

**CHAMPS THERMIQUES DE SURFACE
DE L'OCEAN ATLANTIQUE
CONVECTION ET FRONTS THERMIQUES
SUR LE CONTINENT AFRICAIN
ESSAI DE MISE EN RELATION**

J. Citeau, B. Guillot et J.P. Lahuec

INSTITUT FRANÇAIS DE RECHERCHE SCIENTIFIQUE

POUR LE DEVELOPPEMENT EN COOPERATION

ORSTOM

INITIATION – DOCUMENTATIONS TECHNIQUES
N° 66

TELEDETECTION 11

Edité avec le concours financier de IFREMER
(ATP Télédétection Spatiale, contrat 83/2999/Y)

O.R.S.T.O.M.
PARIS
1985

**CHAMPS THERMIQUES DE SURFACE
DE L'OCEAN ATLANTIQUE**

**CONVECTION ET FRONTS THERMIQUES
SUR LE CONTINENT AFRICAIN**

ESSAI DE MISE EN RELATION



J. Citeau, B. Guillot et J.P. Lahuec

**Antenne O.R.S.T.O.M.
Auprès du C.M.S. - LANNION - BP 147 - 22302 LANNION CEDEX**

PREAMBULE

La demande d'ATP que nous avons adressée au CNRS, (ATP CNES/CNRS « Télédétection Spatiale ») a été acceptée par le comité scientifique par lettre en date du 21 mars 1983. Elle a fait l'objet entre le CNEO et l'ORSTOM du contrat 83/2999/Y qui nous attribuait un financement de 75.000 francs, en soutien de programmes de recherche portant sur les interrelations océan-continent en Afrique de l'ouest et dans l'Atlantique intertropical. Ce soutien nous a été très utile, dans la mesure où il nous a permis notamment de faire face à la maintenance de l'atelier de traitement d'images « Menhir » du Centre de Météorologie Spatiale (CMS), atelier sans lequel il nous était impossible de continuer nos observations.

Cette publication a été rédigée conformément aux termes du contrat de l'ATP. Le travail qu'elle sous-tend, et le programme dont elle est issue dépasse cependant le cadre de ce financement, et il est évident que nous n'aurions pu aboutir sans l'apport actif et permanent de la Météorologie Nationale, des directeurs successifs du CMS, MM. LASBLEIZ et LE BERRE, et de l'ensemble du personnel du centre. Les travaux que nous conduisons exigent une observation continue, et le rassemblement de données provenant de réseaux météorologiques et d'observations satellitaires, toutes choses qui ne peuvent être faites que dans un observatoire du type de celui de Lannion. Derrière les quelques pages qui vont suivre se cachent l'analyse de milliers d'images satellitaires, des centaines d'heures de calculateur, et le recours à presque toutes les compétences du CMS, de l'acquisition des données à l'interprétation des résultats. Nous avons le sentiment d'avoir beaucoup demandé et d'avoir en échange beaucoup reçu.

Nous tenons enfin à remercier de leur appui le Ministère des Relations Extérieures, Coopération et Développement, en la personne de M. Bied-Charreton, et les services nationaux ou internationaux avec lesquels nous collaborons, notamment le Laboratoire de Météorologie Dynamique, le service météorologique du Mali, l'ASECNA, le Centre de Recherche Océanographique de Dakar-Thiaroye (CRODT), et le Centre Agrhymet de Niamey.

RESUME

Le programme de veille climatique est réalisé à Lannion par une collaboration entre l'antenne ORSTOM et le Centre de Météorologie Spatiale. Il a pour objet la création et l'interprétation de fichiers climatiques à partir de données satellitaires (Météosat, GOES Est, TIROS) et de données conventionnelles (température de surface de la mer, pluviométrie, etc.); nous surveillons plus particulièrement :

- la température de surface de la mer : upwellings, anomalies chaudes ou froides ;
- la position en latitude de la Zone InterTropicale de Convergence (ZITC) à 28° ouest ;
- les champs thermiques de surface en Afrique de l'ouest ;
- la convection profonde sur le continent, par une cartographie des fréquences de nuages convectifs.

Les mouvements saisonniers de la zone de convergence à 28° ouest ont permis de distinguer deux types d'années : des années « froides », liées à une forte activité de l'anticyclone de Sainte-Hélène et à un upwelling équatorial intense, et des années « chaudes ». On a pu ainsi opposer l'année 1983, froide, à 1984, année chaude, et prédire avec quelques mois d'avance que 1984 serait une année chaude. L'interprétation des champs thermiques, de la convection, et de la pluviosité dans certaines régions (Côte-d'Ivoire, Gabon) montre entre ces années des différences importantes de comportement.

On en conclut que la température de surface de l'Atlantique intertropical peut être analysée de façon efficace, et qu'elle constitue un paramètre climatique important, en cas de forte anomalie, dans toutes les zones côtières, soumises à l'impact direct de la mousson ouest-africaine ; pour les régions situées au-delà de 8-10° nord elle ne constitue par contre qu'un élément d'analyse parmi d'autres.

Le programme est tourné vers des objectifs d'application immédiate, qui se traduisent par l'édition d'un bulletin bimestriel, et une orientation vers une observation aussi précise que possible, en temps réel, de la convection en Afrique intertropicale.

ABSTRACT

The climatic monitoring program (Veille Climatique) is realized in Lannion due to the collaboration of ORSTOM and the « Centre de Météorologie Spatiale ».

The objective is to document and to interpretate climatic files from satellite (Meteosat, GOES Est, TIROS) and conventional data (sea surface temperature, rainfall, etc.). Four parameters are monitored with a particular attention :

- the sea surface temperature (SST) and consequently upwellings and cold or warm anomalies ;
- the position of the ITCZ (Intertropical Convergence Zone) along 28°W meridian ;
- the surface thermic fields in West Africa ;
- the deep convection by the mean of a cartography of convective clouds frequency.

The monitoring of seasonal shifts of the ITCZ along 28°W allows to distinguish two types of years : on one hand, « cold » years which are related to an intense activity of the Ste Hélène anticyclone and to an intense equatorial upwelling, and, on the other hand, « warm » years.

According to this scheme, it was possible to set 1983, a « cold » year, against 1984, and therefore to predict, as early as the beginning of this last year, that it would be a « warm » one.

The interpretation of thermic fields, deep convection and rainfall in some regions such as Ivory Coast and Gabon shows important differences of behaviour. This leads to conclude that the surface temperature of the intertropical Atlantic ocean can be analyzed in an useful way. Undoubtly, in case of strong anomalies, it is an important climatic parameter, for all coastal areas under direct impact of the west african monsoon. On the other hand for northern regions, beyond 8-10°N, it only constitutes one of analysis among many others.

The achievement of this program answers to aims of immediate application :

- an issue is published every two months ;
- real time observations as precise as possible of the deep convection in Intertropical Africa.

CHAMPS THERMIQUES DE SURFACE DE L'OCEAN ATLANTIQUE, CONVECTION ET FRONTS THERMIQUES SUR LE CONTINENT AFRICAIN

Essai de mise en relation

INTRODUCTION

Les recherches que nous avons conduites au Centre de Météorologie Spatiale de Lannion ont été favorisées par une triple rencontre, entre une vue océanographique des phénomènes, un point de vue « ruraliste » spécialement attaché aux problèmes du continent, et une volonté commune de promouvoir une observation scientifique par les moyens de la télédétection, dans un observatoire outillé pour cela, pour les besoins de la météorologie et de la climatologie.

Conformément au plan initial que nous nous étions tracé, nous avons conduit une observation systématique, en temps réel, des champs thermiques de surface de l'océan, par le biais de l'expérience listao, reprise ensuite en phase opérationnelle, et sur le continent.

Les données rassemblées ont permis une cartographie des principaux événements tels que : anomalies, chaudes ou froides, sur l'océan, et évolution saisonnière, en latitude, des fronts thermiques séparant, sur le continent, les zones sèches et chaudes (de jour) des zones humides plus fraîches. D'autres observations ont complété notre réseau d'information : évolution en latitude de la Zone Intertropicale de Convergence (ZITC) à 28° ouest, étude des fréquences d'amas convectifs, données de surface (température, pluviométrie).

Il se dégage de ce faisceau d'observations certaines indications, sur les interrelations océan-continent, et sur les zones terrestres où l'influence de l'océan Atlantique semble importante pour la compréhension du climat ; des éléments prédictifs, présentés à titre provisoire, étant donné la trop brève durée des observations et le caractère encore très incomplet de notre information, ont été reconnus.

Notre programme, repris sous la forme d'une « veille climatique », continue ; un bulletin bimestriel, financé par le Ministère des Relations Extérieures, Coopération et Développement, en diffuse régulièrement les résultats. Un gros effort reste à faire, tant au plan de la recherche, que du travail opérationnel, si l'on veut aboutir à créer des produits utilisables par les services nationaux ou internationaux qui ont en charge les problèmes des pays concernés.

1. Création de fichiers d'observation. Problèmes de méthode et de mise en forme des résultats.

1.1. Le traitement des données Météosat.

Le traitement en temps réel des données du satellite géostationnaire européen Météosat (1) est effectué en vue d'alimenter quatre fichiers climatiques sur :

- la position en latitude, à 28° ouest, de la zone intertropicale de convergence ;
- les anomalies de température de surface de l'océan Atlantique intertropical jusqu'à 40° ouest ;
- les champs thermiques de surface (température radiative) en Afrique de l'ouest ;
- la répartition dans l'espace, dans une grille de 2° de côté, des fréquences d'apparition d'amas convectifs.

1.1.1. Température de surface de la mer. L'opération listao et ses prolongements.

1.1.1.1. Traitement des données infra-rouge Météosat.

Dans le cadre du programme de recherche sur le thon Atlantique listao, des biologistes (ORSTOM, CNEXO, GSG) ont saisi l'opportunité de remettre à jour une chaîne d'exploitation et de diffusion des données satellitaires, conjointement aux campagnes à la mer, pendant l'année « listao » (1981). Le but était de fournir en temps réel des champs thermiques de surface de l'Atlantique intertropical au bureau d'aide à la pêche d'Abidjan, et un complément d'information sur les paramètres de l'environnement de cette espèce de thonidé.

L'utilisation des données de la fenêtre de 10 à 12 μm de Météosat II était sur l'Atlantique tropical la seule information accessible en temps réel, et la plus simple à traiter du fait de l'identité des plans de projection des différentes images ; en outre la répétitivité horaire des données disséminées par la station de Darmstadt autorisait un large choix, pour l'heure des acquisitions à adapter à la couverture nuageuse. Les seules limites étaient les capacités d'acquisition et de traitement.

Conscients des insuffisances de l'unique fenêtre de 10 à 12 μm , qui n'autorise pas directement de correction atmosphérique de la mesure, nous avons eu recours à d'autres données, notamment des bateaux marchands, pour le calage en température des champs thermiques obtenus.

Le traitement choisi avait pour but de dégager au maximum le champ de vue ; il est basé sur des hypothèses simplificatrices, les principales étant que les champs thermiques de surface varient beaucoup moins vite dans le temps que les structures atmosphériques, et que leur température, de jour et à ces latitudes, est constamment supérieure à celle des nuages. Le pas de temps choisi a été la semaine, en conformité avec les documents fournis par la NOAA (cartes GOSSTCOMP et NWS) (2), qui servent en partie à étalonner nos mesures. Nous avons traité deux, puis trois images quotidiennes, suivant une méthodologie mise au point par le bureau de télédétection de l'ORSTOM, qui permet de réaliser les synthèses multitemporelles et de les comparer aux données discrètes des messages des bateaux. Parmi les procédures disponibles pour obtenir des champs de « radiance claire », il est apparu rapidement que la routine la plus simple (extraction du maximum de température) donnait les meilleurs résultats aux « moindres frais ».

(1) Nous avons utilisé aussi des données d'archive du satellite géostationnaire GOES EST, en place à 75° ouest de 1974 à 1984, et des satellites à défilement TIROS antérieurement à 1974.

(2) La NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) fournit en temps réel des cartes de température de surface de la mer établies à partir de données satellitaires (GOSSTCOMP = Global Observation Sea Surface Temperature Computer) et de données des bateaux (NWS = National Weather Service), à résolution spatiale médiocre, mais qui couvrent l'océan mondial.

1.1.1.2. Calage en température et calibration.

L'adjonction des vérités-mer est un des moyens pour établir un champ de température. Elle est d'une grande efficacité au large des côtes du Sénégal, et le long du rail de navigation Dakar-Le Cap, où les données sont abondantes. Par chance celles-ci couvrent des zones déterminantes, où les variations de température dans l'année sont parmi les plus fortes : zones de remontées froides (« upwellings ») de la côte sénégal-mauritanienne, et upwelling équatorial. Ailleurs l'incertitude est beaucoup plus grande. De grandes étendues du golfe de Guinée, en saison chaude, restent inaccessibles à l'observation infra-rouge de météosat, qui restitue alors davantage, même en radiance claire, un champ d'humidité qu'un champ de température.

La parade consiste alors à utiliser les quelques données des bateaux, et la climatologie car à cette époque le champ thermique est très « plat », avec de faibles gradients ; la même remarque vaut pour l'utilisation des cartes globales (NWS), qui sont alors d'un grand intérêt. Par contre en saison d'upwelling équatorial (d'avril-mai à août-septembre) l'imagerie Météosat traduit bien plus fidèlement que tous les autres documents les événements marquants : dates de début des refroidissements, évolution temporelle rapide, dans la vie de l'upwelling et dans son extension spatiale, qui est une donnée très variable, suivant les années.

Les cartes globales et les vérités-mer ont servi pendant deux ans à la calibration radiométrique (1). Depuis juin 1984 nous utilisons les données de calibration fournies par Darmstadt dans les formats disséminés avec l'aide du centre d'intercalibration des satellites, implanté au CMS par N. Bériot (2).

1.1.1.3. L'opération d'aide à la pêche.

Nous avons mis un terme à l'expérience d'aide à la pêche, que nous avons inaugurée en août 1981, et poursuivie jusqu'en octobre 1982. Depuis février 1984 un service opérationnel élabore un produit très semblable au nôtre ; la météorologie nationale prend en charge l'acquisition et le traitement des données, satellite et bateau, et la confection de la carte. L'antenne ORSTOM de Lannion a en charge le suivi scientifique et une aide à l'interprétation. La recherche-développement devrait être conduite par une collaboration entre l'ORSTOM et l'équipe de recherche du CMS ; enfin, IFREMER a fourni au CMS une console de traitement d'image Péricolor 2000.

Les synthèses infra-rouge hebdomadaires sont traitées en temps réel, et couvrent une période de sept jours, du jeudi au mercredi ; elles sont interprétées et comparées aux données des bateaux, pour la fabrication d'une carte envoyée chaque vendredi sur le réseau fac-similé de la Météorologie Nationale.

(1) Aux périodes de variations rapides, heureusement assez rares, et de courte durée, de la sensibilité du radiomètre, les images d'une même synthèse ont été intercalibrées entre elles par des méthodes interactives, ou faisant appel à des histogrammes, sur des zones tests.

(2) Le Satellite Calibration Center (SCC) est une création du programme climatique mondial ISCCP (International Satellite Cloud Climatology Project) ; il a pour objectif de rendre comparable entre elles les données des satellites météorologiques, les satellites à défilement NOAA servant d'étalon.

1.1.2. Température radiative apparente sur le continent.

Pendant une bonne partie de l'expérience listao les conditions de travail étaient telles (traitement d'images directement reçues du satellite, non calibrées et non naviguées) que nous nous sommes limités à des secteurs d'images centrés sur les zones marines critiques, du cap Blanc à Luanda, au large des côtes, sur une distance de 2.000 à 2.500 kilomètres (fig. 1 : zone d'intérêt de l'opération listao), et les synthèses ne portaient que sur quelques images (4 à 7, au plus).

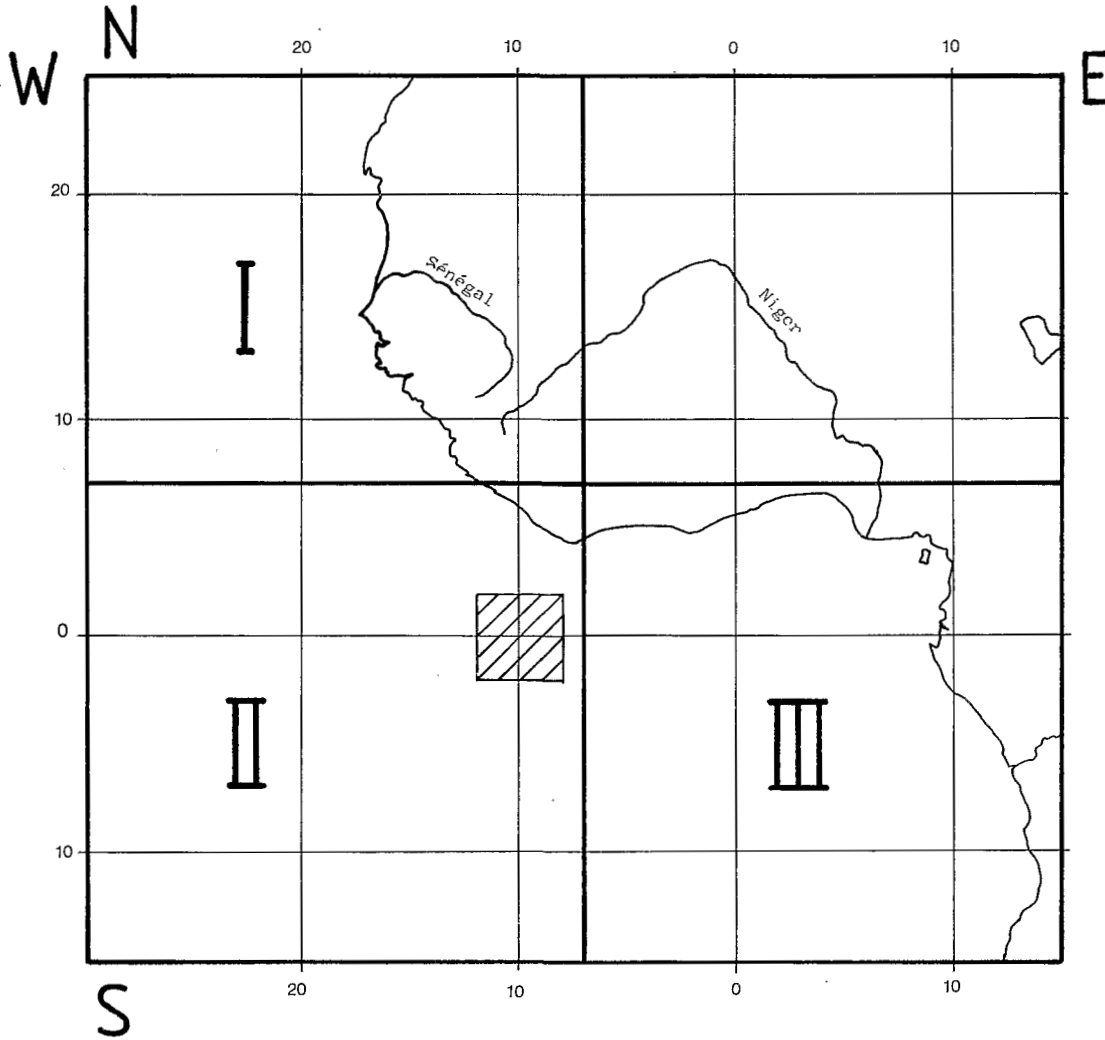


Fig. 1 - Zone couverte par l'opération listao.



Zone de calcul d'anomalies de température de surface



Secteur Sénégal



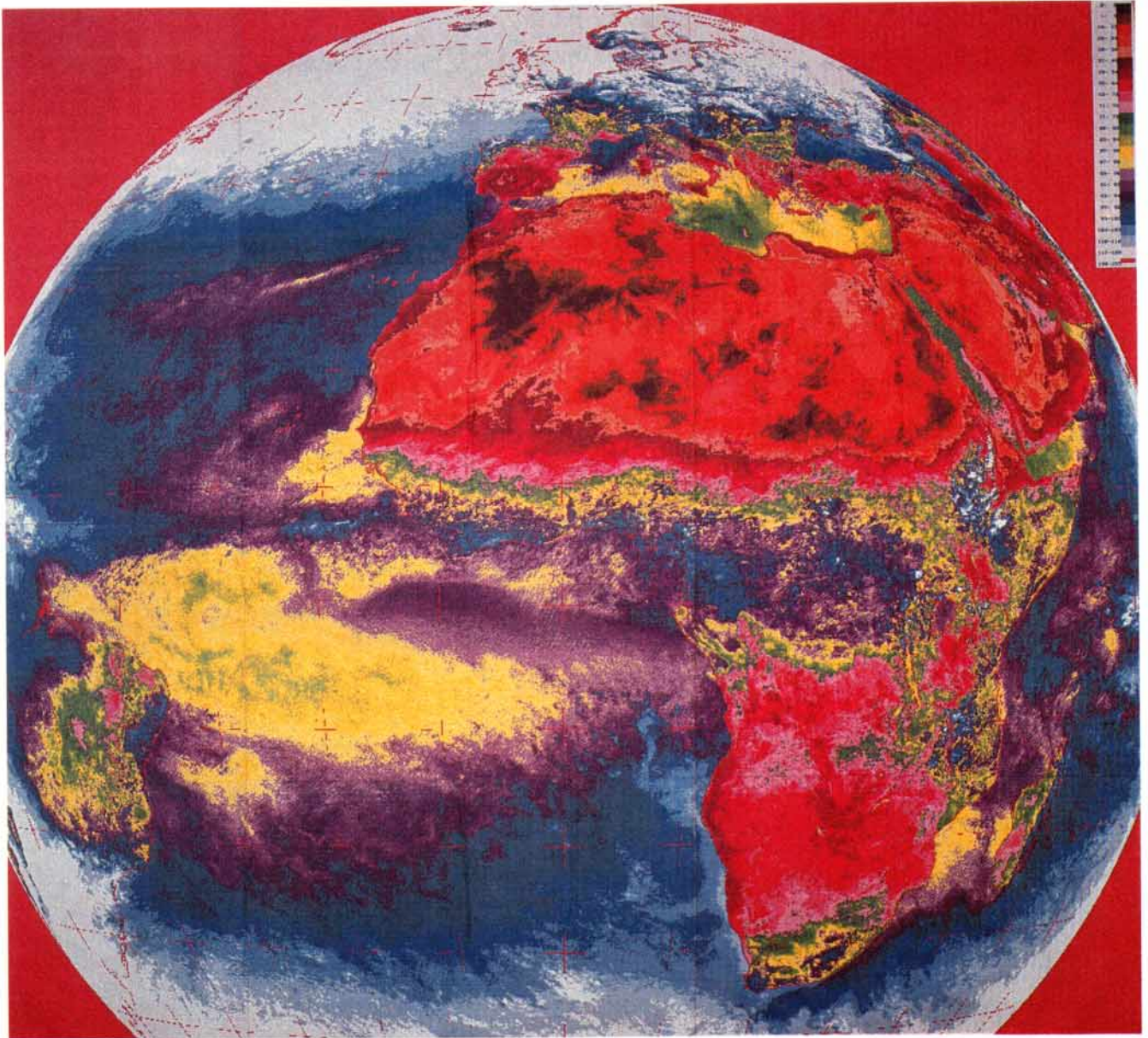
Secteur sud-ouest



Secteur Guinée

PLANCHE I

Synthèse infra-rouge thermique Météosat
du 17 au 23 juin 1982



Images à 11 h 30, 14 h 30 et 15 h 30 TU. Les couleurs symbolisent des niveaux de température de surface échelonnés du chaud, en noir. ($\approx 65^{\circ}\text{C}$) au froid (blanc) suivant l'échelle indiquée en haut à droite.

L'acquisition des premières images naviguées, en avril 1982, permit de traiter davantage d'images : deux par jour jusqu'en 1983, trois par jour depuis 1984, et d'élargir le champ de vue. L'observation des zones terrestres a commencé en mai 1982, dans la partie continentale du secteur maritime sénégal-mauritanien ; la première synthèse globale (plein disque météosat) en pleine résolution fut réalisée en juin (17 au 23 juin 1982) (planche I).

Sur cette photographie on remarque une différence importante entre les zones très chaudes (tons noirs, gris et ocres) qui correspondent à peu près au Sahara, et les régions situées plus au sud, qui sont nettement plus fraîches. Entre elles une zone de transition étroite, un front thermique, en rouge, s'étire zonalement, d'ouest en est. Des coupes nord-sud dans les données (fig. 2) montrent que cette pente thermique forte est séparée des paliers qui représentent les secteurs chaud et froid par des discontinuités nettes, que l'on peut qualifier de bord chaud et froid du front.

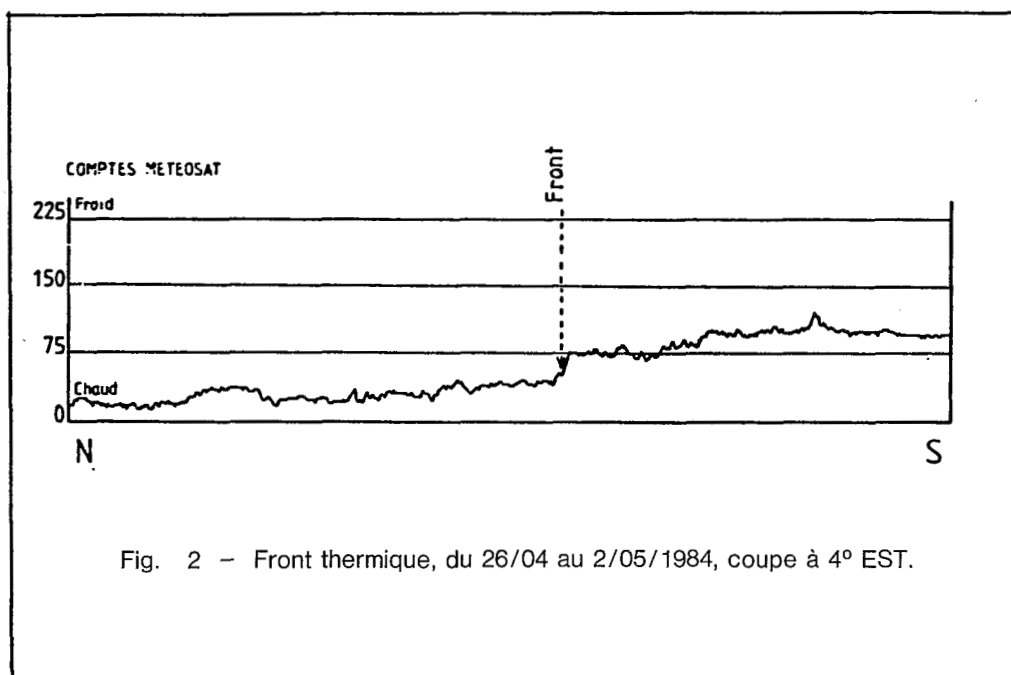


Fig. 2 - Front thermique, du 26/04 au 2/05/1984, coupe à 4° EST.

On peut avancer, sans grand risque de se tromper, que les températures diurnes chaudes correspondent aux sols dénudés et secs, à faible inertie thermique, que la zone de transition connaît un dégradé rapide, du nord au sud, de l'humidification, et que les températures plus fraîches représentent la réponse des sols humides et à végétation dense, à forte inertie thermique (1).

Pour suivre ces fronts dans le temps nous avons élaboré des synthèses du même genre, mais d'un format plus réduit (échantillonnage 1 point sur 4) en octobre 1982 (du 21 au 27), puis tous les mois à partir de janvier 1983. Des fichiers plus restreints (1 point sur 16) ont été créés chaque semaine à partir de mai 1983 ; depuis le mois de mai 1984 les synthèses sont faites chaque semaine en pleine résolution, avec quelques interruptions, au centre de calcul du CMS ; elles servent de fichiers de base au service d'aide à la pêche et au programme de veille climatique.

(1) La contribution de l'atmosphère joue sans doute aussi un rôle important, que nous n'avons pas évalué. Elle augmente encore les contrastes.

1.2. Extension en latitude de la Zone Intertropicale de Convergence (ZITC).

Les synthèses thermiques globales sont précieuses aussi pour situer la ZITC, car les ciels qui lui sont liés sont, même par beau temps, encombrés de nuages cumuliformes, et ils se traduisent par des réponses radiatives fraîches quasi permanentes (tons violets, bleus et blanc sur la photographie). Des fronts thermiques situent les limites nord et sud de la zone de convection sur le continent, et sur l'océan celle-ci (ou plutôt le maximum de nébulosité qui lui est lié) est aisément repérable par un liséré froid (en bleu et blanc) subsistant au-dessus des eaux chaudes. Nous étudions la convection sur l'ensemble des images par une analyse des types de nuages qui lui sont associés (principalement les amas convectifs cumuliformes), et par le repérage de sa position en latitude sur l'océan.

1.2.1. Position en latitude de la ZITC à 28° ouest.

La zone intertropicale de convergence dans l'océan Atlantique est normalement unique, et formée d'un arc reliant les côtes d'Afrique aux Caraïbes ; c'est ce qu'on peut appeler la branche nord ; la branche sud, beaucoup plus rare, forme un arc identique, entre 5 et 10°, de l'Afrique au nord-est du Brésil.

On peut admettre qu'elle représente la zone de basses pressions qui délimite les domaines d'influence des anticyclones de Sainte-Hélène et des Açores, et la zone de convergence des vents. Aussi nous avons admis que la position du minimum de vent, limite des flux d'alizés de nord-est et de sud-est (ou du flux de mousson du sud-ouest issu de l'alizé du sud-est) pouvait être déduite de la position de la Zone InterTropicale de Convergence (ZITC).

Nous avons également noté que le maximum de nébulosité suit assez fidèlement les déplacements en latitude de la ZITC ; on peut citer à l'appui de cette affirmation la documentation Air France (1963), établie à l'usage des pilotes, qui indique que « le FIT, front intertropical est la limite nord de la masse humide, i.e. la surface de contact entre le flux saharien de NE (souvent appelé harmattan) et le flux de SW souvent appelé mousson de Guinée... Il ne se passe rien le long de la trace au sol du FIT... C'est nettement plus au sud (150 à 300 km) que se trouvent les nuages à développement vertical important (1).

Plus récemment Hastenrath et al (1977) indiquent qu'en mer le maximum de nébulosité est constamment décalé au sud de la zone de discontinuité de vent, en juillet-août. L'atlas établi par ces auteurs permet de constater qu'en fait le minimum de vent est au sud du maximum de nébulosité de décembre à juin, et au nord de juillet à novembre (fig. 3).

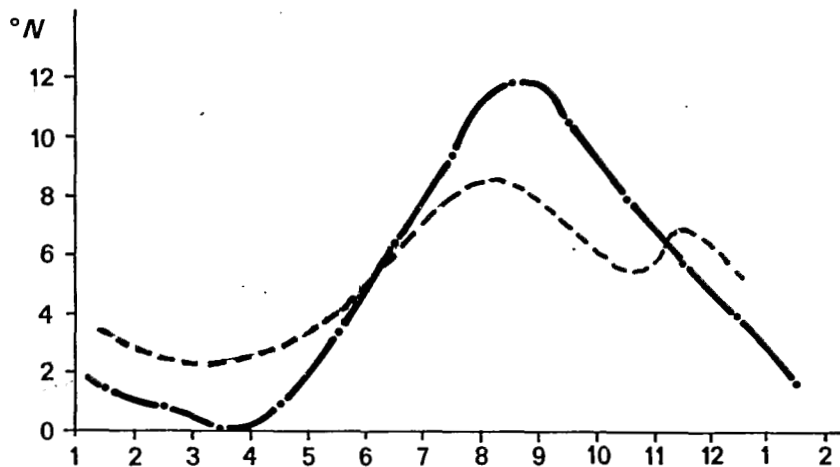


Fig. 3 – Position du minimum des vents alizés (trait continu) et position du maximum de nébulosité (trait tireté) le long du 28°W (d'après les données de l'Atlas d'HASTENRATH (HASTENRATH et al., 1977).

(1) La distinction entre FIT et ZITC n'est pas toujours précise ; le FIT est le front marquant les changements de direction du vent ; la ZITC désigne la zone perturbée au sud du FIT.

Munis de ce schéma simplificateur nous avons entrepris un repérage systématique de la position en latitude du maximum de nébulosité à 28° ouest, c'est-à-dire à mi-chemin des côtes de l'Afrique et du Brésil (1). Les satellites constituent pour cela un instrument privilégié ; nous avons utilisé diverses méthodes et divers satellites : essentiellement les synthèses numériques et les photographies de Météosat II en 1982-84, les photographies de Météosat I et de GOES EST de 1981 à 1974, et des satellites à défilement de la NOAA avant cette date (opération en cours).

1.2.2. Analyse des nuages convectifs et établissement de cartes de fréquence.

L'analyse des nuages convectifs est conduite à partir de l'imagerie visible et infra-rouge de Météosat. Elle a été pratiquée dès les débuts de Météosat I par Berthou et Noyalet, qui ont utilisé pour cela les méthodes de discrimination des nuages mises au point pour les besoins de la néphanalyse. Le principe de cette analyse repose sur la comparaison des brillances des nuages, en fonction de leur température (infra-rouge) ou de leur plus ou moins grande opacité (visible). Aux latitudes intertropicales et pour mettre en évidence la convection profonde, le principal problème est de distinguer, au sein des amas convectifs, les cirrus, froids et transparents, des cumulonimbus, froids et opaques ; secondairement les stratus, brillants dans le visible, sont discriminés par leur température plus élevée dans l'infra-rouge. Par une comparaison des photographies on arrive ainsi à isoler les cumulonimbus, et à en dessiner les contours.

Pour obtenir une idée de l'intensité de la convection, Berthou et Noyalet ont créé une grille d'analyse de 2° de côté, entre 20° nord et 20° sud, et ils ont noté, image par image, les occurrences successives d'amas convectifs présents dans les aires ainsi décrites. Les résultats, comptabilisés par mois et par an, donnent des cartes de fréquence de convection, de 50° est à 20° ouest (2).

Nous avons repris ce travail avec les données de Météosat II, d'octobre 1982 à mars 1985, et nous le poursuivons. Cependant les cartes ainsi obtenues pèchent par la faible quantité de l'information recueillie : une image par jour, face aux variations diurnes extrêmement rapides de la convection, et par la faible résolution géométrique. La méthode de discrimination elle-même est lourde et imprécise, et inutilisable de nuit, où le visible fait défaut. Nous mettons actuellement au point, avec l'aide du Laboratoire de Météorologie Dynamique et des néphanalystes du centre, une méthode d'analyse numérique qui permettrait de n'utiliser que l'imagerie infra-rouge, de multiplier les analyses quotidiennes, et d'augmenter la précision géométrique. L'objectif à court terme est de repérer rapidement et précisément les zones à problème, et à plus long terme d'estimer par ce biais les précipitations, par interpolation avec les données du réseau des pluviomètres.

(1) Les influences continentales, notamment le relief, introduisent une extension considérable en latitude de la ZITC, ce qui rend totalement impossible un quelconque repérage sur le continent et dans les zones proches des côtes.

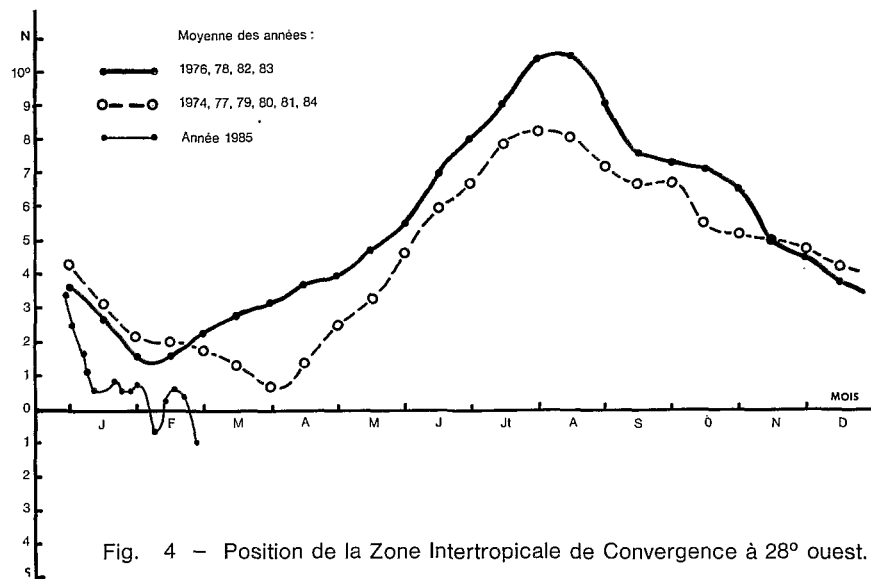
(2) Les images acquises à Lannion à cette époque (format M) étaient limitées à 20° ouest.

2. Suivi des événements climatiques et interrelation océan-continent.

Les études climatiques exigent de longues durées d'observation avant que puissent être définies des situations moyennes, et des anomalies jugées significatives. Certains de nos fichiers atteignent presque déjà cette dimension, comme la position en latitude de la ZITC ; d'autres, comme les fronts thermiques, ou les fréquences d'amas convectifs, en sont encore très loin. On peut cependant en comparer les résultats en valeur relative à des fichiers de données « externes » conventionnelles bien établies : température de surface de la mer, pluviométrie.

En outre, à défaut de longues séries de données, notre veille a eu la chance d'observer de 1982 à 1984, des situations climatiques extrêmes fournissant des références d'évaluation.

2.1. Position en latitude de la ZITC et température de surface de la mer.



2.1.1. Mouvements de la ZITC à 28° ouest.

Les courbes tirées de l'observation de la position en latitude de la ZITC ont été regroupées sur la figure 4. Deux caractéristiques ont été identifiées :

- la date à partir de laquelle la zone de convergence, ayant atteint sa position la plus au sud, remonte ensuite de façon monotone vers le nord ;
- la position la plus au nord atteinte au cours de l'été boréal.

Ces critères ont permis de mettre en évidence deux familles de courbes ; les années 1974, 1977, 1979, 1981, 1984 (et 1985 pour ce qui est du premier critère) peuvent être regroupées, car la remontée de la zone de convergence se situe en fin mars, début avril pour les années 1977, 1979, 1981 et 1984 ; à la mi-avril pour l'année 1974. La position la plus au nord a été atteinte aux latitudes 9N, 8N, 8N, 9N et 9N pour ces différentes années.

On peut regrouper de la même manière les années 1976, 1978, 1982 et 1983 ; la remontée de la ZITC a eu lieu très tôt par rapport aux autres années : mi-février ; la position la plus au nord a été respectivement de 10N, 10N, 10N et 12N, soit en moyenne de deux degrés supérieure à la moyenne de la famille précédente.

L'année 1975 ne peut être rangée simplement dans l'une ou l'autre famille. En 1980 la ZITC a atteint sa position la plus au sud à la mi-février, mais s'y est maintenue (en moyenne) jusqu'à la fin mars ; par la suite au cours de sa migration vers le nord elle n'a pas dépassé 8°N, ce qui nous autorise à classer cette année plutôt dans le premier groupe.

La zone de convergence étant la zone de basses pressions limitant les domaines d'influence des anticyclones de Sainte-Hélène et des Açores, il semble assez logique de supposer que les deux familles de courbes traduisent des rythmes saisonniers annuels différents entre ces centres d'action, et que les années de remontée précoce et intense vers le nord correspondent à une prépondérance de l'anticyclone de Sainte-Hélène, et les autres à un affaiblissement relatif de son influence. Les enregistrements de vent effectués au rocher Saint-Paul (position voisine de 0°, 30° ouest) confirment en tout cas les conclusions que nous avons précédemment tirées ; la figure 5 illustre des documents aimablement communiqués par S. GARZOLI (Lamont Observatory), et sur lesquels la variation dans le temps de la tension de vent ainsi que sa composante zonale indiquent que l'intensification (par départ vers le nord de la ZITC, et retour de l'influence de l'anticyclone de Sainte-Hélène) a eu lieu au mois de mai (125^e jour) en 1979 (année de la première famille de courbes), et qu'en 1983 (année de la deuxième famille) cette intensification s'est produite en avril (90^e jour environ). Ces décalages dans le temps sont à rapprocher des remontées vers le nord de la ZITC, repérées respectivement en avril 1979 et en février 1983. De même en 1984, des documents de la même origine montrent que l'intensification de la composante zonale du vent a eu lieu début mai, en relation avec un déplacement vers le nord de la ZITC noté en avril.

Les données actuellement disponibles sur cette question sont regroupées sur le tableau 1.

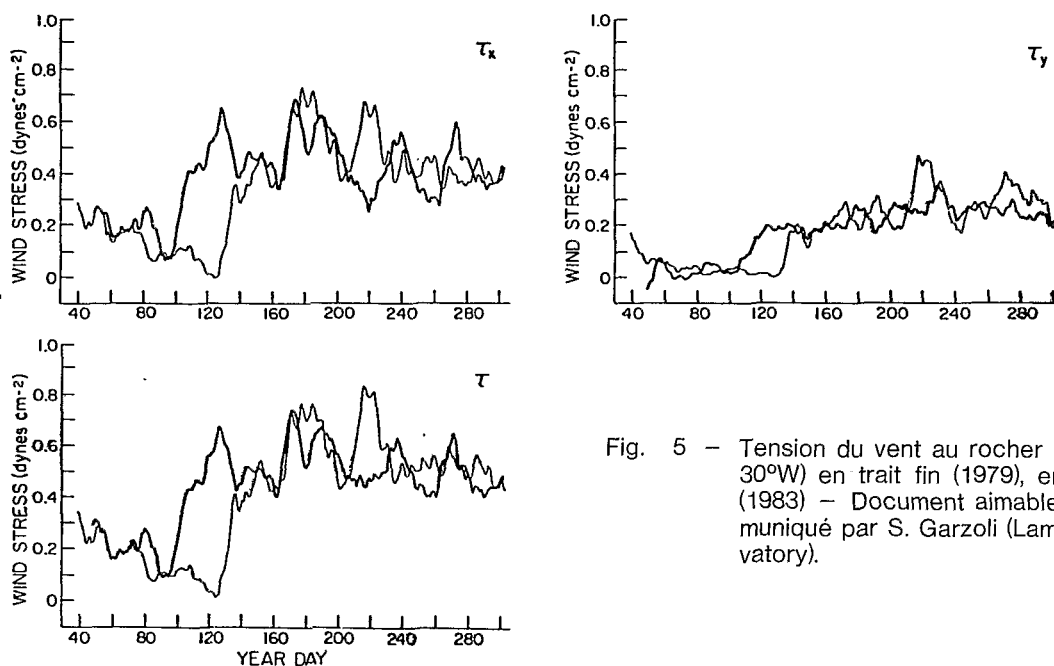


Fig. 5 - Tension du vent au rocher St-Paul (0°, 30°W) en trait fin (1979), en trait gras (1983) - Document aimablement communiqué par S. Garzoli (Lamont Observatory).

Années	Date de la remontée de la ZITC	Date de l'intensification de Tx*
1974	30 avril	15-30 mai
1975	février puis mai	15-30 mars
1976	28 février	15-30 mars
1977	01 avril	15-30 mai
1978	imprécis activité dominante de Sainte-Hélène	
1979	01 avril	début mai
1980	01 avril	non disponible actuellement
1981	01 avril	id
1982	31 janvier	id
1983	31 janvier	début avril
1984	01 avril	début mai

Tableau 1 : Remontée de la ZITC et intensification de la composante du vent.

* Cf. figure 5

2.1.2. Mouvements de la ZITC et température de surface.

Les observations précédentes sont en elles-mêmes pleines d'intérêt, mais elles prennent un bien plus grand relief encore si on les met en rapport avec la température de surface de l'Atlantique intertropical ; il semble en effet que d'une manière générale le refroidissement équatorial soit lié, dans le temps et en intensité, à la remontée de la ZITC, et que les années d'upwelling fort (1978 et 1982) la région équatoriale reste plus longtemps sous l'influence des hautes pressions de l'anticyclone de Sainte-Hélène (fig. 6), l'espace hachuré intégrant cette position de la ZITC en fonction du temps étant bien plus grand ces années-là.

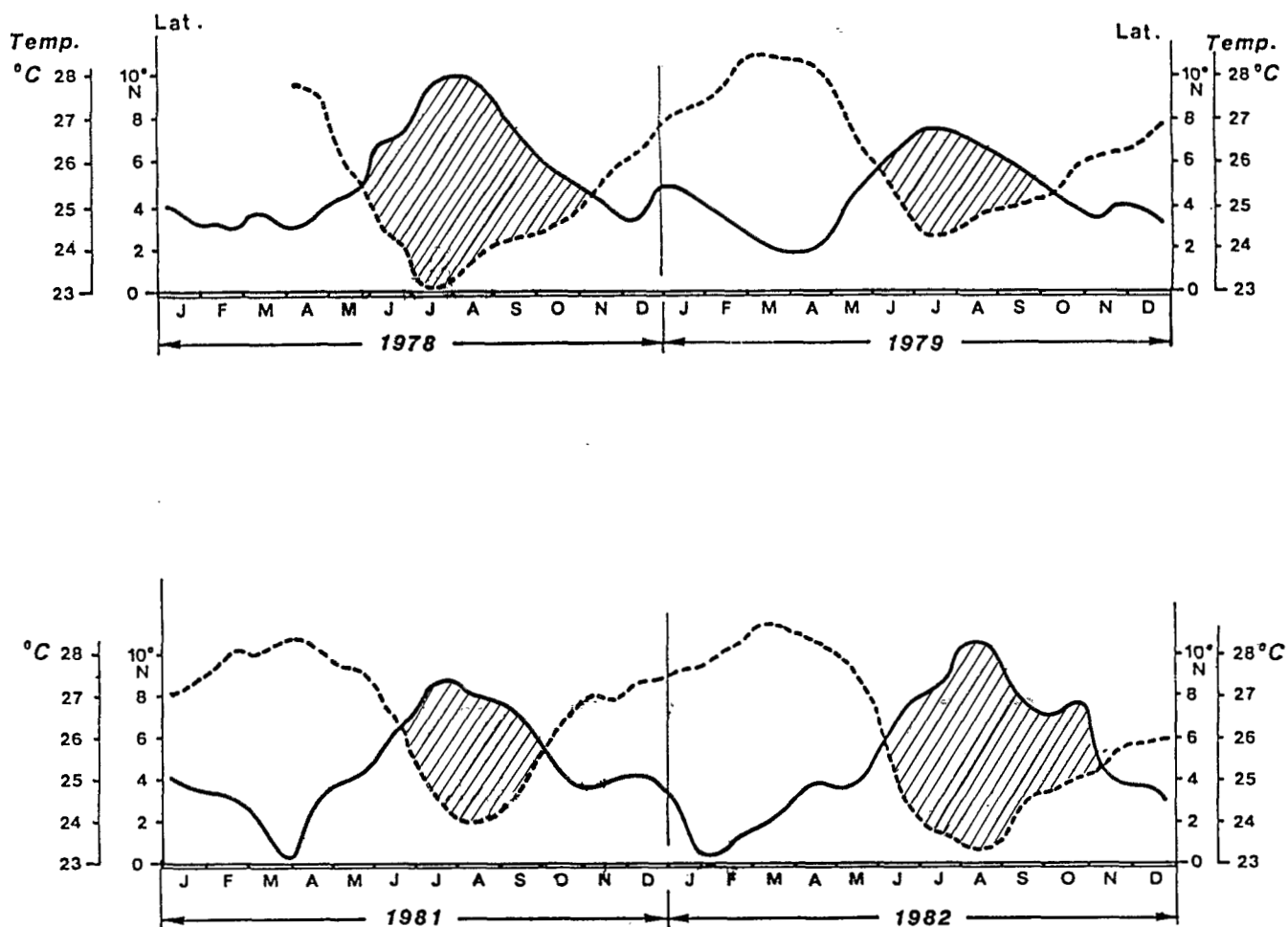


Fig. 6. — Position de la ZITC à 28° W et température moyenne de surface de la mer entre 4° N et 5° S.

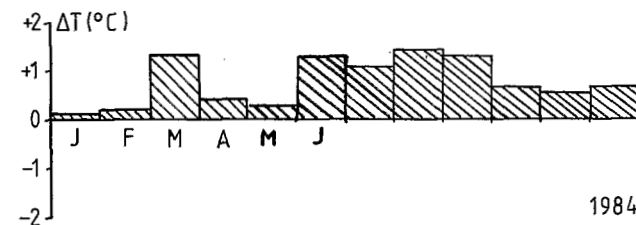
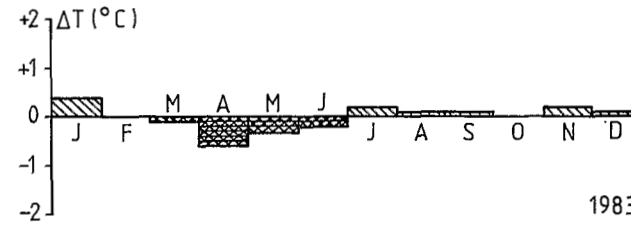
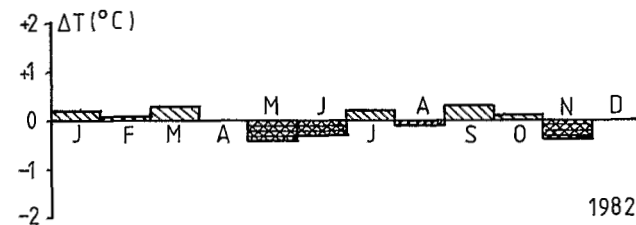
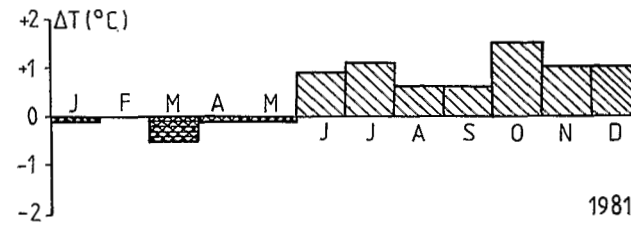
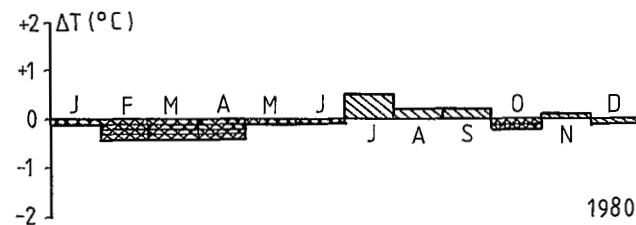
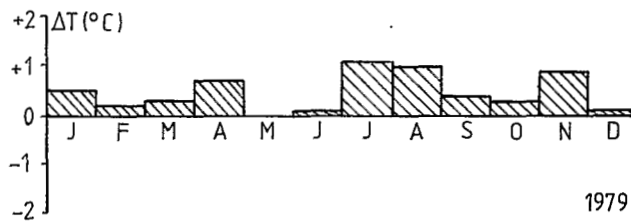
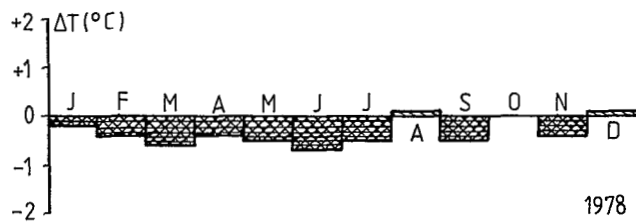
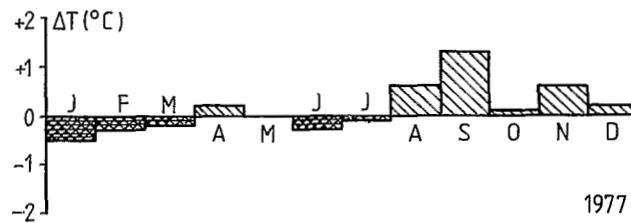
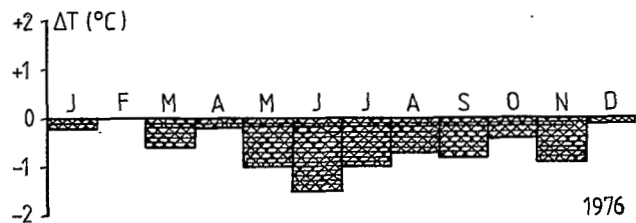
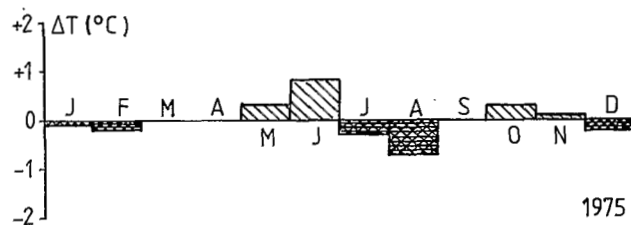
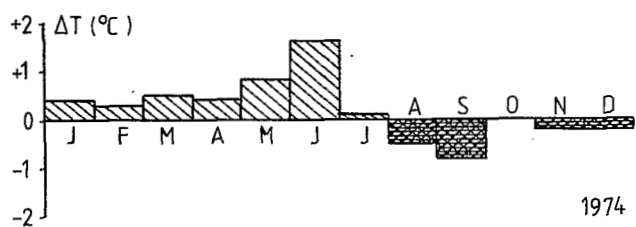


Fig. 7 - Anomalies de la température de surface de la mer (Equateur - 10°W)

Pour essayer d'y voir plus clair, nous avons construit la figure 7, avec des données de température de surface prises autour de 10° ouest, sur 16 degrés carrés, entre 2° nord et 2° sud, et entre 2° est et 2° ouest. On constate aussitôt que certaines années sont nettement « chaudes » ou à anomalies positives : 1979, 1981, 1984 et d'autres « froides » à anomalies négatives : 1976 et 1978, et qu'elles se trouvent regroupées dans des sous-ensembles homogènes au sein des ensembles d'années reconnus par les deux familles de courbes précédemment définies. Il semble en fait que la prise en compte des températures autour de 10° ouest ne suffise pas à caractériser les types de situation et qu'il faille compléter la notion d'intensité du refroidissement équatorial par l'extension spatiale du phénomène.

C'est en tout cas ce que suggère la comparaison des situations de 1982, 1983 et 1984. Si en température 1982 et 1983 ont été des années très proches de la normale, avec des niveaux, en avril et mai, finalement voisins de 1984 (à 0,5° près) (1) par contre l'espace couvert par les eaux froides n'a absolument rien de commun. La photographie n° 1 montre que les effets du refroidissement se sont fait sentir sur une immense étendue, des côtes du Gabon à 22° ouest, sur 3.500 kilomètres d'est en ouest, et sur 4 à 5° du nord au sud ; en 1983, la situation est pratiquement identique ; en 1984, les eaux froides sont bien présentes à la côte gabonaise et entre 0 et 20° ouest, mais elles sont totalement absentes entre 2 et 7° est, et leur extension en latitude est partout plus réduite ; à la place de la grande étendue fraîche de 1982 et 1983, on observe une série de puits froids entourés par les eaux chaudes qui ont en outre complètement recouvert les upwellings côtiers entre l'embouchure du Congo et Cabo Frio. 1982 et 1983 sont donc bien pour nous des années « froides », au même titre que 1976 et 1978, avec un comportement identique de la ZITC.

On peut encore observer que :

- les pronostics établis à partir de ces méthodes d'observation ont permis d'annoncer dès le mois d'avril 1984 que la saison d'upwelling équatorial serait de type année chaude, ce que les observations à la mer et satellitaires ont confirmé par la suite ; il semble que l'on se dirige vers une situation du même genre en 1985.
- les années 1983 et 1984 sont très contrastées.

2.2. Analyse de la convection

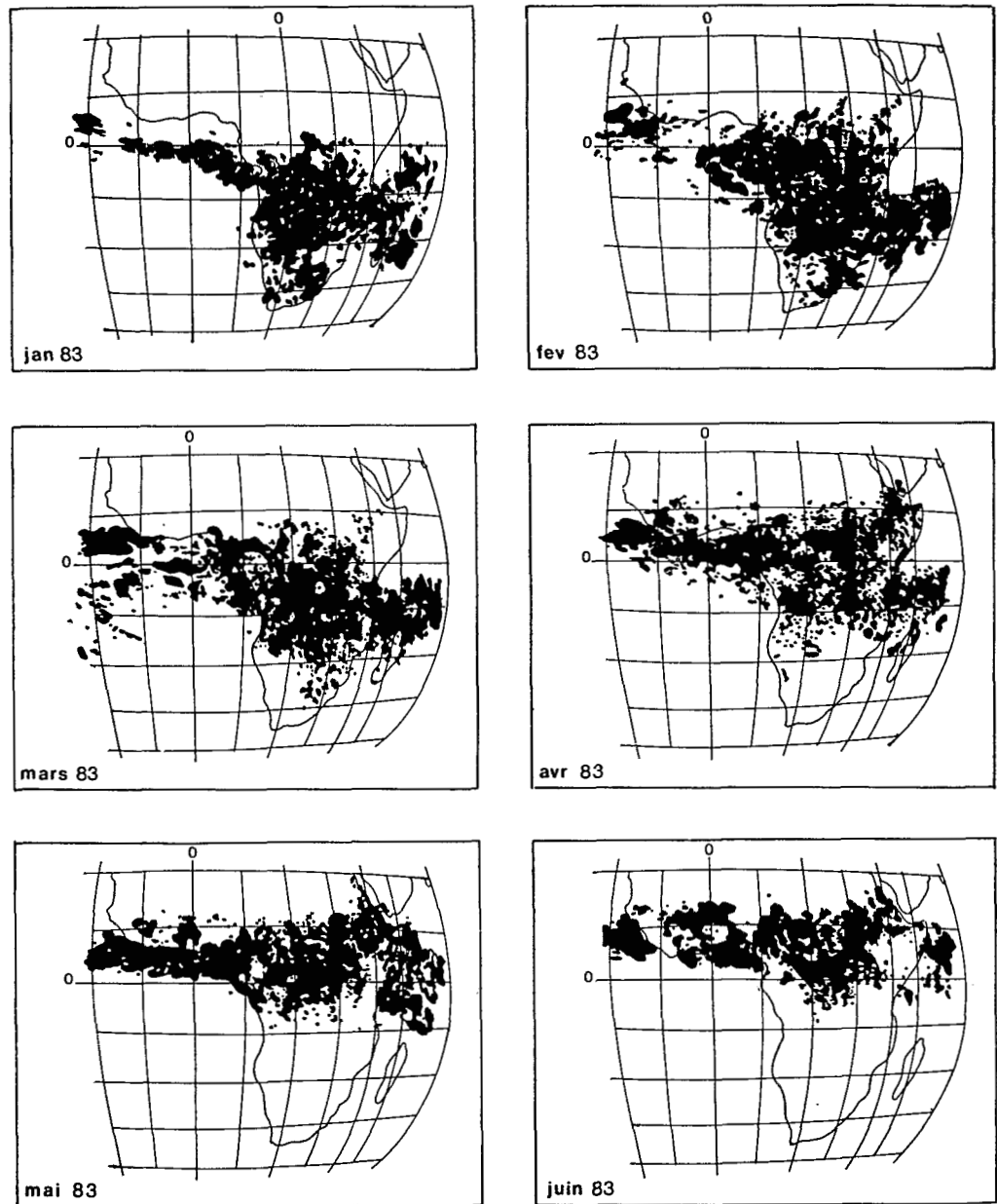
Etabli déjà sur onze années (1974 à 1984), le dossier de la position de la zone de convergence à 28° ouest, et des températures de surface de la mer est désormais assez bien documenté ; nous avons vu qu'il n'en va malheureusement pas de même pour l'analyse de la convection et des champs thermiques sur le continent, pour lesquels nous ne possédons que deux années complètes d'observation continue. Nous ne tirerons donc de leur confrontation réciproque que des conclusions provisoires, rarement appuyées par des données chiffrées, mais qui peuvent être tout de même assez pertinentes, dans la mesure où la période récente a vu se succéder deux années froides (1982 et 1983) et une année très chaude (1984), qui ont été marquées par des événements climatiques à période de retour très longue.

(1) Cette différence nous paraît assez largement sous-estimée. Les cartes NWS indiquent une différence de 3° centigrades à 10° ouest en avril : « Warmer 29 » le 22 avril 1984, et « Colder 26 », le 24 avril 1983 ; de 2° en mai : « Colder 27 » le 20 mai 1984, et « Colder 25 » (avec une courbe à 25°) le 22 mai 1983 ; de 2° encore en juin : « Colder 25 » le 20 juin 1984, et « Colder 23 » le 19 juin 1983.

2.2.1. Evolution annuelle de la convection

La figure 8 résume la répartition géographique, mois par mois, de l'activité convective, de janvier à décembre 1983. Le trait essentiel est le balancement saisonnier de l'activité convective, qui est très basse en latitude en hiver austral (janvier) et atteint sa position la plus septentrionale en juillet-août. Comme l'indique R.M. Thépenier (1) la géométrie de la zone où se développent les amas de cumulonimbus se répartit en deux catégories :

« - de mai à août la zone favorable à la formation de ces nuages est relativement étroite en latitude (1.500 kilomètres de large environ) et... orientée dans le sens est-ouest ;

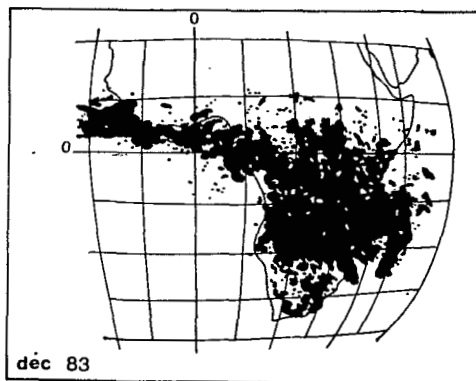
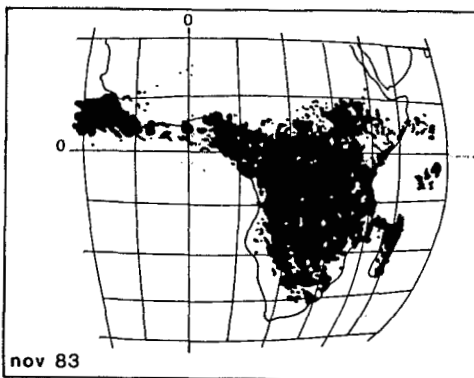
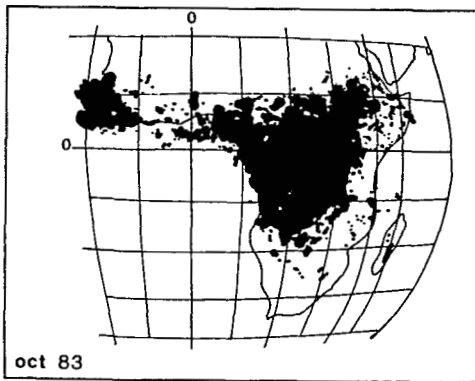
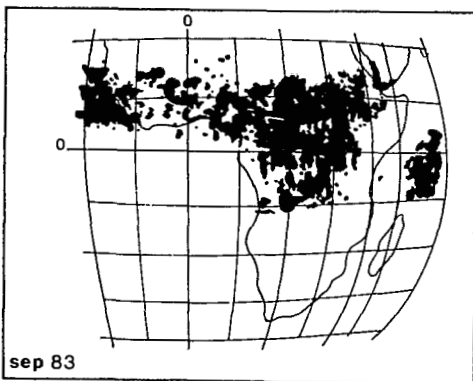
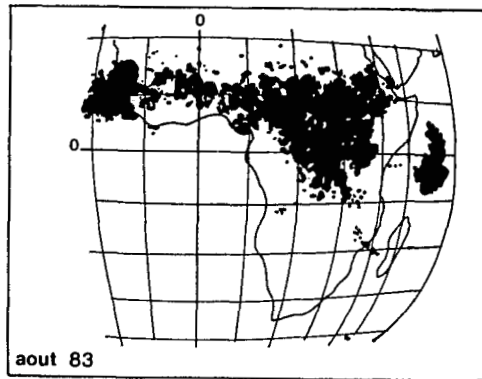
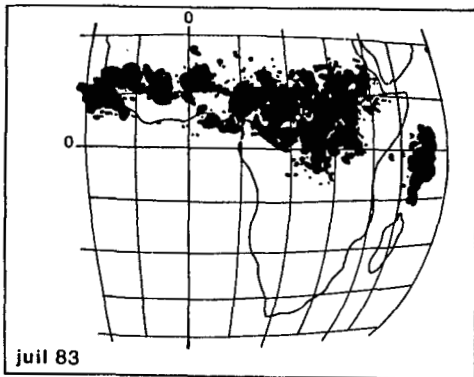


(1) Thépenier (R.M.), 1984, *Veille Climatique* n° 1, p. 11.

Fig. 8 - Evolution des zones d'instabilité de la zone

– à partir de septembre, la partie... située à l'est de 10° est s'étend... vers le sud du continent africain jusqu'en décembre... Sa largeur reste voisine de 4.000 kilomètres jusqu'en février ».

Ces particularités sont liées à la configuration du continent, et aux emplacements respectifs des anticyclones de Sainte-Hélène au sud, des Açores et de Lybie au nord, qui bloquent respectivement tout développement important, sur l'Atlantique sud en hiver boréal, et au-delà de 18-20° nord en été.



convergence intertropicale, de janvier à décembre 1983.

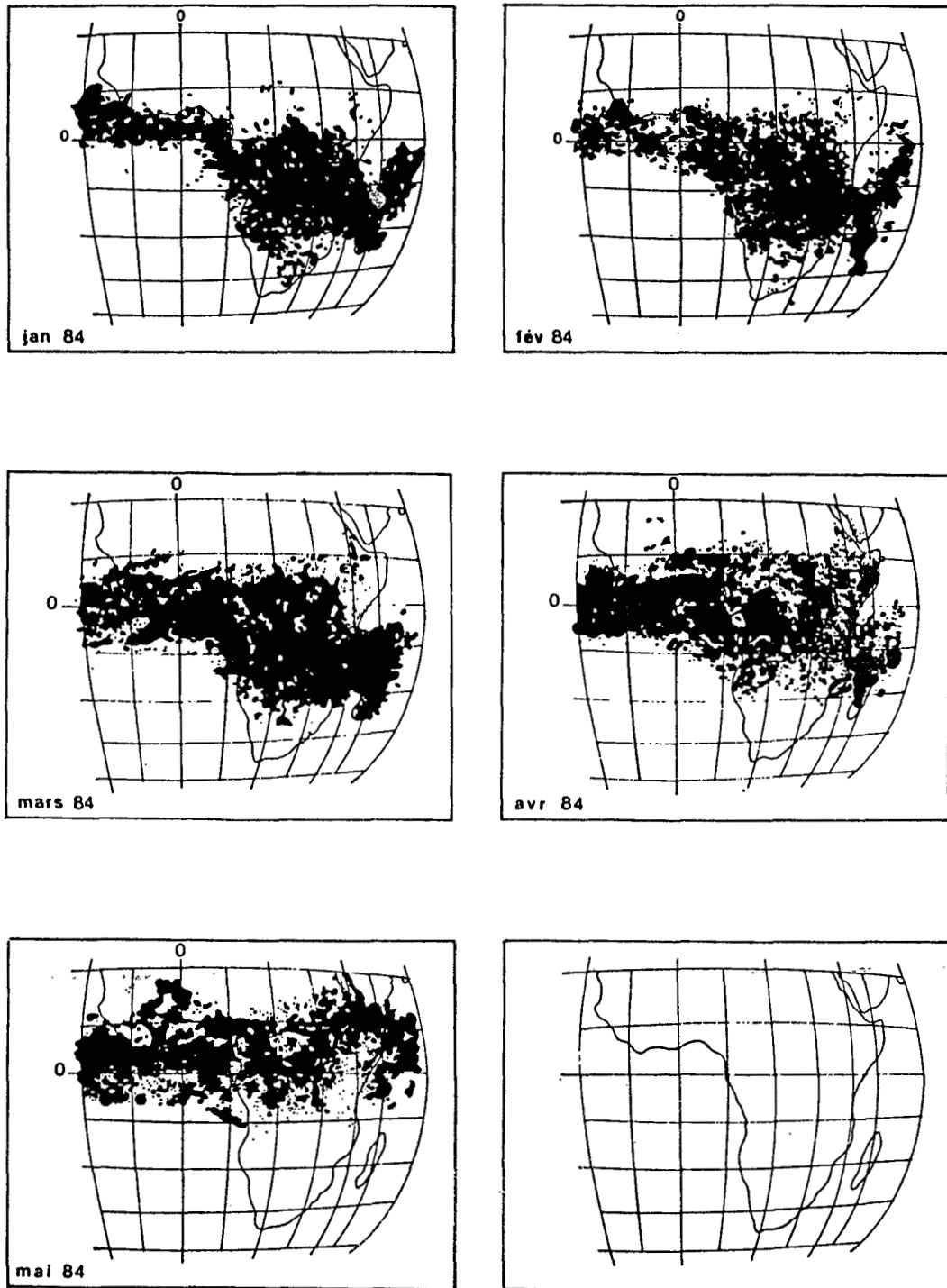


Fig. 9 – Evolution des zones d'instabilité de la zone intertropicale de convergence de janvier à mai 1984.

2.2.2. Evolution interannuelle sur l'océan et sur le continent

La fig. 9 donne une première idée, qualitative, des variations interannuelles. On remarque en effet en 1984 une activité convective bien plus importante sur l'océan qu'en 1983, de janvier à mai, tant en étendue qu'en intensité ; en janvier 1983, il n'y a qu'une étroite bande centrée sur l'équateur, et qui est très éloignée des côtes nord du golfe de Guinée, l'Afrique de l'ouest étant laissée complètement en dehors ; la remontée vers le nord est aussi bien plus précoce en 1983 ; le parallèle 10° sud n'est déjà plus atteint en avril, et l'équateur est presque complètement dépassé en mai, alors qu'en 1984 la limite méridionale varie de 10° sud à la côte à 7-8° de 10 à 30° ouest.

Une statistique des occurrences d'amas convectifs pour les mois d'été montre que les contrastes sont effectivement très importants (tableau 2). Sur l'ensemble de la saison avril-septembre, les occurrences dans des aires de 2° de côté sont deux fois plus nombreuses sur l'Atlantique en 1984, et les plus fortes différences sont constatées aux mois d'avril et en août, c'est-à-dire au moment du début et de la fin de l'upwelling équatorial (1).

Mois Années	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	Total
1983	598	627	363	299	217	327	2.431
1984	1.380	1.024	712	601	475	452	4.644
$\frac{1984}{1983} \times 100$	231	163	196	201	219	138	191

Tableau 2 : Occurrences comparées de nuages convectifs dans l'Atlantique en 1983 et 1984 (avril-septembre).

J.P. Lahuec (2) note qu'entre 1983 et 1984, en avril et mai, « le contraste principal... réside dans les développements différents du phénomène convectif dans le golfe de Guinée », et « qu'en mai 1983, on remarque un passage brutal d'une convection forte à une convection nulle... entre le parallèle 2°N et l'équateur. En mai 1984, la transition est beaucoup plus diffuse ». En avril, une coupe le long d'une bande située entre le méridien 2° ouest et 0° montre en 1983 un étalement net en latitude de 12° (de 8° nord à 4° sud) ; en avril 1984, il est de 26° (de 16° nord à 10° sud) ; les chiffres du mois de mai sont de 14° en 1983 (de 14° nord à l'équateur) et de 26° en 1984 (de 20° nord à 6° sud). S'il est assez difficile d'interpréter ces résultats sur le continent, où le développement de la convection dépend sans doute aussi d'autres facteurs, le message semble par contre clair en ce qui concerne le golfe de Guinée, les 6° de développement vers le sud en moins en 1983 en avril et mai trouvant leur explication dans l'effet stabilisateur des eaux froides, l'upwelling étant déjà bien installé le 20 mai, alors qu'il n'était pas encore amorcé à cette date en 1984.

(1) Cette date d'avril pour le début de l'upwelling peut paraître très précoce ; c'est cependant à ce moment là que des données Météosat, confirmées par des renseignements à la mer en 1982, montrent de façon indubitable le début du refroidissement en 1982 et en 1983.

(2) Veille Climatique Satellitaire n° 2, p. 12-13.

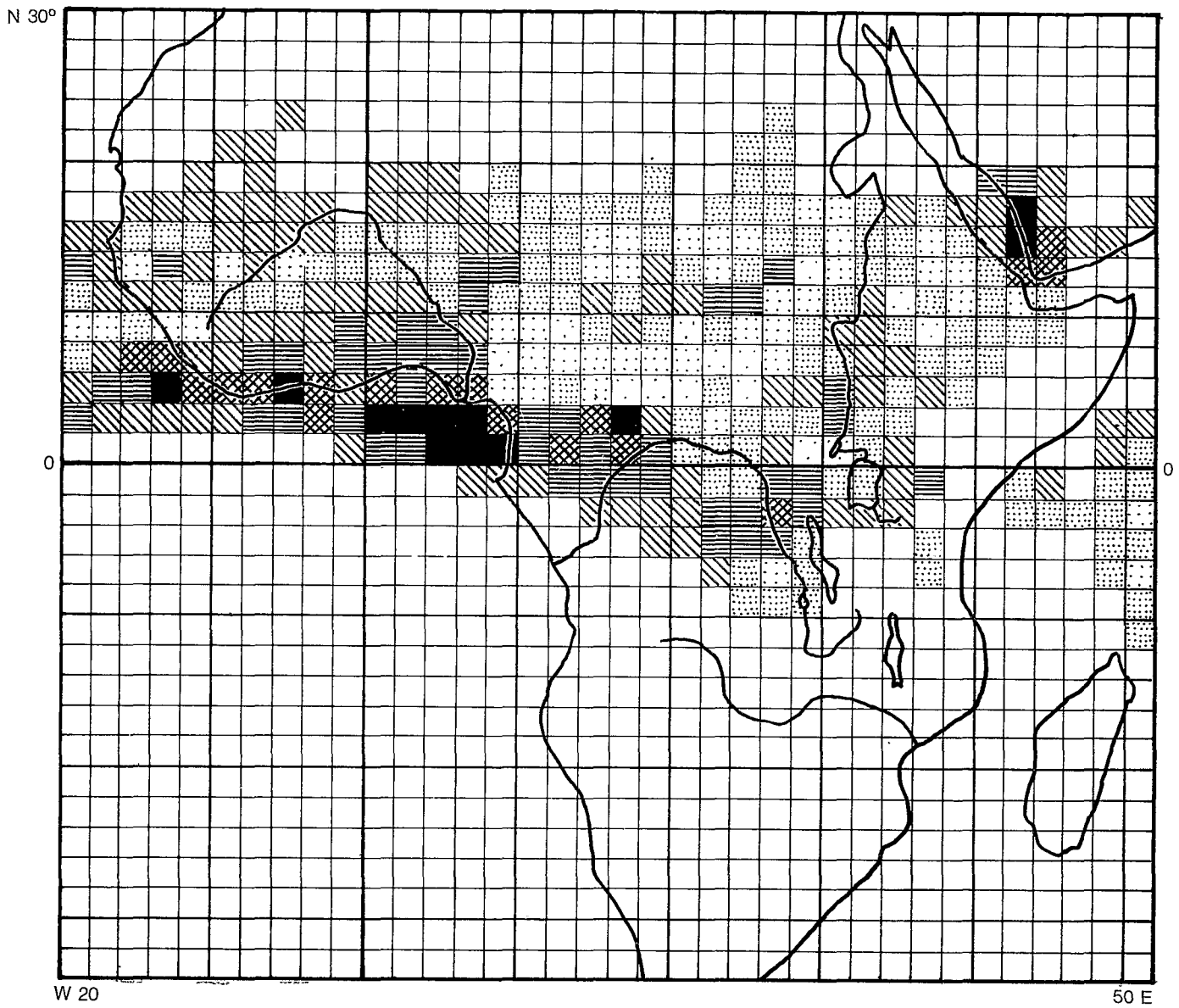
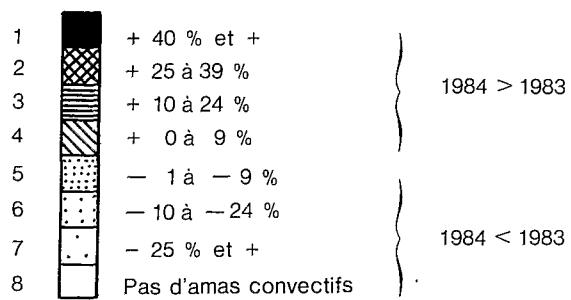


Fig. 10 – Comparaison de fréquences d'amas convectifs juillet 1984-juillet 1983.



Nous n'avons pas encore pu dresser de cartes saisonnières des différences d'apparition de nuages convectifs, faute de moyens informatiques ; nous avons quand même pu en construire une manuellement pour le mois de juillet (c'est-à-dire au cœur de la période d'hivernage en Afrique de l'ouest) (fig. 10), qui donne une idée des contrastes entre les deux années. Trois éléments sont particulièrement frappants :

- les très fortes fréquences en 1984 sur le golfe de Guinée, prolongées au nord sur 2 à 4° par une zone de transition où les différences sont beaucoup moins fortes, bien que très importantes encore ;
- les fortes fréquences en 1984 à l'est du golfe, des côtes du Cameroun et du Gabon jusqu'aux Grands Lacs ;
- les faibles et très faibles fréquences en Ethiopie, et en Afrique centrale, au-delà de 0°, puis de 4° nord et jusqu'à 8° est.

Les zones soudano-sahéliennes, en Afrique de l'ouest, sont dans une position à peu près semblable sur les deux années, et on sait que 1983 était déjà une année très sèche. Le nord de la boucle du Niger est globalement déficitaire en 1984.

2.2.3. Température de surface de la mer, convection et pluviosité

Nous avons déjà interprété la carte de la figure 10 (1) comme étant le reflet d'une situation complexe, où s'exerceraient en gros trois influences dans la répartition de la convection : la température de surface de l'Océan Atlantique, les influences d'est, et la circulation générale, dans l'incidence qu'elle a sur les centres d'action situés au nord : anticyclones des Açores et de Lybie, ou conditions cycloniques en Afrique du nord. Nous pouvons provisoirement retenir que la température de surface de l'océan dans le golfe de Guinée a eu une influence importante en 1983-84, sans doute prépondérante, dans les régions soumises directement au flux de mousson de sud-ouest, et que nous avons entourées d'un trait fort. Ce sont, d'ouest en est, toutes les régions côtières : l'est du Libéria, le centre et le sud de la Côte d'Ivoire, le Ghana, le Togo, le Bénin et l'ouest de la Nigéria (jusqu'à 8° est) de la côte à 10° nord : le sud du Cameroun jusqu'à 4° nord (latitude de Yaoundé), les 2/3 nord du Gabon, la moitié nord du Congo et la cuvette congolaise entre l'équateur et 6° sud, au Zaïre.

C'est une délimitation assez grossière qui appelle beaucoup de vérifications dans le détail. Juillet a été en effet, au sein du mouvement convectif annuel, une période de creux prononcé. L'examen des données étalées sur toute la période d'upwelling nous aidera dans cette tâche. D'autre part, le recours aux données « classiques » sera indispensable, dans ce but, et aussi pour replacer 1984 dans un contexte climatique plus général.

Une première ébauche de ce travail a déjà été conduite. Piton (2) a mis en relation l'anomalie positive de température de surface dans le golfe de Guinée, et la pluviosité excédentaire exceptionnelle enregistrée à Sao Tomé pendant l'été 1984. Après avoir bien établi la réalité de l'anomalie de température et sa nature physique par des mesures à la mer et dans les stations côtières, il écrit : « Devant une telle anomalie thermique positive dans cette zone, sur laquelle souffle en permanence un vent de secteur sud, plus ou moins dévié de sud-est à sud-ouest..., nous pouvons pressentir une saison sèche anormalement pluvieuse ». En effet « à Sao Tomé... les pluies anormalement élevées de juin à septembre 1984 » (14,7 fois la normale) « ont empêché toute culture à la ferme tenue... par les Volontaires du Progrès ». Il termine en souhaitant que l'on rassemble les « données pluviométriques recueillies en 1984 sur le golfe de Guinée et sur son pourtour », et qu'on en étudie « la répartition géographique pour les comparer aux données océanographiques ».

(1) *Veille Climatique Satellitaire n° 4, p. 18.*

(2) *Veille Climatique Satellitaire n° 5, p. 22-24.*

Une première réponse à cette question nous est parvenue presque au même moment. A. Buisson, météorologiste en service au Gabon, signale en effet des pluies extraordinaires au cours de la saison sèche (juin-septembre) dans ce pays (1). Cette information nous a paru tellement importante que nous avons décidé d'en faire immédiatement un compte-rendu (2). Les données mensuelles correspondent à des maxima de pluviosité jamais atteints dans la plupart des stations depuis l'origine des mesures, et à des écarts à la normale inattendus : jusqu'à plus de 100 fois. Une carte de cette anomalie, établie à partir des totaux de saison sèche, en relativisant un peu les résultats, leur confère une plus grande homogénéité (fig. 11).

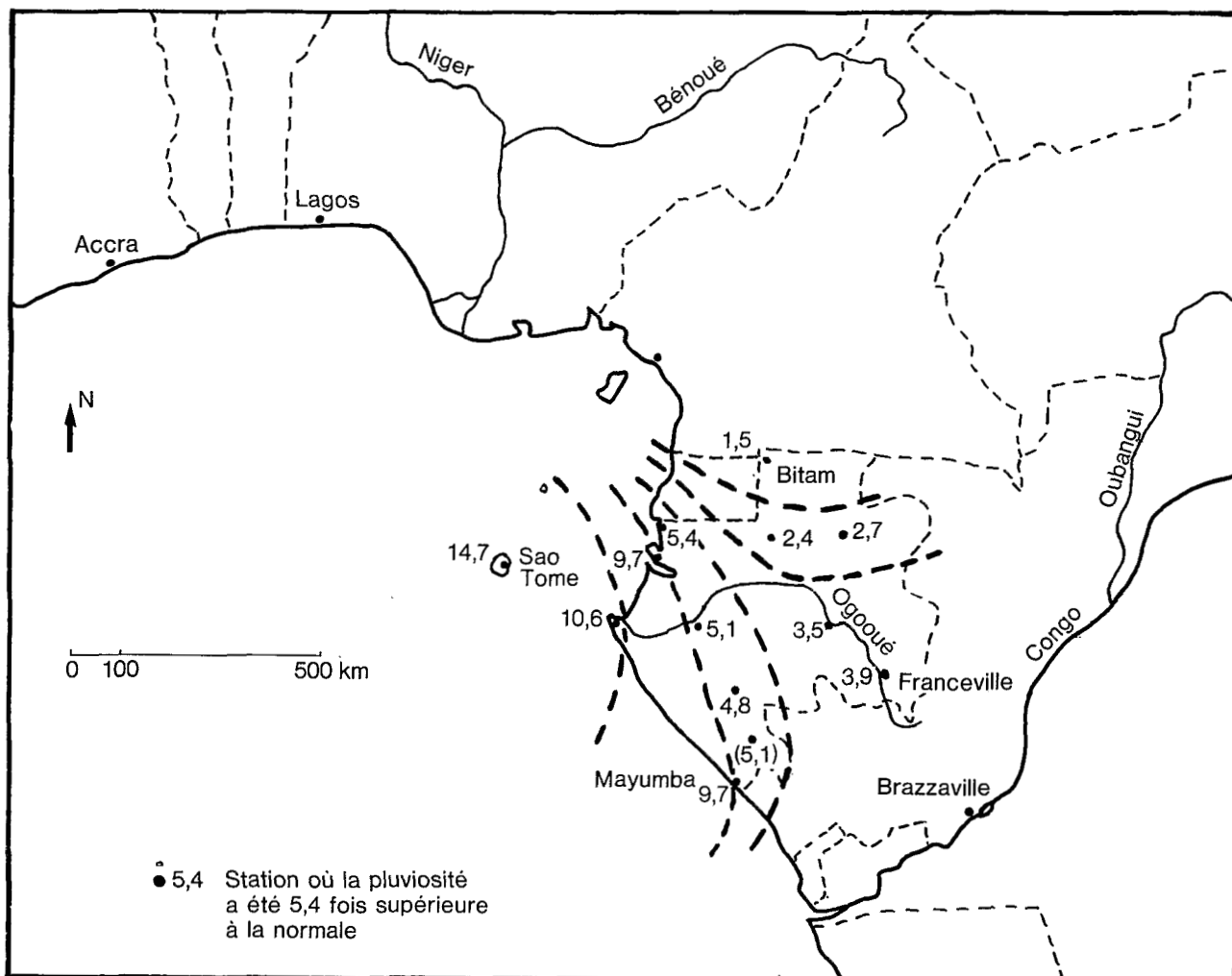


Fig. 11 – Pluviosité au Gabon de juin à septembre 1984.

En dehors de Sao Tomé, qui représente le repère idéal du maximum de sensibilité de la pluviométrie à la température de surface, on constate une diminution rapide vers l'intérieur du continent. Les stations côtières : Libreville, Port-Gentil et Mayumba (10 fois la normale de juin à septembre) en subissent les effets de plein fouet. Il y a baisse sensible (d'un facteur 2 environ) de l'anomalie au nord et à l'est, et baisse plus rapide vers le nord que vers

(1) 1985, à paraître in *La Météorologie*.

(2) *Veille Climatique Satellitaire* n° 6, p. 13-14.

l'est, malgré l'obstacle des reliefs côtiers, avec des résultats sensiblement identiques à Cocobeach, Lambaréné et Mouila (1). Les chiffres des stations de Lastoursville et de Franceville (3,5 et 3,9 fois la normale), à l'intérieur des terres, semblent indiquer que les effets vers l'est décroissent lentement à cette latitude, et qu'ils se font sentir très loin à l'intérieur du continent. Si on compare cette carte à la figure 10, on constate que les deux documents concordent bien, surtout en ce qui concerne l'extension vers l'est, mais que les écarts à la normale s'étendent plus au sud que ne l'indique le document de juillet, mois où l'activité convective atteint son plus haut niveau vers le nord. Le chiffre élevé de Mayumba par exemple est en grande partie dû aux données de septembre, l'influence marine sur la convection ne se faisant sentir qu'avec la descente vers le sud de la zone de convergence ; il est probable que pour l'année entière, la zone d'influence du golfe de Guinée s'étend davantage vers le sud.

Les données de 1983 montrent que ce fut au contraire une année particulièrement sèche durant la même période ; les zones côtières ont été les plus affectées, surtout au nord : 38 % de la normale à Libreville, 39 % à Cocobeach, 59 % à Port-Gentil, ainsi que l'arrière-pays immédiat : 36 % de la normale à Tchibanga, 51 % à Mouila, 38 % à Lambaréné. Le nord, l'est et le sud du pays sont en position intermédiaire : de 62 % de la normale à Bitam à 76 % à Mayumba, le centre étant assez curieusement épargné : 102 % à Mitzic, 123 % à Lastoursville.

Des événements du même genre se sont produits en Côte d'Ivoire, ce pays ayant connu une grave pénurie d'électricité hydraulique en 1983, début 1984, puis le retour à l'abondance fin 1984 ; il nous semble qu'une étude aussi fine que possible des données disponibles devrait être entreprise rapidement dans toute la zone que nous avons précédemment délimitée (2).

Les données numériques concernant le Gabon et Sao Tomé sont reproduites dans le tableau 3. Dans la dernière colonne sont consignés les résultats d'une comparaison entre 1983 et 1984, qui souligne les différences d'une année à l'autre ; Libreville a reçu de juin à septembre 25 fois plus d'eau en 1984 qu'en 1983, Port-Gentil 19 fois, Lambaréné et Cocobeach 14 fois, Mayumba 13 fois...

Stations	Précipitations (mm)			% de la moyenne		1984 1983
	Moyenne	1983	1984	1983	1984	
Bitam	440,7	291,1	674,6	66	153	2,32
Cocobeach	301,8	116,8	1619,2	39	537	13,86
Franceville	157,6	115,6	611,1	73	388	5,29
Lambaréné	94,9	35,8	485,0	38	511	13,55
Lastoursville	156,4	191,9	546,9	123	350	2,85
Libreville	130,9	50,0	1263,9	38	966	25,28
Makokou	206,5	128,1	562,5	62	272	4,39
Mayumba	41,8	31,7	406,9	76	973	12,84
Mitzic	188,3	193,5	454,9	102	242	2,35
Mouila	87,7	44,4	423,8	51	483	9,55
Port-Gentil	39,2	22,1	416,7	59	1060	18,86
Tchibanga	16,0	5,8		36		
Sao Tomé	38,4		564,0		1469	

Tableau 3 : Précipitations de saison sèche (juin-septembre) en 1983-1984, au Gabon et à Sao Tomé.

(1) Il semble que cette diminution rapide vers le Nord puisse être attribuée au fait que les écarts de température de surface entre les deux années ne deviennent sensibles qu'à partir de l'équateur, entre 0 et 18° sud en latitude, et entre le méridien origine et la côte en longitude.

(2) A. Buisson note que l'anomalie de pluviosité au Gabon est exceptionnelle du fait de sa rareté : « depuis le début des mesures... (Libreville : janvier 1983) jamais un tel phénomène ne s'était produit... Certains se souviennent d'un « retournement du temps » localisé durant l'année 1926 ». Les administrateurs de l'époque ont bien noté le phénomène, qui avait provoqué des famines, les plantations sur brûlis n'ayant pu être faites.

2.3. Champs thermiques en Afrique de l'ouest, et déplacements interannuels de la ZITC

Nous avons vu que les champs thermiques diurnes Météosat pouvaient aussi fournir un bon moyen pour suivre les limites de l'activité convective sur le continent, par le biais des fronts thermiques séparant les zones chaudes (sèches) à faible inertie thermique, des zones fraîches (humides) à forte inertie. Avant d'aller plus avant il nous a fallu cependant régler certains problèmes de reconnaissance physique des fronts.

A l'expérience, il est apparu en effet un certain nombre d'obstacles. Le premier est lié aux différences saisonnières de température entre l'hiver et l'été ; en janvier par exemple, les contrastes thermiques sont moins forts qu'en juillet. Cette contrainte nous a obligé à choisir une limite « basse » (39° C) pour situer les fronts. Celle-ci correspond au bord chaud en hiver, et au bord frais en été.

D'autres difficultés ont trait à l'état de l'atmosphère ; en décembre 1984, les nuages de sable et les brumes sèches ont été tellement abondants que les contrastes thermiques ont été complètement gommés. A d'autres moments, ce sont des nuages permanents qui ont empêché toute mesure au niveau du sol. Dans les zones côtières, certaines zones claires ont pu être vues sur le bord frais des fronts, bien qu'il n'ait pas encore plu ; ce fut le cas de la presqu'île du Cap Vert, en avril 1984, et on a pu relier ce fait à l'influence rafraichissante de l'océan, renforcée par l'arrivée de l'air humide de mousson. Ces inconvénients ont globalement une faible influence car il s'agit, soit de circonstances locales (proximité de l'océan), soit de phénomènes liés eux-mêmes à une activité convective (nuages abondants). Le sable pose cependant un problème nouveau et incontournable.

2.3.1. Fronts thermiques en Afrique de l'ouest et suivi des déplacements de la ZITC

La figure 12 rassemble les fronts tels qu'ils ont été reconnus de janvier à octobre, sauf pour février et juillet, qui n'ont pas été traités en 1983. Si on y regarde de près on en retire deux impressions générales : la première, qui s'est trouvée confirmée par des données de 1982 (octobre) et 1985 (janvier), c'est que les mois de janvier et octobre ont une configuration climatique qui se répète bien d'une année à l'autre, janvier marquant le moment où l'assèchement se fait sentir jusqu'aux limites de la forêt équatoriale, qui se comporte sur ce plan comme un butoir, un rivage ; en octobre, le front de mousson a déjà bien amorcé sa descente vers le sud, et les conditions au sol (végétation) semblent être assez semblables chaque année aux alentours de 14° nord (façade ouest du continent) à 10° nord (vers 10° est).

La deuxième impression c'est que de mars à septembre, 1983 et 1984 ont connu une évolution totalement divergente. En mars, du fait de la forte activité convective que nous avons par ailleurs observée, le front est partout très en avance en 1984 et la mousson a déjà largement pénétré le continent, alors qu'en 1983 elle n'avait pratiquement pas encore amorcé sa remontée. En avril, cette avance persiste à l'est, mais de façon bien diminuée, et disparaît totalement à l'ouest de 6° ouest. En mai, les isolignes sont pratiquement au même niveau et pour la première fois le front est plus au nord en 1983, sauf à l'est de Kano (9° est environ), où l'écart est faible, et à l'ouest de 10° ouest, où il est largement inversé ; les différences extrêmes sont atteintes en août, où la zone à moins de 39° C est partout plus basse en latitude en 1984, avec de très gros écarts en Mauritanie, et à l'est, de 4° ouest (longitude de Ségou) à 13° est.

On s'attendait à ce que septembre enregistre un rapide recul vers le sud. C'est tout le contraire qui s'est produit ; le front se retrouve sensiblement au même niveau les deux années, de 14° est à 7° ouest, (longitude de Bamako), sauf à la hauteur de Niamey, de part et d'autre du fleuve Niger, où la situation reste plus mauvaise en 1984. A l'ouest, à partir de 10° ouest le front a été complètement disloqué en 1984, et le niveau de température choisi pour le matérialiser n'est plus atteint. En octobre, on retourne à une situation plus classique, mais qui reste globalement meilleure en 1984. Les résultats du mois de novembre, non représentés sur la figure, confirment cette tendance, avec des fronts situés à la même hauteur, vers 10° nord, et une nette amélioration en 1984 autour de Bamako, de 7 à 10° ouest.

Tout semble indiquer que l'influence bénéfique d'un océan chaud en 1984 a été progressivement contrecarrée, à mesure que l'on avançait dans la saison et que la mousson remontait vers le nord, par un blocage de plus en plus fort par le nord. La forme même des lignes de front le suggère, notamment celles de mai et surtout de juin, où le retard apparaît au centre du sous-continent, et donne aux fronts une forme convexe vers le sud, avec une flèche située vers la longitude de Ouagadougou. Des renseignements puisés à bonne source en donnent un bout

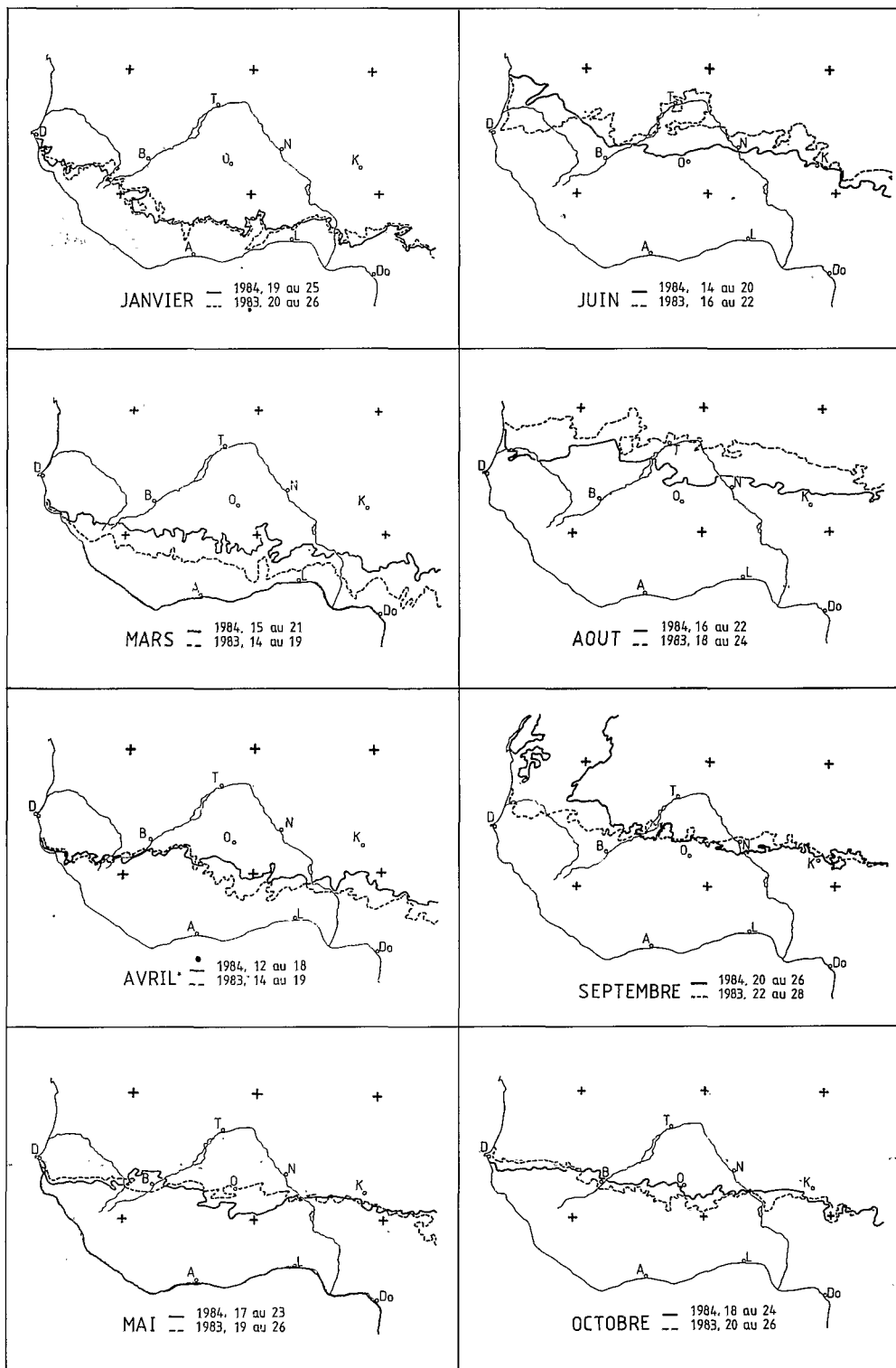


Fig. 12 – Fronts thermiques, en 1983-1984. Isolignes à 39° C (température radiative Météosat).

d'explication ; les bulletins du centre Agrhymet de Niamey soulignent en effet, à partir de la deuxième décennie de mai, un renforcement notable des anticyclones, notamment de Lybie ; en juin, « les hautes pressions de la Lybie continuent de se renforcer, et font fléchir le FIT sur le centre du Niger », alors qu'au même moment « un creusement dépressionnaire (sur le Maroc et l'Algérie) fait remonter le FIT jusqu'à 23° N sur le Sahara Occidental » (on remarquera que le front de juin « colle » parfaitement avec ces observations). Des propos du même genre reviennent pendant tout le mois de juillet.

Inversement en septembre (première décennie) « d'importantes circulations dépressionnaires ont été observées sur le Maghreb... Cette situation a entraîné de fortes pénétrations d'air humide », d'où « des précipitations abondantes sur le Sahel à des fréquences courtes ». Le front de mousson est remonté vers le nord au lieu de commencer sa descente vers le sud et des nuages ont pénétré sur une bonne partie du Sahara, provoquant des pluies exceptionnelles à Atar en Mauritanie, au Tibesti, dans le nord du Tchad et dans le nord du Soudan.

L'impression qui prévaut est qu'il existait un potentiel d'humidité atmosphérique suffisant, et que les précipitations n'ont pu avoir lieu, pour les raisons invoquées ci-dessus, et pour d'autres causes encore tenant, soit à l'effet rétroactif des sécheresses précédentes, soit à un dérèglement dans les influences d'est. Des recherches en cours (Cadet, 1984, Monteny, 1985) sur les transferts d'humidité montrent que les sécheresses antérieures et les modifications du couvert végétal peuvent avoir un effet par une diminution du recyclage des précipitations, par la forêt. Or 1983 a été une année très sèche, provoquant par exemple en janvier des feux accidentels très violents en Côte d'Ivoire.

Il semble enfin que les influences d'est soient très importantes, et que la principale différence entre années normales et années sèches puisse être due (Dhonneur, 1984) à une « non-utilisation du potentiel en eau disponible du fait des contraintes à la convection ayant pour origine la structure verticale du champ de vent », et que les années sèches par exemple soient liées à une intensification du tube de vents forts à 600 mb (Jet d'Est Africain, JEA) et à un ralentissement du Jet tropical à haute altitude (Tropical Easterly Jet, TEJ). La figure 10 semble en accord avec ces observations, car elle montre que les amas convectifs sont bien plus rares en 1984 qu'en 1983 à l'est du continent, de l'Ethiopie aux montagnes du Cameroun, et que cette différence s'atténue vers l'ouest.

2.3.2. Champs thermiques et convection sur le continent

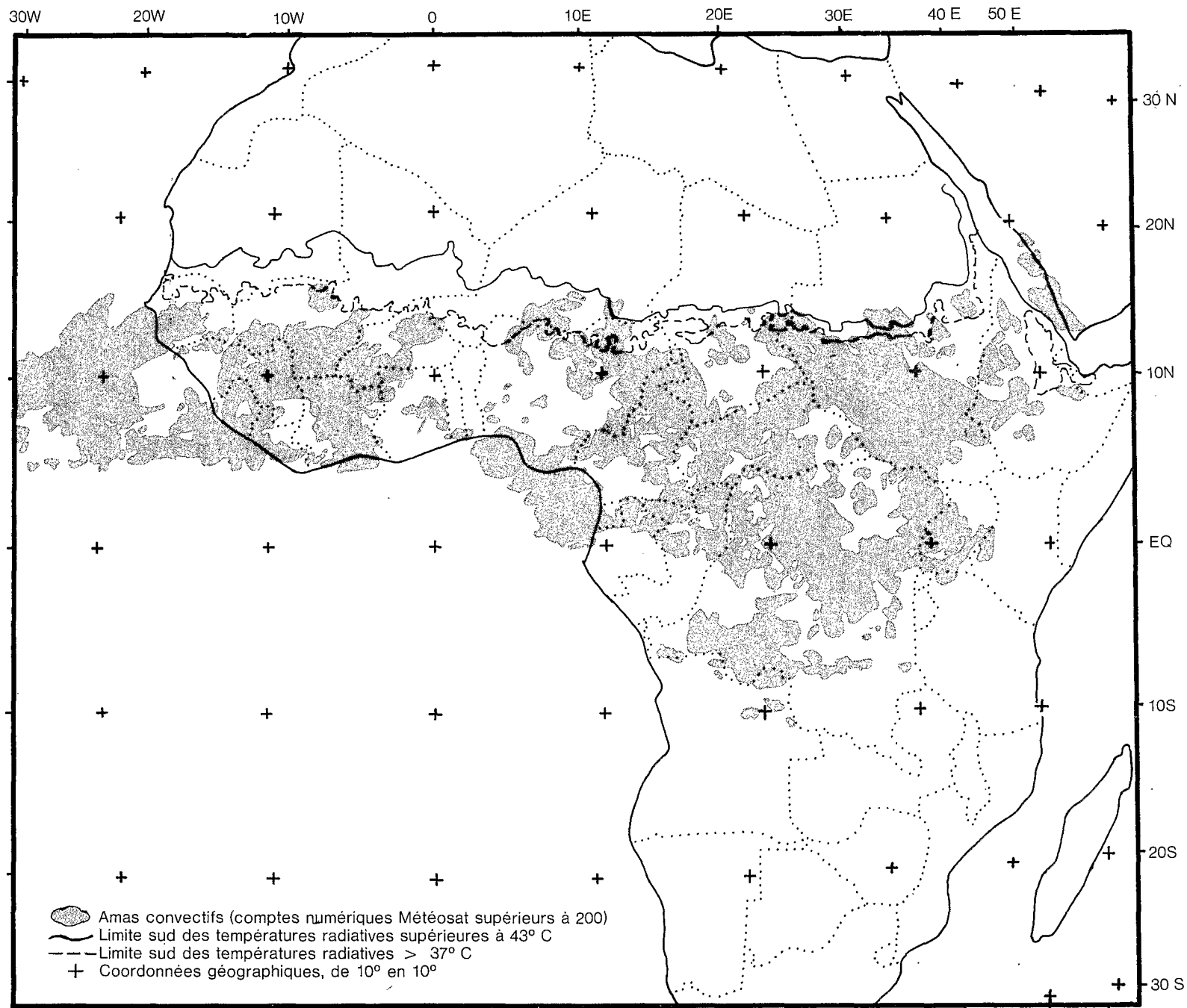
Les isolignes à 39°C ne suffisent en fait pas toujours à repérer les limites de la zone couverte par les nuages convectifs, notamment au cours de l'hivernage, en juillet-août, lorsque le front de mousson, ayant atteint une position très septentrionale, connaît à ce niveau une période de battement, avec des phases d'avancée et de retrait. Sur la figure 13, on a fait figurer deux isolignes, à 43° et 37°C, qui correspondent en Afrique de l'ouest (à partir de 12° est) à une séparation du front en deux niveaux, avec un palier de température intermédiaire large de 200 à 300 kilomètres.

Pendant la même semaine, nous avons décidé, à l'aide des mêmes données (3 images infra-rouge, à 9 h, 12 h et 15 h Tu) de tenter un essai d'analyse plus serrée des amas convectifs ; l'idée, simple, a consisté à chercher, dans les valeurs numériques, le seuil de froid qui sépare les nuages convectifs des cirrus, à séparer les pixels ainsi discernés, et à additionner les résultats pour obtenir l'aire totale couverte durant la semaine. Le seuil choisi correspond à une température de - 45°C, et les surfaces couvertes sont figurées en grisé sur la figure 13 ; on constate que l'aire couverte par les amas convectifs coïncide à peu près avec le niveau à 43°C au sol, de l'Ethiopie à 10° est, les fronts à 43 et 37°C étant alors confondus. A l'ouest de 10° est les amas convectifs ne dépassent pas 15-16° nord, et suivent le front à 37°C, tandis que le front à 43°C évolue entre 17 et 19° nord. Cette situation suggère que le front le plus chaud (43°C) résulte des pluies issues d'époques antérieures, tandis que le front à 37°C est au niveau des pluies du moment, ou d'époque immédiatement antérieure, et que la mousson en Afrique de l'ouest est en phase provisoire de retrait.

2.3.3. Projet de surveillance à échelle fine de la convection

Il semble par conséquent nécessaire, pour une meilleure compréhension des champs et des fronts, de disposer en temps réel d'une description aussi complète et détaillée que possible de la convection. Celle-ci se traduit en pluie par des épisodes violents et à évolution diurne très rapide ; il n'y a pas d'autre méthode pour la

Fig. 13 – Amas convectifs et niveaux thermiques au sol, semaine du 30 août au 5 septembre 1984.



surveiller que de multiplier les observations. Cette contrainte en induit une deuxième, exprimée en termes de coût, pour le traitement d'images très nombreuses, d'où l'obligation de rechercher des méthodes simples en acceptant de perdre un peu de précision dans la mesure.

Il semble que la nature même du phénomène autorise certains espoirs de parvenir à une bonne estimation. Les épisodes violents évoqués ci-dessus sont en effet suffisamment distincts de par leur masse et leur distribution en unités souvent bien individualisées, pour pouvoir être séparés de leur environnement. Plusieurs bornes de température ont déjà été proposées pour cela ; Reed (communication personnelle) a proposé -37°C , dans une étude conduite dans des aires de 2° de côté, sur la saison 1979. Nous sommes passés nous-mêmes de -45 à -40°C et il semble que nous puissions nous en tenir là. Nous entreprenons dès maintenant une surveillance continue, au niveau du pixel, en traitant cinq images par jour.

Les résultats sont comptabilisés sur une matrice lignes-points, en attribuant la valeur 1 en cas de présence de nuages froids, et la valeur 0 dans le cas contraire. Des sommes seront effectuées par décades, par mois, et pour la saison, et les champs de fréquence ainsi obtenus seront comparés à des données pluviométriques, qui serviront à les étalonner. Une amélioration de la méthode est bien entendu prévue ultérieurement ; elle portera sur le nombre d'images : huit, et davantage, un taux horaire semblant être la bonne solution, et sur une sophistication de l'algorithme ; les secteurs retenus comme convectifs pourront être à nouveau repris en classes de froid, les pixels situés par leur emplacement au sein de l'amas convectif auquel ils appartiendront, etc. Des recherches en ce sens sont actuellement entreprises au Laboratoire de Météorologie Dynamique sur des données anciennes, et nous en tirerons profit dès que nos moyens le permettront.

Ces champs de convection ne seront pas construits seulement pour les besoins de la recherche ; nous espérons en effet dans l'immédiat établir, en sus d'une surveillance en temps réel, un bilan en fin de saison qui permette une cartographie, peut-être grossière, mais en tout cas supérieure aux rares données actuelles, des zones à problème, et des secteurs favorisés. Il est certain cependant que des données de ce type nous feraient beaucoup avancer, ne serait-ce que dans la délimitation de l'aire d'influence des grands événements qui font le climat dans cette région. Le progrès serait en tout cas très grand en temps passé à la recherche des données, qui sont très difficiles à réunir, quand elles existent ; un an après les épisodes de 1984 (et notamment l'anomalie de température de surface de l'océan), nous courons toujours après une délimitation détaillée de leurs effets sur le terrain.

CONCLUSION

Tout tourne finalement autour de la zone de convergence, des meilleures méthodes à mettre en œuvre pour en réaliser le suivi le plus efficace possible.

Nous pensons être sur la bonne voie en ce qui concerne la surveillance de la convection ; les champs thermiques de surface semblent être en effet un bon moyen de situer dans l'espace, semaine après semaine, l'évolution saisonnière des secteurs humidifiés ; l'analyse des amas convectifs par néphanalyse manuelle permet une comparaison saisonnière et interannuelle intéressante, et le passage au traitement numérique de nombreuses images quotidiennes, couplé aux observations pluviométriques, devrait apporter une solution satisfaisante aux problèmes posés par les insuffisances des réseaux d'observation au sol. Nous avons aussi pu cerner d'un peu plus près les interrelations existant entre la température de surface de l'océan et les variations saisonnières de la pluviosité, dans les régions proches des côtes du golfe de Guinée et en Afrique centrale.

L'étude des variations en latitude de la zone de convergence a enfin permis d'explicitier une connexion apparemment bien établie entre ces variations et l'intensité des remontées saisonnières d'eaux froides à l'équateur. La description de cycles interannuels, de l'alternance d'années « chaudes » et d'années « froides », fournit un début d'explication, aux « retournements du temps » qui peuvent se produire dans les régions les plus proches de l'océan, et peut aider à la prédiction d'années favorables ou défavorables quelques mois à l'avance, lorsque des types d'évolution bien marqués seront observés. Il existe cependant des années où le pronostic est incertain (1975, 1980) ; l'ampleur de l'anomalie peut aussi beaucoup varier, et ses effets en être atténués d'autant.

Il semble impossible pour l'instant, en s'en tenant à une observation au niveau régional comme la nôtre, de conjecturer quoi que ce soit dans les régions plus continentales de l'Afrique de l'ouest, au-delà de 8 à 10°-nord. Ce que nous pouvons, c'est seulement apporter des informations sur une des composantes du système climatique.

BIBLIOGRAPHIE

- ADEFOLALU, D.O. - 1984 - La mousson et les précipitations en Afrique Occidentale ; OMM, Conférence Régionale de Dakar, p. 130-137.
- BERTHOU, H., NOYALET, A. - 1980 - Utilisation du satellite géostationnaire Météosat. Dact., CMS Lannion, 2 p., 15 fig.
- BELLEÇ, B., CAMMAS, J.P., GUILLOT, B., LAHUEC, J.P., NOYALET, A. - 1984 - Projet de surveillance des amas convectifs et des précipitations dans la zone intertropicale, à l'aide des données infra-rouge de Météosat. V.C.S. (1) n° 3, sept., p. 19-22.
- BELLEÇ, B., GUILLOT, B. - 1985 - Nuages convectifs sur l'Atlantique au sud de l'équateur. V.C.S. n° 6, mars 1985, p. 15-16.
- BELLEÇ, B., GUILLOT, B. - 1985 - Brumes sèches et nuages de sable sur l'Océan Atlantique et en Afrique de l'ouest. V.C.S. n° 6, mars 1985, p. 17-20.
- BUISSON, A. - 1985 - Une anomalie climatique au Gabon en 1984. La Météorologie, juin-août 1985 ; post-face de R. Garnier.
- CADET, D.L., HOUSTON, S.H. - 1984 - Eau précipitable au-dessus de l'Afrique et de l'Océan Atlantique durant l'été 1979. OMM, Conférence Régionale de Dakar, p. 34-37.
- CADET, D.L., NNOLI, N. - 1984 - Transport de vapeur d'eau durant la mousson africaine de 1979 ; id., p. 38-41.
- CITEAU, J. - 1984 - Position de la zone de convergence ; situation au début de l'année 1984. V.C.S. n° 1, mai 1984, p. 5.
- CITEAU, J. - 1984 - Position de la zone de convergence d'avril à juin 1984. V.C.S. n° 2, juillet 1984, p. 7-9.
- CITEAU, J., CAMMAS, J.P., GOURIOU, Y. - 1984 - Position de la zone intertropicale de convergence à 28° ouest et température de surface dans le golfe de Guinée. V.C.S. n° 3, septembre 1984, p. 3-7.
- CITEAU, J., CAMMAS, J.P., GOURIOU, Y. - 1985 - Position de la zone de convergence à 28° ouest et température de surface dans le golfe de Guinée. V.C.S. n° 5, janvier 1985, p. 3-5.
- CITEAU, J., CAMMAS, J.P., GOURIOU, Y. - 1985 - Position de la zone de convergence à 28° ouest et température de surface de l'océan. V.C.S. n° 6, mars 1985, p. 3-4.
- CITEAU, J., GOURIOU, Y., GUILLOT, B. - 1984 - Position de la zone de convergence à 28° ouest et température de surface dans le golfe de Guinée. V.C.S. n° 4, novembre 1984, p. 2-5.
- CITEAU, J., GUILLOT, B., JEGOU, C. - 1982 - Réflexions sur une expérience en cours : le satellite Météosat-2 et les campagnes Listao. 10^e colloque sur l'exploitation des océans, Paris, Hôtel George V, 20-22 janvier 1982, ASTEO Ed., 180-193.
- CITEAU, J., GUILLOT, B., LAE, R. - 1984 - Opération listao : reconnaissance de l'environnement physique en Atlantique intertropical à l'aide des satellites Météosat et GOES Est. ORSTOM, IDT 63, Télédétection 10, 1984, 28 p., 11 fig., 2 pl. photo.
- CITEAU, J., PITON, B., VOITURIEZ, B. - 1981 - Remote sensing of the upwelling season in the eastern tropical atlantic ocean. Recent progress in equatorial oceanography : Report of the final meeting of Scor WG 47 in Venice, Italy. April, 27-30. 1981. Nova University Press. Ed., Dania, Florida, pp 283-292.

- DHONNEUR, G. - 1981 - Les amas nuageux mobiles, principale composante de la météorologie du Sahel. *La Météorologie*, VI, 27, p. 75-82.
- DHONNEUR, G. - 1984 - Généralités sur les pluies au Sahel. OMM, Conférence Régionale de Dakar, p. 85-94.
- DOCUMENTATION AIR-FRANCE - 1963 - Climatologie Afrique. Département des vols. Doc. Nav. Infra. NoM3, 1-145.
- DOMAIN, F. - 1979 - Le satellite Météosat et l'océanographie. Etude des températures de la mer au voisinage des côtes de Mauritanie et du Sénégal. Initiations et Documentations techniques; n° 42, Télédétection 3, ORSTOM Paris, 1-43.
- GOURIOU, Y. - 1984 - Correction de l'angle zénithal et utilisation du canal vapeur d'eau pour la correction atmosphérique. Rapport de stage effectué au CMS de Lannion, antenne ORSTOM Lannion 16 p., 7 fig.
- GARNIER, R. - 1976 - L'équateur météorologique. *La Météorologie*, n° spécial « Météorologie tropicale », p. 113-122.
- GARNIER, R. - 1981 - Relations entre anomalies climatiques. Téléconnexions. *La Météorologie*, VI, 27, décembre 1981, p. 49-74.
- GOURIOU, Y. - 1984 - Evolution des températures de surface de la mer au voisinage de 0°, 10°W en Atlantique. V.C.S. n° 2, juillet 1984, p. 16-17.
- GUILLOT, B., CITEAU, J., THEPENIER, R.M. - 1983 - La surveillance des grands événements climatiques à partir d'observations satellitaires. ORSTOM, IDT 61, Télédétection 9, 15 p., 10 fig., 2 pl. photo.
- GUILLOT, B. - 1984 - Les fronts thermiques continentaux en Afrique. Situation au début de l'année 1984. V.C.S. n° 1, mai 1984, p. 9-10.
- GUILLOT, B. - 1984 - Brève analyse des champs thermiques continentaux en Afrique de l'ouest, en mai-juin 1984. V.C.S. n° 2, juillet 1984, p. 14-15.
- GUILLOT, B. - 1984 - Fronts et champs thermiques continentaux en juillet-août 1984. V.C.S. n° 3, septembre 1984, p. 13-18.
- GUILLOT, B. - 1984 - Champs thermiques continentaux en septembre-octobre 1984, et bilan des saisons 1983-1984. V.C.S. n° 4, 1984, p. 12-18.
- GUILLOT, B. - 1985 - Champs thermiques continentaux, en novembre-décembre 1984. V.C.S. n° 5, janvier 1985, p. 11-16.
- GUILLOT, B. - 1985 - Champs thermiques continentaux en Afrique de l'ouest, en janvier-février 1985. V.C.S. n° 6, mars 1985, p. 7-12.
- GUILLOT, B. - 1985 - Température de surface de la mer et pluviosité autour du golfe de Guinée. V.C.S. n° 6, mars 1985, p. 13-14.
- GUILLOT, B., CITEAU, J. - 1982 - Le globe dans l'infra-rouge thermique. Météosat-2 ou le mérite de la simplicité. Note antenne ORSTOM Lannion 4 p., 2 fig., 1 pl. couleur, éditeur Imprim.
- HASTENRATH, S., LAMB, P. - 1977 - Some aspects of circulation and climate over the eastern equatorial atlantic. *Monthly Weather Review*, vol. 105 n° 8, august 1977.
- HASTENRATH, S., LAMB, P. - 1977 - Climatic atlas of the tropical atlantic and eastern pacific oceans. The University of Wisconsin Press, Madison, Wisconsin 53701. 15 p. 97 ch.
- HISARD, P., VOITURIEZ, B. - 1981 - Monitoring equatorial SST in the Atlantic. *Tropical Ocean-Atmosphere Newsletter* n° 6, April 1981.
- LAHUEC, J.P. - 1984 - Convergence intertropicale. Intensité de la convection en janvier-mars 1984. V.C.S. n° 1, mai 1984, p. 7-8.
- LAHUEC, J.P. - 1984 - Convergence intertropicale. Intensité de la convection en avril-mai 1984. V.C.S. n° 2, juillet 1984, p. 10-13.
- LAHUEC, J.P. - 1984 - Convergence intertropicale. Intensité de la convection en juin-juillet 1984. V.C.S. n° 3, septembre 1984, p. 8-12.
- LAHUEC, J.P. - 1984 - Convergence intertropicale. Intensité de la convection en août-septembre 1984. V.C.S. n° 4, novembre 1984, p. 6-9.
- LAHUEC, J.P. - 1985 - Convergence intertropicale. Intensité de la convection en octobre-novembre 1984. V.C.S. n° 5, janvier 1985, p. 6-10.
- LAHUEC, J.P. - 1985 - Convergence intertropicale. Intensité de la convection en décembre 1984-janvier 1985. V.C.S. n° 6, mars 1985, p. 5-6.
- LEROUX, M. - 1983 - Le climat de l'Afrique Tropicale. Vol. 1, 633 p., vol. 2, Atlas, 24 p. 250 planches. Edit. Champion, Paris.
- LUTHEJARMS, E. - 1979 - Use of Meteosat in southern ocean oceanology and southern hemisphere meteorology. CSIR report sea 7918, Stellenboch, South Africa june 1979, 37 p., 13 fig.
- MARTIN, D.W. et al - 1984 - Métamorphose d'un amas de nuages au cours de l'ETGA. OMM, Conférence Régionale de Dakar, p. 160-164.
- MERLE, J., DELCROIX, Th. - 1983 - Double seasonal tilt of the thermocline in tropical Atlantic ocean. *Tropical Ocean Atmosphere Newsletter* n° 13, May 1983.
- MICHELCHEN, N. - 1985 - The Southern Oscillation and the interannual upwelling variations off northwest Africa and in the golf of Guinée. *Tropical Ocean Atmosphere Newsletter*, 30, mars 1985, p. 17-18.

- MORGAN, J. - 1979 - Meteosat calibration report, issues 3 to 7. MDMD/MET, ESOC, Darmstadt.
- PIANET, R. - 1982 - Rapport du groupe de travail sur le traitement des données de l'année Listao. Dakar 14-25 juin 1982. Doc. ICCAT SCRS/82.1-82.
- PITON, B. - 1983 - Early surfacing of the equatorial undercurrent water in the eastern gulf of Guinea. Tropical Ocean Atmosphere Newsletter, n° 20, September 1983.
- PITON, B. - 1985 - Anomalie thermique dans la partie orientale du golfe de Guinée durant l'été 1984 et pluviosité excédentaire à Sao Tomé. V.C.S. n° 5, janvier 1985, p. 22-25.
- PITON, B., ROY, C. - 1982 - Données d'environnement pour la période juin, juillet et août 1981 dans le golfe de Guinée. Rapport provisoire, Antenne ORSTOM COB Brest, 21 p., 67 fig.
- MONTENY, B.A. - 1985 - Apport de la bioclimatologie à l'interprétation des interactions végétation-atmosphère et leurs impacts sur les caractéristiques climatiques. ORSTOM, dact., 17 p., 4 fig., bibliographie.
- OLORY-TOGBE, P. - 1982 - Caractéristiques des systèmes précipitants observés en Afrique de l'ouest pendant COPT 79. La Météorologie, VI, 29, juin-septembre 1982, p. 145-152.
- REED, J. - 1984 - Perturbations à l'échelle synoptique se déplaçant vers l'ouest durant l'été de l'hémisphère nord dans la zone tropicale de l'Afrique et la zone adjacente de l'Atlantique. OMM, Conférence Régionale de Dakar, p. 125-129.
- REED, J. - 1984 - Variation diurne de la convection estivale au-dessus de la zone tropicale de l'Afrique d'après les mesures effectuées dans l'infrarouge par Météosat-1. OMM, Conférence Régionale de Dakar, p. 194-195.
- ROLKE - non publié - The Biomass distribution of smaller zooplankton in the upper 300 m of the equatorial Atlantic, I.F.G., Kiel, FRG.
- SERVAIN, J., PICAUT, J., MERLE, J. - 1982 - Evidence of remote forcing in the equatorial Atlantic Ocean. Journal of physical oceanography, 12, p. 457-463.
- STRÉTTA, J.M., FAVARD, J.C., CITEAU, J. - 1980 - Météosat et l'expérience d'aide à la pêche. Comptes rendus du 6^e Symposium canadien sur la télédétection 21-31 mai 1980, Halifax, Canada.
- THEPENIER, R.M. - 1984 - Etude des fluctuations des zones convectives en Afrique, à partir des images Météosat. V.C.S. n° 1, mai 1984, p. 11-16.
- THEPENIER, R.M. - 1984 - Etude des fluctuations des zones d'instabilité convective en Afrique à partir des images Météosat. V.C.S. n° 2, juillet 1984, p. 18-19.
- THEPENIER, R.M. - 1984 - Etude des zones d'instabilité convective en Afrique à partir des images Météosat. V.C.S. n° 3, septembre 1984, p. 23-24.
- YATTARA, H. - 1985 - Note sur la situation synoptique de type invasion polaire du 29 décembre au 4 janvier 1985 sur le Sénégal. V.C.S. n° 5, janvier 1985, p. 17-21.

LISTE DES PLANCHES ET DES FIGURES

- Planche I – Synthèse infra-rouge thermique Météosat du 17 au 23 juin 1982, p. 11.
- Fig. 1 – Zone couverte par l'opération listao, p. 10.
- Fig. 2 – Front thermique, du 26/04 au 2/05/1984, coupe à 4° EST, p. 12.
- Fig. 3 – Position du minimum des vents alizés (trait continu) et position du maximum de nébulosité (trait tireté) le long du 28°W (d'après les données de l'Atlas d'HASTENRATH (HASTENRATH et al., 1977), p. 13.
- Fig. 4 – Position de la Zone Intertropicale de Convergence à 28° ouest, p. 15.
- Fig. 5 – Tension du vent au rocher St-Paul (= 0°, 30°W) en trait fin (1979), en trait gras (1983) – Document aimablement communiqué par S. Garzoli (Lamont Observatory), p. 16.
- Fig. 6 – Position de la ZITC à 28° W et température moyenne de surface de la mer entre 4° N et 5° S, p. 17.
- Fig. 7 – Anomalies de la température de surface de la mer (Equateur – 10°W), p. 18.
- Fig. 8 – Evolution des zones d'instabilité de la zone intertropicale de convergence intertropicale, de janvier à décembre 1983, p. 20-21.
- Fig. 9 – Evolution des zones d'instabilité de la zone intertropicale de convergence de janvier à mai 1984, p. 22.
- Fig. 10 – Comparaison de fréquences d'amas convectifs – juillet 1984-juillet 1983, p. 24.
- Fig. 11 – Pluviosité de juin à septembre 1984, p. 26.
- Fig. 12 – Fronts thermiques, en 1983-1984, p. 29.
- Fig. 13 – Amas convectifs et niveaux thermiques au sol, semaine du 30 août au 5 septembre 1984, p. 31.

TABLE DES MATIERES

Préambule

Introduction

1. Création de fichiers d'observation. Problèmes de méthode et de mise en forme des résultats

1.1. Le traitement des données Météosat

1.1.1. Température de surface de la mer. L'opération listao et ses prolongements

1.1.1.1. Traitement des données infra-rouge Météosat

1.1.1.2. Calage en température et calibration

1.1.1.3. L'opération d'aide à la pêche

1.1.2. Température radiative apparente sur le continent

1.2. Extension en latitude de la Zone Intertropicale de Convergence (ZITC)

1.2.1. Position en latitude de la ZITC à 28° ouest

1.2.2. Analyse des nuages convectifs et établissement de cartes de fréquence

2. Suivi des événements climatiques et interrelation océan-continent

2.1. Position en latitude de la ZITC et température de surface de la mer

2.1.1. Mouvements de la ZITC à 28° ouest

2.1.2. Mouvements de la ZITC et température de surface

2.2. Analyse de la convection

2.2.1. Evolution annuelle de la convection

2.2.2. Evolution interannuelle sur l'océan et sur le continent

2.2.3. Température de surface de la mer, convection et pluviosité

2.3. Champs thermiques en Afrique de l'ouest, et déplacements interannuels de la ZITC

2.3.1. Fronts thermiques en Afrique de l'ouest et suivi des déplacements de la ZITC

2.3.2. Champs thermiques et convection sur le continent

2.3.3. Projet de surveillance à échelle fine de la convection

Conclusion

Bibliographie

