMMT, EN VALEURS BIMENSUELLES DE JUIN 1 À SEPTEMBRE 2, POUR L'ANNÉE 1984 COMPARÉE AUX ANNÉES 1985 ET 1983. Cette dernière remplace l'année 1982 comme année sèche type.

Figure 12 : LONGITUDES OF THE WATER VAPOUR MINIMUM (ACCORDING TO THE ANALYSES CARRIED OUT BY THE ECMWF), IN TERMS OF FORTNIGHTLY VALUES FROM JUNE 1 TO SEPTEMBER 2, FOR 1984 COMPARED WITH 1985 AND 1983. This last year replace 1982 as a dry typical year.

connaissance que nous avons des variations de pression au-dessus des océans et de l'Atlantique en particulier, et nous laisse penser qu'il serait intéressant d'étudier les variations d'intensité de l'activité de ces centres de pressions.

Ainsi malgré une position orientale favorable à un bon développement de l'upwelling équatorial, on peut penser qu'il y a peut-être au cours de l'été 1987 une diminution de pression dans le centre anticyclonique qui pourrait être à l'origine d'alizés moins soutenus.

emphasizes the few elements we have at our disposal concerning variations in pressure above the Oceans and the Atlantic in particular. It leads one to think that it would also be interesting to study the variations in the intensity of the activity of these pressure centres.

Therefore, despite an eastern position favourable to a good development of the equatorial upwelling, perhaps there is a decrease of pressure in the anticyclone centre during the 1987 summer, which could be the source of weaker trade winds.

## D. Récapitulation des résultats

Hormis l'anomalie positive de TSM à l'équateur qui a déjà été mise en corrélation avec un déficit pluviométrique au Sahel, les valeurs moyennes saisonnières de TEJ et d'AEJ sembleraient indiquer une pluviométrie plus favorable en 1984 au Sahel que ce qui a été observé. L'analyse conjointe des variations des pluies mensuelles et des variations bimensuelles des paramètres atmosphériques permet une description plus détaillée des relations entre les différentes variables durant la saison des pluies.

En été 1984 au Niger le déficit pluviométrique est modéré en juillet et très intense en août. L'upwelling équatorial est très peu développé, ce qui se traduit par une très forte anomalie positive de TSM dans les eaux équatoriales. Parallèlement l'AEJ se renforce en août, tandis que le TEJ faiblit. Enfin l'anticyclone de Sainte-Hélène se déplace en août vers le Brésil, très à l'ouest de la position moyenne des autres années 1983 à 1987.

## 5. CONCLUSION

Après l'analyse des résultats on peut remarquer que les corrélations entre valeurs annuelles ou saisonnières moyennes des paramètres étudiés ne suffisent généralement pas à décrire tous les types de répartition spatio-temporelle de pluies sur le continent. Les configurations des relations entre variables établies à cette échelle de temps ne sont valables que pour une partie seulement des événements observés. Pour diminuer la variance inexpliquée des observations, il est nécessaire d'effectuer des comparaisons mensuelles ou bimensuelles. On découvre ou redécouvre alors de façon précise l'influence d'autres paramètres sur la variabilité observée. C'est le cas de la position en longitude de l'anticyclone de Sainte-Hélène ou des vents en altitude.

Les variations météorologiques moyennes sur 15 jours peuvent avoir un poids prépondérant sur la variabilité des pluies saisonnières totales. En région sahélienne, il suffit en effet d'une période sans précipitations de quelques semaines au milieu de la saison des pluies, pour que le total annuel soit déficitaire ou insuffisant pour les besoins agricoles. On remarquera par ailleurs que la régularité des pluies est souvent la garantie d'une bonne récolte, plus que ne l'est le total de précipitations.

Ainsi, en 1982 et 1983 les conditions météorologiques d'altitude restent défavorables aux pluies au Sahel durant la presque-totalité de la saison des pluies. En 1984 au contraire, le début de la saison est plutôt moyen, mais la configuration évolue très rapidement en août vers une situation inhibitrice des pluies au Sahel, qui suffit pour faire de 1984 une des années les plus sèches du siècle au Sahel, sinon la plus sèche.

## D. Summarized results

Apart from the positive SST anomaly at the Equator, which has already been correlated with a rainfall deficit in the Sahel, the seasonal mean values of TEJ and AEJ would seem to indicate a more favourable rainfall distribution in the Sahel in 1984 than the one which has been observed. The combined analysis of variations in the monthly rainfall and the fortnightly variations of the atmospheric parameters, enabled a more detailed description of the relations between the different variables during the rainy season to be drawn up.

In Niger, in the summer of 1984, the rainfall deficit was moderate in July and very marked in August. The Equatorial upwelling was not very developed, which led to a very high positive SST anomaly in the Equatorial waters. At the same time in August, the AEJ increased while the TEJ decreased. Finally, the Saint-Helena anticyclone moved towards Brazil in August, very much to the west of the average position observed in the other years from 1983 to 1987.

## 5. CONCLUSION

Once the results had been analysed, one can notice that the correlations between the mean annual or mean seasonal values of the parameters studied, were generally not sufficient to describe all the types of spatio-temporal rainfall distribution encountered over the continent. The patterns of the relations between variables established on this time scale were only valid for some of the events observed. In order to decrease the unexplained variance of the observations, it was necessary to carry out monthly or fortnightly comparisons. Therefore, the influence of other parameters on observed variability was revealed or shown once more in a very precise manner. Such was the case of the longitudinal position of the Saint-Helena anticyclone or the high-altitude winds.

The average meteorological variations over fifteen days can have a prevailing influence on the variability of total seasonal rainfalls. In the Sahelian area, a few weeks without any rainfall in the middle of the rainy season are sufficient to cause the total annual rainfall either to be short or to be inadequate for the agricultural requirements. It can be noticed in other respects that steady rainfall rather than the total rainfall, is often the guarantee of a good harvest.

Therefore, in 1982 and 1983, the high-altitude meteorological conditions remained unfavourable to Sahelian rainfall during almost the whole of the rainy season. In 1984 on the contrary, the beginning to the season was rather average, but the pattern changed very rapidly in August towards a rainfall inhibitory situation in the Sahel, which was sufficient to make 1984 one of the most arid if not the most arid year in the Sahel since the beginning of the century.

## REFERENCES

- ADAMEC D. et O'BRIEN J.J., 1978. – The seasonal upwelling in the gulf of Guinea due to remote forcing. *J. Phys. Oceanogr.*, 8, 6 : 1050-1060.
- ARPE K. – Impacts of changes in the ECMWF analysis-forecasting scheme on the systematic error of the model. In : ECMWF workshop : 10 years of numerical forecast, pp. 69-114.
- ASPLIDEN C.I. et ADEFOLALU D., 1976. – The mean troposphere of West Africa. *J. Appl. Met.*, 15 : 705-716.
- BAH A., 1987. – Towards the prediction of sahelian rainfall from sea surface temperatures in the gulf of Guinea. *Tellus*, n° 39A : 38-49.
- CADET D.L. et NNOLI N.O., 1987. – Water vapour transport over Africa and the Atlantic ocean during summer 1979. *Quart. J. Roy. Met. Sci.*, 113 : 581-602.
- CITEAU J., DEMARCQ H., GORYL P. et MAHE G., 1992. – Contribution au suivi du climat des régions sahéliennes à l'aide de données satellitaires et d'analyses du Centre Européen. *La Météorologie*.
- CITEAU J., FINAUD L., CAMMAS J.P. et GOURIOU Y., 1986. – Questions about the ITCZ migration over the tropical atlantic, sea surface temperature in the gulf of Guinea and the runoff of Senegal river. *Proc. 6th Meteosat Sci. User's Meet.*, Amsterdam, 25-27 Nov. 1986, Vol. 2, 12 p, edited by Eumetsat, Darmstadt (RFA).
- COCHONNEAU G., HIEZ G. et SECHET P., 1991. – M.V.R. 1.4. Manuel de l'utilisateur de la méthode du vecteur régional. ORSTOM, Brasilia, 230 p.
- DE FELICE P., VILTARD A. et CAMARA M., 1982. – Vapeur d'eau dans la troposphère en Afrique de l'ouest. *La Météorologie*, VI<sup>e</sup> série, 29/30 : 129-134.
- DESBOIS M., PICON L., KARIYANGA T. et GNAMIEN B., 1986. – African climatology studies using Meteosat ISCCP B2 DATA. Report of the proceedings of the Meteosat scientific user's meeting, Amsterdam, the Netherlands, 25-27 november.
- DHONNEUR G., 1985. – *Traité de météorologie tropicale. Application au cas particulier de l'Afrique occidentale et centrale.* Direction de la météorologie. 151 p.
- DOSSEUR H., 1984. – Hydrologie, hydraulicité et climatologie. Tentative d'explication de l'insuffisance des précipitations en Afrique et d'autres régions du monde en 1983. Congrès de Lomé. 4-8 juin 1984. Union des Producteurs et Distributeurs d'Electricité en Afrique. EDF International. 55 p.
- DRUYAN L.M., 1991. – The sensitivity of subsaharian precipitation to Atlantic SST. *Climatic change*, 18 : 17-36.
- FLOHN H., 1964. – Investigations on the Tropical Easterly Jet. *Meteorol. Abhandl.* n° 4, 1-69.
- FONTAINE B., 1989. – Pluviométrie sahélienne et dynamisme atmosphérique ouest-africain. In : *Les hommes face aux sécheresses. Nordeste brésilien. Sahel africain* : 43-52.
- HASTENRATH S., 1991. – *Climate dynamics of the tropics updated edition from : climate and circulation of the tropics.* Atmospheric Sciences Library. Kluwer Academic Publishers. 488 p.
- HASTENRATH S., CASTRO (de) L.C. et ACEITUNO p., 1987. – The southern oscillation in the tropical Atlantic sector. *Beitr. Phys. Atmosph.*, 60, 4 : 447-463.
- HIEZ G., 1977. – L'homogénéité des données pluviométriques. *Cah. ORSTOM, Sér. Hydrol.*, vol. XIV, n° 2 : 129-172.
- HISARD P., 1980. – Observations de réponses de type "El Nino" dans l'Atlantique tropical oriental, golfe de Guinée. *Océanologica Acta*, 3, 1 : 69-78.
- HULME M. et TOSDEVIN N., 1989. – The Tropical Easterly Jet and Sudan rainfall : a review. *Theor. Appl. Climat.*, 39 : 179-187.
- JANICOT S., 1990. – 2<sup>e</sup> partie. Article 1 : climatologie descriptive des précipitations en Afrique de l'ouest. Thèse de doctorat, Univ. Paris 6, 93 p.
- JANICOT S., 1992. – Variabilité des précipitations en Afrique de l'ouest et circulations quasi-stationnaires durant une phase de transition climatique. 1<sup>re</sup> partie - Synthèse. Thèse de doctorat, Univ. Paris 6, 178 p + annexes.
- KANAMITSU M. et KRISHNAMURTI T.N., 1978. – Northern summer tropical circulations during drought and normal rainfall months. *Mon. Weath. Rev.*, 106 : 331-347.
- KATZ E.J., HISARD P., VERSTRAETE J.M. et GARZOLI S.L., 1986. – Annual change of sea surface slope along the Equator of the Atlantic ocean in 1983 and 1984. *Nature*, 322 : 245-247.
- KIDSON J.W., 1977. – African rainfall and its relation to the upper air circulation. *Quart. J. Roy. Met. Sci.*, 103 : 441-456.
- L'HOTE Y., 1990. – Notice complémentaire d'utilisation du logiciel M.V.R. ORSTOM, Laboratoire d'Hydrologie. 17 p.
- LAMB P., 1985. – Rainfall in subsaharian West Africa during 1941-83. *Zeit. Gletscherk. Glazialgeologie*, 21 : 131-139.

- LEROUX M., 1980. – Le climat de l'Afrique tropicale. Dakar. Thèse d'Etat. Université de Dijon. 3 tomes. 1.427 p.
- MAHE G. et 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, Septembre 1992 : 14 p.
- MAHE G., 1992. – 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, Université Paris-Sud-Orsay/ORSTOM, 385 p. + 151 p. annexes.
- MAHE G., DEMARCQ H. et CITEAU J., 1990. – Evolution des températures de surface de l'upwelling équatorial Atlantique de 1964 à 1988. *Veille Climatique Satellitaire*, n° 33 : 37-43.
- MAHE G., DEMARCQ H. et CITEAU J., 1992. – Evolution of the intensity of the equatorial atlantic upwelling from 1854 to 1990. Submitted to *Journal of Climate*.
- MOORE D.W., HISARD P., MACCREARY J., MERLE J. O'BRIEN J.J., PICAUT J., VERSTRAETE J.M. et C. WUNSCH C., 1978. – Equatorial adjustment in the eastern Atlantic. *Geophys. Res. Lett.*, 5, 8 : 637-640.
- NEWELL R.E. et KIDSON J.W., 1984. – African mean wind changes between sahelian wet and dry periods. *J. Climatology*, 4 : 311-348.
- NICHOLSON S.E., 1981. – Rainfall and atmospheric circulation during drought periods and wetter years in West Africa. *Mon. Weath. Rev.*, 109 : 2191-2208.
- NICHOLSON S.E., KIM J. and HOOPINGARNER J., 1988. – Atlas of african rainfall and its interannual variability. Department of Meteorology, Florida State University, Tallahassee, Florida, USA, 237 p.
- OLIVRY J.C., 1983. – Le point en 1982 sur l'évolution de la sécheresse en Sénégal et aux Iles du Cap Vert. Examen de quelques séries de longue durée (débits et précipitations). *Cah. ORSTOM, sér. Hydrol.*, XX, 1 : 47-69.
- SERVAIN J., PICAUT J. et MERLE J., 1982. – Evidence of remote forcing in the equatorial Atlantic ocean. *J. Phys. Oceanogr.*, 12 : 457-463.
- SIRCOULON J., 1976. – Les données hydropluviométriques de la sécheresse récente en Afrique intertropicale ; Comparaison avec les sécheresses "1913" et "1940". *Cah. ORSTOM, sér. Hydrol.*, XIII, 2 : 75-174.
- SIRCOULON J., 1986. – Caractéristiques de la sécheresse actuelle en Afrique de l'ouest et centrale. Considérations sur les stations pluviométriques de longue durée et les débits des rivières. In : Colloque international sur la révision des normes hydrologiques suite aux incidents de la sécheresse. Ouagadougou, 20-24 mai 1986. Comité Intrafricain d'Etudes Hydrauliques (CIEH), série Hydrologie.
- SIRCOULON J., 1990. – Aspects hydrologiques des fluctuations climatiques en Afrique de l'ouest et centrale. *Bul. O.M.M.* 380, 8 p.
- WRIGHT P.B., 1985. – Predictability of SST anomalies in the equatorial Atlantic T.O.A.N., 31 : 4-5.

Mahé Gil, Citeau Jean.

Relations océan-atmosphère-continent dans l'espace africain de la mousson Atlantique : schéma général et cas particulier de 1984 = Interactions between the ocean atmosphere and continent in Africa, related to the Atlantic monsoon flow general pattern and the 1984 case study.

Veille Climatique Satellitaire, 1993, (44), p. 34-54.

ISSN 1144-2026