Analyse des séries vents-températures de la mer en surface, le long des côtes sénégalaises

Patrick PORTOLANO (1)

RÉSUMÉ

Une synthèse de l'hydrologie côtière de surface au large du Sénégal a été faite à partir des documents disponibles à Dakar. Les données journalières de température et de salinité collectées par le Centre de Recherches Océanographiques de Dakar-Thiaroye (CRODT) aux cinq stations côtières sénégalaises, entre 1968 et 1979, ont été examinées, ainsi que les données trihoraires de vent, aimablement fournies par l'Agence pour la Sécurité de la Navigation Aérienne, pour les périodes correspondantes.

Des autospectres et spectres croisés des températures de surface de l'océan et des vents de surface découpés par secteur en divers points des côtes sénégalaises ont été calculés.

Des corrélations entre vents et températures sont apparues sur une large gamme de périodes (2 à 60 jours). L'action du vent sur les températures de surface semble être régie par plusieurs mécanismes distincts, notamment:

- *les variations basse fréquence (inférieure à 1/20 jours) de la position moyenne de la Zone Intertropicale de Convergence, ce phénomène se manifestant à l'échelle de l'Atlantique Intertropical,*
- *les variations à plus haute fréquence (10 à 20 jours) de l'intensité et de la direction du vent local.*

La principale difficulté rencontrée dans l'analyse des données océanographiques au Sénégal est probablement de séparer ces mécanismes les uns des autres, que ce soit dans le domaine temporel ou dans le domaine fréquentiel.

MOTS-CLÉS : Vent — Température de la mer — Sénégal.

ABSTRACT

WIND AND SEA SURFACE TEMPERATURE SERIES OFF SENEGALESE COAST (WESTERN AFRICA)

Surface coastal hydrology of Senegal waters has been studied from data available in Dakar. Temperature and salinity, collected daily, from 1968 to 1979, by the « Centre de Recherches Océanographiques de Dakar-Thiaroye » (CRODT), at five coastal stations, have been analysed, as well as 3-hour wind records, kindly provided by the « Agence pour la Sécurité de la Navigation Aérienne ».

Autospectra and cross-spectra of surface temperature and wind at several coastal stations have been calculated.

Correlations between wind and temperature appear on a large range of periods (2 to 60 days). The influence of wind on surface temperature seems governed by several different means, among which:

- *low frequency (less than 1/20 days) variations of the Intertropical Convergence Zone mean position, which is the usual observation in the Intertropical Atlantic Ocean,*
- *variations at a higher frequency (10 to 20 days) of the strength and direction of the local wind.*

The main difficulty to solve, in the analysis of oceanographic data off Senegal, is probably to distinguish the part played by the different events, either from a time or a frequency point of view.

KEY WORDS : Wind — Sea temperature — Senegal.

(1) *c.o. ORSTOM (Océanographie), 213, rue Lafayette, 75480 Paris cedex.*

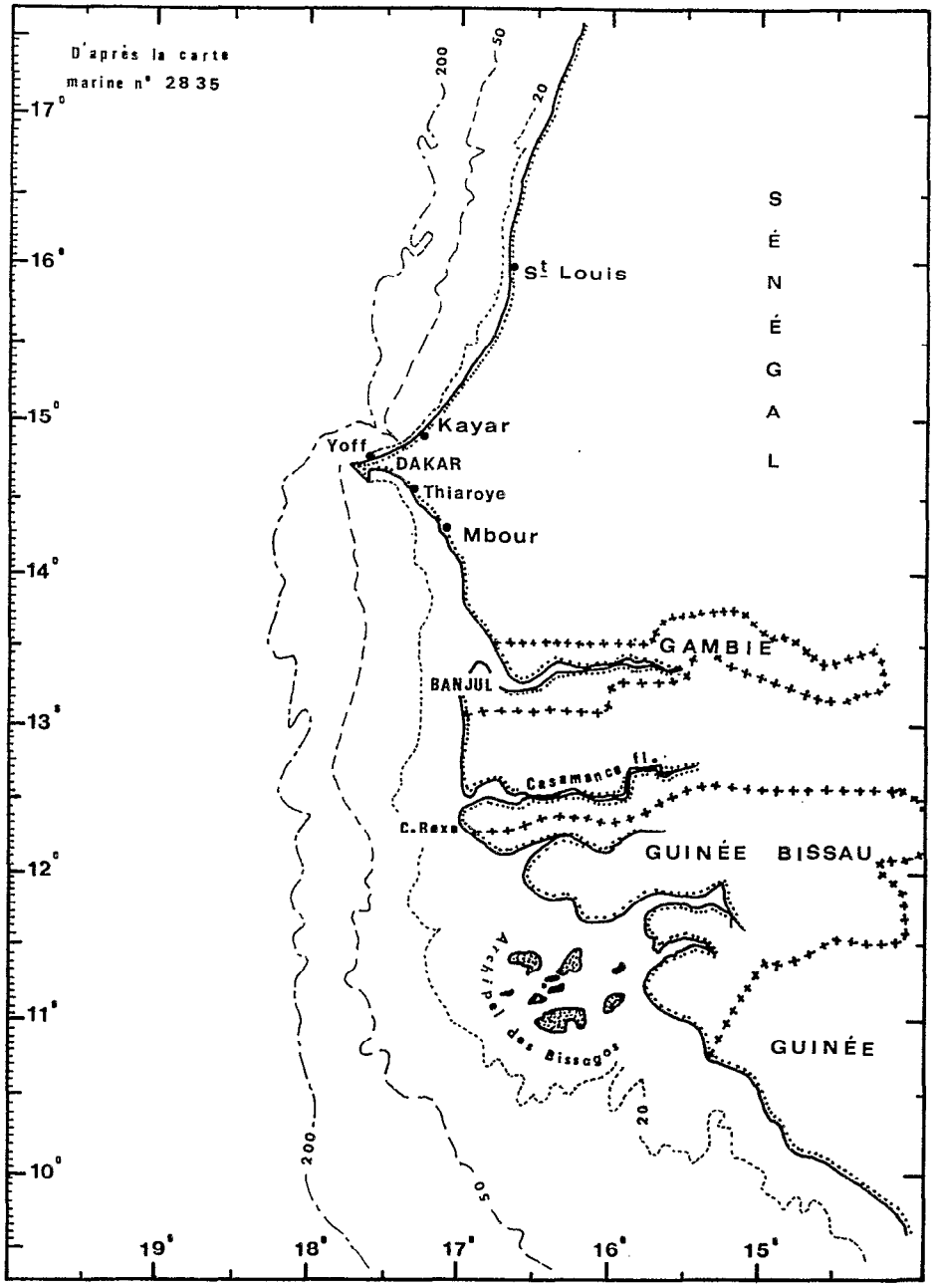


FIG. 1. — Situation des stations côtières. *Localization of the coastal stations*

1. INTRODUCTION

Le but de cette étude est d'examiner quel peut être l'apport pour l'océanographie physique de l'analyse des données de températures régulièrement collectées aux stations côtières du littoral sénégalais (fig. 1). Ces données sont principalement utilisées pour une description du milieu physique, destinée à la compréhension de l'environnement biologique. Un bref rappel météorologique sera d'abord effectué, suivi de la présentation et de l'examen critique des données en vue de leur utilisation pour la détection de phénomènes de propagation. Une tentative de mise en évidence de ces phénomènes sera ensuite effectuée.

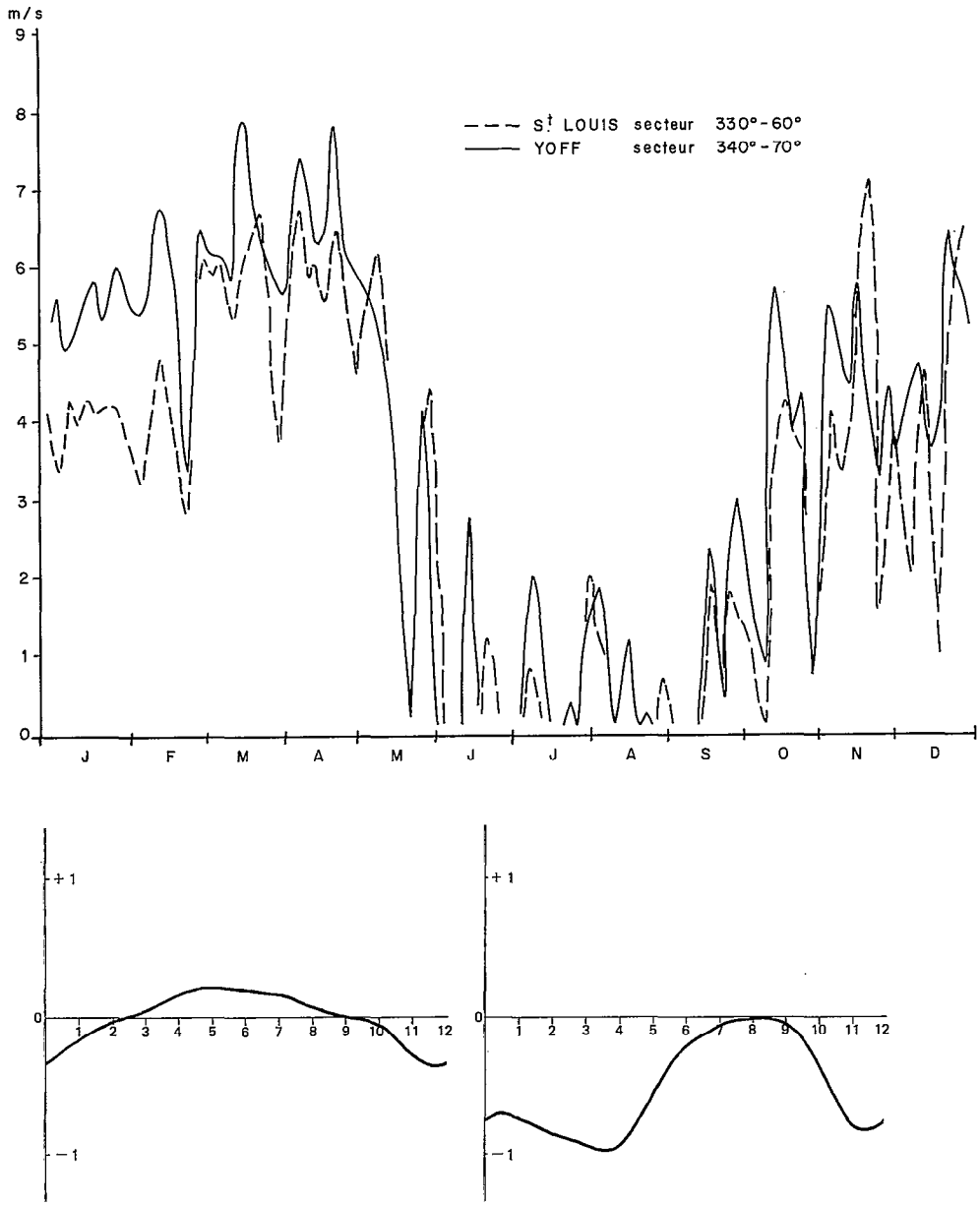


FIG. 2. — Régime du vent le long des côtes sénégalaises. En haut : intensité de l'alizé de N. E. à St-Louis et à Yoff, en 1974 ; en bas : évolution de la tension moyenne mensuelle du vent au large du Cap Vert (dynes cm^{-2}), à gauche : tension zonale, à droite : tension méridienne. *Winds along senegalese coasts. Above: speed of the N.E. trade wind, at St-Louis and Yoff, in 1974; below: evolution of the average monthly wind stress off Cap Vert (dynes cm^{-2}), left: zonal stress, right: meridian stress*

2. RAPPEL CLIMATIQUE

2.1. **Régime météorologique**

Le régime météorologique au large des côtes sénégalaises peut être décrit par l'alternance de deux saisons, la saison sèche et la saison humide ou hivernage (fig. 2). La saison sèche dure de novembre à mai. Les vents dominants sont les alizés soufflant du Nord-Est et pouvant atteindre plus de 6 m/s en moyenne journalière. La saison humide dure de juin à octobre. L'intensité des vents y dépasse rarement 3 m/s en moyenne journalière et leur direction est très variable. Cette alternance saisonnière est étroitement liée à l'évolution de la position moyenne mensuelle de la zone interpropicale de convergence

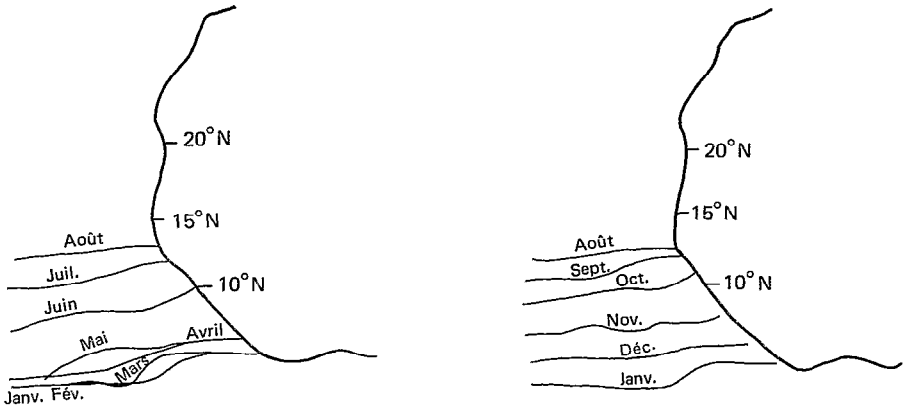


FIG. 3. — Évolution de la position moyenne mensuelle de la zone intertropicale de convergence. *Evolution of average monthly position of the intertropical convergence zone*

(ZITC) reproduite à la figure 3. Lorsqu'elle est à plus de 5° de latitude au Sud des côtes sénégalaises, le régime des alizés y prédomine.

Cette description très schématique doit être cependant nuancée. D'importantes variations interannuelles se produisent, la saison humide pouvant être considérablement réduite. Par ailleurs, sur la frange côtière sénégalaise ce schéma se complique à cause de l'influence thermique du continent africain. En saison sèche notamment, les importantes différences de température entre l'océan et le continent ajoutent une forte composante thermique diurne aux alizés dirigée vers l'Est (HALPERN, 1977).

2.2. Régime hydroclimatique

Les côtes sénégalaises sont situées dans la zone du maximum d'amplitude thermique annuelle de l'océan Atlantique tropical Nord (MERLE et LE FLOCH, 1978), cette amplitude dépassant plus ou moins 5 °C à 5 m de profondeur. Le régime hydroclimatique est caractérisé par l'alternance d'une saison froide durant l'hiver boréal et d'une saison chaude durant l'été (BERRIT, 1952), séparées par deux saisons de transition, le réchauffement et le refroidissement. La saison froide est attribuée à la remontée d'eaux froides des profondeurs sous l'effet mécanique de la tension du vent à la surface de l'océan (upwelling).

Les mécanismes de transition entre les saisons froides et chaudes ont été à ce jour peu étudiés. Un examen de l'ensemble des missions océanographiques effectuées par le Centre de Recherches Océanographiques de Dakar-Thiaroye (CRODT) de 1960 à 1980 (PORTOLANO, 1981) ainsi que l'analyse des images satellites effectuée par DOMAIN (1980) conduit aux conclusions suivantes :

— le réchauffement aurait un caractère propagatif marqué du Sud vers le Nord (fig. 4). Il affecterait, le long du talus continental, une couche d'eau superficielle de 100 m à 200 m d'épaisseur et pourrait s'opérer au Sénégal en l'espace de quelques jours;

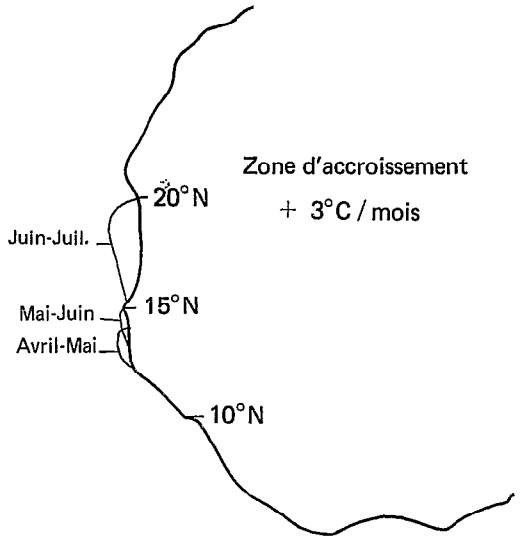


FIG. 4. — Évolution de la zone de réchauffement, *d'après* HASTENRATH et LAMB (1977) (ces zones sont comprises entre le continent et les lignes tracées au large). *Evolution of warming area,* after HASTENRATH *and* LAMB *(1977) (these areas between the coast and the lines offshore)*

— le refroidissement présenterait, par contre, un caractère oscillatoire de l'Est vers l'Ouest (fig. 5). Il serait étroitement lié à l'instauration progressive d'un régime stable des alizés : l'établissement des alizés pendant une durée de plusieurs jours provoquerait une remontée d'eaux froides le long des côtes qui se disperserait vers le large. Un arrêt des alizés pendant quelques jours causerait un réchauffement

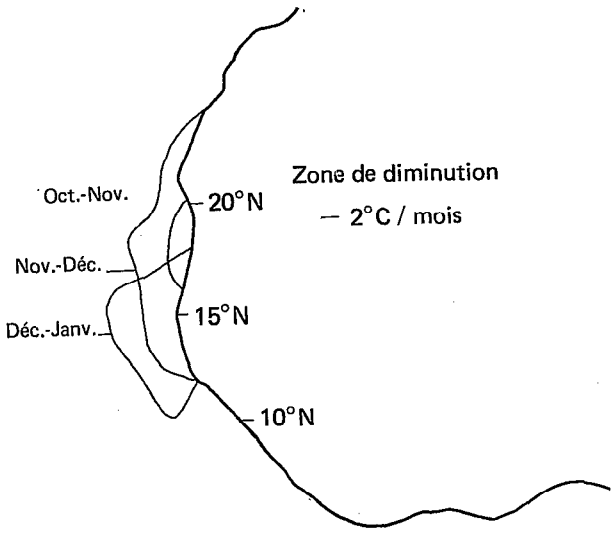


FIG. 5. — Évolution de la zone de refroidissement, *d'après* HASTENRATH et LAMB (1977) (ces zones sont comprises entre le continent et les lignes tracées au large). *Evolution of cooling area,* after HASTENRATH *and* LAMB *(1977) (these areas between the coast and the lines offshore)*

rapide des eaux côtières cessant dès leur reprise. Ce phénomène se répéterait jusqu'à ce que l'intensité des alizés se stabilise, c'est-à-dire jusqu'à ce que la ZITC ait migré suffisamment vers le Sud.

Une description plus détaillée des principales structures hydrologiques se mettant en place à chaque saison est fournie par DOMAIN (1980) et PORTOLANO (1981).

3. PRÉSENTATION DES DONNÉES

3.1. **Séries chronologiques utilisées**

Deux types de séries de données ont été analysées :

— des données hydroclimatiques recueillies en cinq stations côtières durant la période 1974-1979 par le CRODT;

— des données météorologiques recueillies en six stations météorologiques durant la période 1970-1978 par l'Agence pour la Sécurité de la Navigation Aérienne (ASECNA).

3.1.1. DONNÉES HYDROCLIMATIQUES

Des données hydroclimatiques côtières sont recueillies par le CRODT depuis 1960. Cependant, nous ne disposons de séries complètes pour l'ensemble des cinq stations côtières que durant la période 1974-1979 : c'est donc essentiellement sur cette période que portera notre analyse. Les cinq stations côtières sont situées à Saint-Louis, Kayar, Yoff, Thiaroye et M'Bour (fig. 1). Quotidiennement, à ces stations, un seau d'eau de mer est prélevé dans lequel :

— un échantillon d'eau est pris afin de mesurer ultérieurement sa salinité,

— une mesure de température est effectuée au thermomètre à mercure.

Les mesures sont généralement faites dans la matinée. Les séries de température utilisées sont présentées à la figure 6.

3.1.2. DONNÉES MÉTÉOROLOGIQUES

L'ASECNA a mis à notre disposition des bandes magnétiques contenant les relevés trihoraires ou horaires des direction et intensité du vent pour la période de 1968 à 1977, au Sénégal et en Mauritanie. Les stations météorologiques de Nouadhibou, Nouakchott, Saint-Louis, Kaolack et Yoff ont été analysées. Ces mesures ont été moyennées vectoriellement, afin d'obtenir une moyenne journalière de la direction et de l'intensité du vent. Les stations de Yoff et Saint-Louis se sont révélées être les plus utiles et seront retenues pour les analyses qui suivent (fig. 7).

3.2. **Critiques des données hydrométéorologiques**

3.2.1. ÉCHANTILLONNAGE ET DONNÉES MANQUANTES

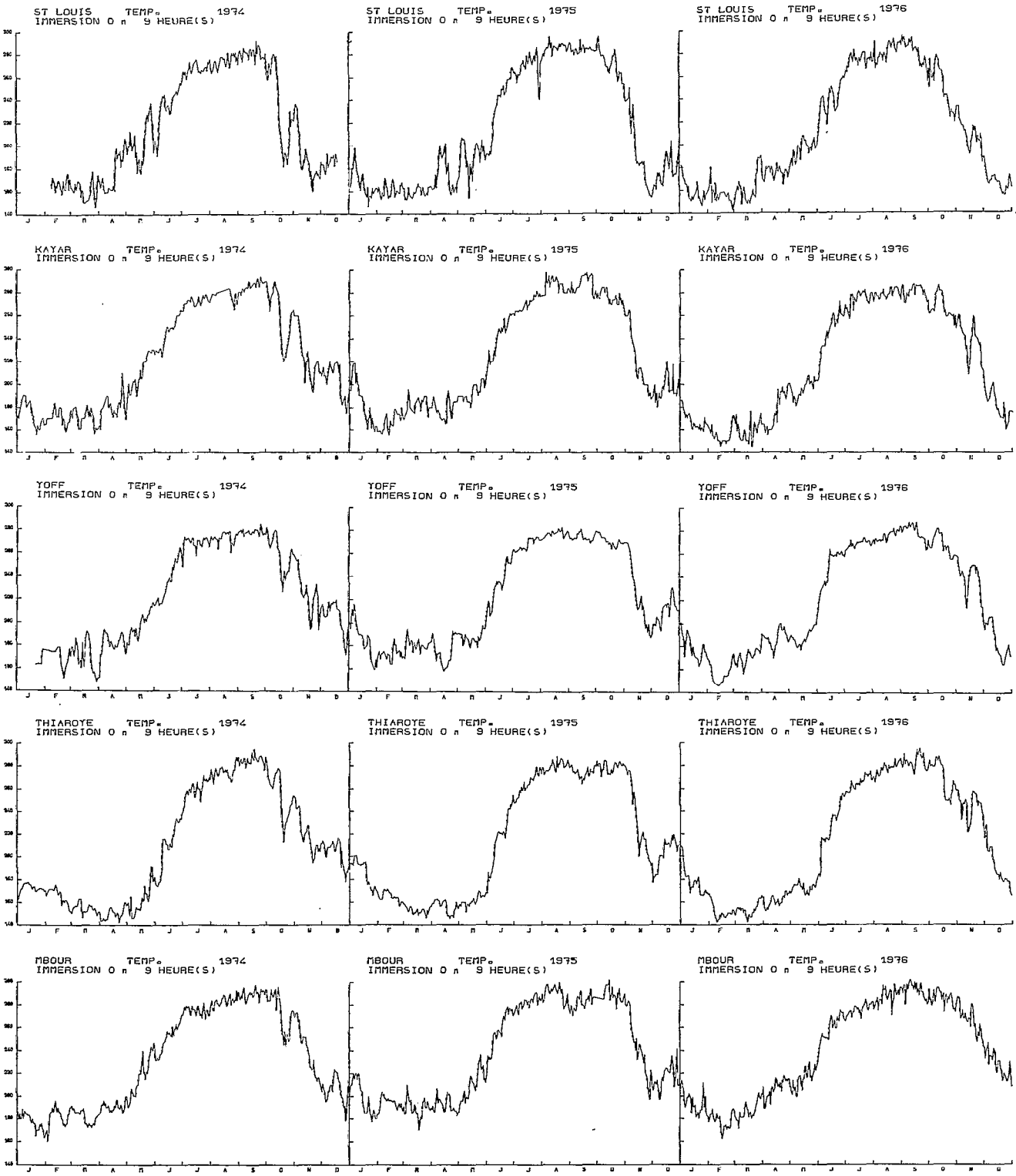
Des intervalles de temps sans données apparaissent dans les séries des relevés de température côtière :

— Saint-Louis : 1/1/74 au 8/2/74, 20/12/74 au 1/1/75;
— Kayar : 8/8 au 21/8/74, 2/7 au 17/8/78;
— Yoff : 1/1 au 20/1/74, 29/1 au 3/2/74;
— M'Bour : 28 au 31/3/74, 1 au 7/10/75, 16 au 30/11/78, 26/5 au 1/6/79.

A ces périodes, s'ajoutent sporadiquement quelques « trous » de un ou deux jours. Estimé en pourcentage, le nombre des données manquantes s'élève, pour chacune des stations, à :

— Saint-Louis : 6,5 %
— Kayar : 14,7 %
— Yoff : 15,4 %
— Thiaroye : 0,1 %
— M'Bour : 2,3 %

La donnée manquante x_n au temps t_n a été estimée par un tirage aléatoire autour de la tendance calculée par une moyenne glissante sur l'intervalle $[t_n\text{-}5\ j,\ t_n + 5\ j]$. La loi utilisée pour ce tirage est une loi gaussienne de moyenne 0 et d'écart type : $\sigma = \sqrt{1/N\ \Sigma_{i=1}^{N}\ (x_i - \bar{x}_i)^2}$ où x_i est la mesure i, $\bar{x}_i$ est la moyenne mobile sur 10 jours, N est le nombre de mesures.


ST LOUIS TEMP. 1974
IMMERSION 0 m 9 HEURE(S)
ST LOUIS TEMP. 1975
IMMERSION 0 m 9 HEURE(S)
ST LOUIS TEMP. 1976
IMMERSION 0 m 9 HEURE(S)
KAYAR TEMP. 1974
IMMERSION 0 m 9 HEURE(S)
KAYAR TEMP. 1975
IMMERSION 0 m 9 HEURE(S)
KAYAR TEMP. 1976
IMMERSION 0 m 9 HEURE(S)
YOFF TEMP. 1974
IMMERSION 0 m 9 HEURE(S)
YOFF TEMP. 1975
IMMERSION 0 m 9 HEURE(S)
YOFF TEMP. 1976
IMMERSION 0 m 9 HEURE(S)
THIAROYE TEMP. 1974
IMMERSION 0 m 9 HEURE(S)
THIAROYE TEMP. 1975
IMMERSION 0 m 9 HEURE(S)
THIAROYE TEMP. 1976
IMMERSION 0 m 9 HEURE(S)
MBOUR TEMP. 1974
IMMERSION 0 m 9 HEURE(S)
MBOUR TEMP. 1975
IMMERSION 0 m 9 HEURE(S)
MBOUR TEMP. 1976
IMMERSION 0 m 9 HEURE(S)

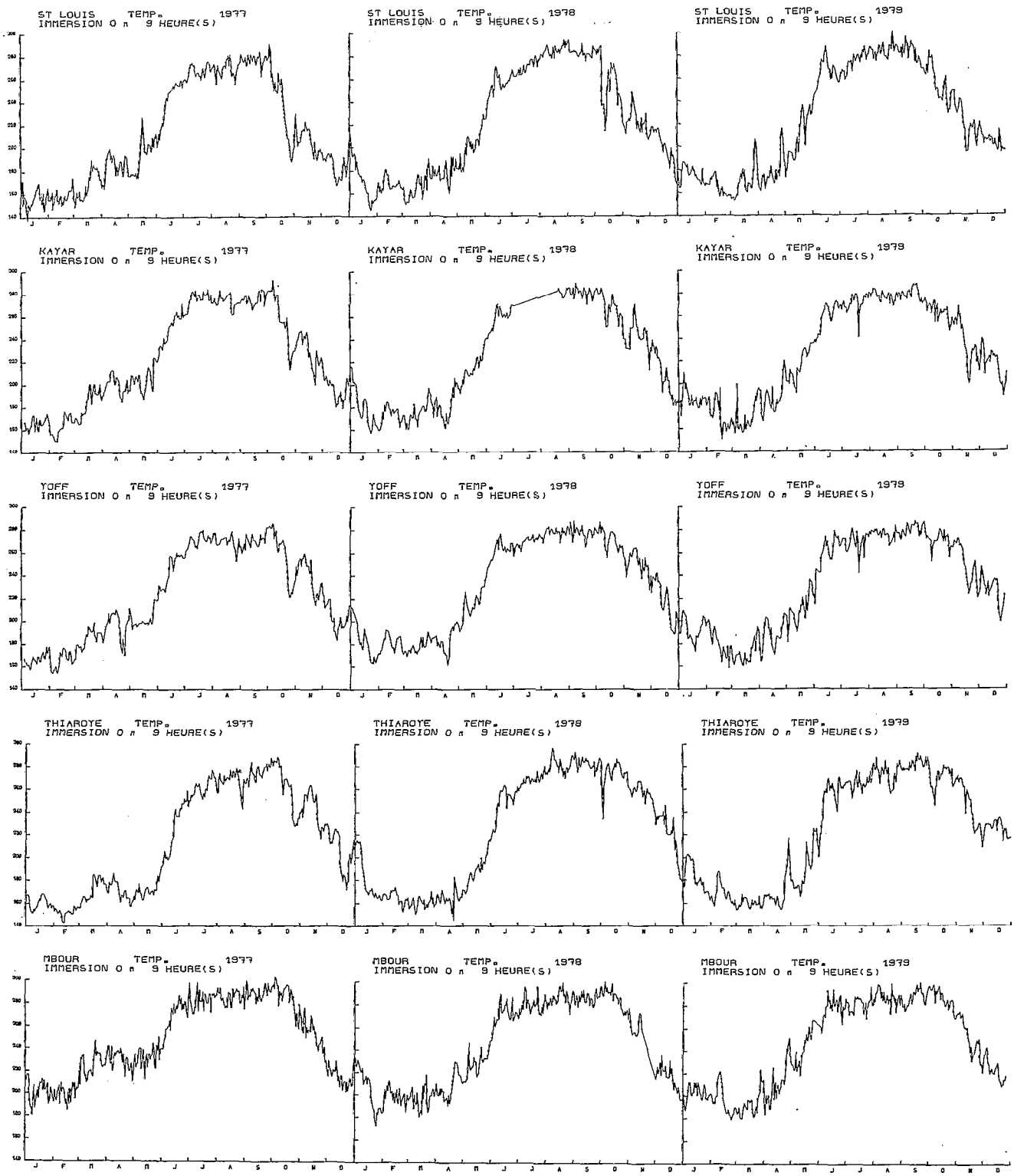


FIG. 6. — Séries temporelles de relevés de température sur le littoral sénégalais. *Temperature time series along senegalese coast*

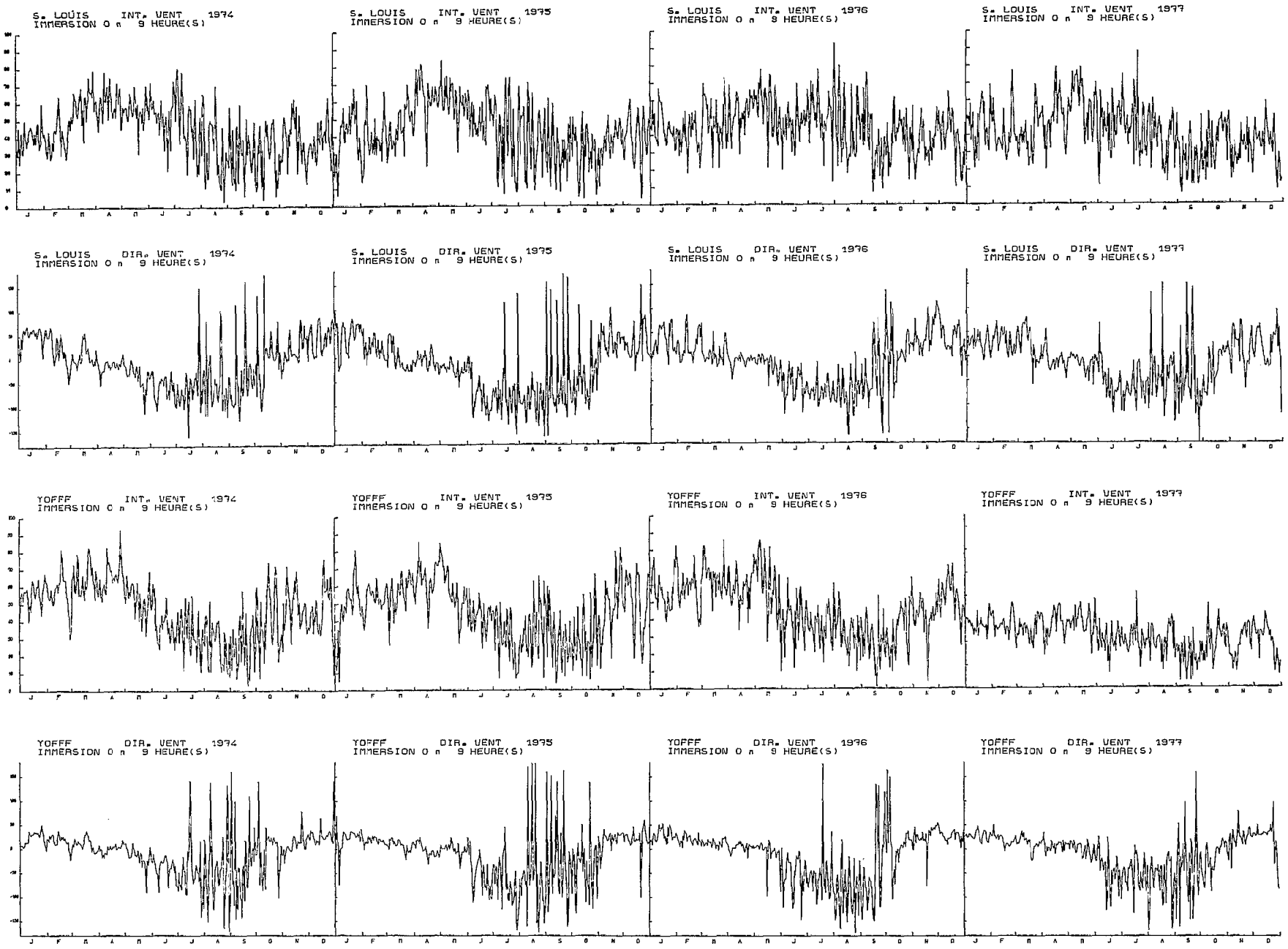


FIG. 7. — Séries temporelles de mesures d'intensité du vent et de repérages de sa direction aux stations de St-Louis et Yoff. *Wind speed and direction time series at St-Louis and Yoff*

La précision des mesures de température a été estimée meilleure que ± 0,3 °C. En effet, après avoir analysé les données filtrées en passe bande avec diverses fenêtres, nous avons constaté que les données filtrées étaient incohérentes entre les stations pour les fluctuations d'amplitude inférieures à ± 0,3 °C. Cette grandeur semble raisonnable, compte tenu de la précision des thermomètres utilisés et du mode opératoire. Une erreur systématique supérieure à ± 0,3 °C reste cependant possible, mais n'a qu'une importance minime dans la mesure où nous nous intéressons plus à des fluctuations qu'à des valeurs absolues. Par exemple, une erreur systématique d'environ + 2 °C sur les températures de Kayar d'août à septembre 1975 a été identifiée. De telles erreurs sont très difficiles à déceler.

3.2.2. Situation hydrologique des stations

Un examen attentif des séries de températures et de salinités, ainsi que des comparaisons avec des campagnes faites au large, permettent de contrôler la fiabilité avec laquelle les stations sont représentatives des conditions hydrologiques sur le plateau. Nous n'avons pas noté de différence systématiquement forte entre les mesures aux stations et les mesures en mer, sauf pour la station de M'Bour. Le nombre de campagnes permettant ce contrôle est faible pour les stations ouvertes après 1972 (Saint-Louis, Kayar, Yoff).

Station de Saint-Louis

Il se produit en fin de saison froide (avril-mai) depuis l'ouverture de la station des changements de masses d'eau importants : les eaux froides de salinité inférieure à 36‰, normales en cette saison, sont remplacées par des eaux plus chaudes de 3 °C et dont la salinité dépasse 36,5‰ (fig. 8).

Ce phénomène s'est produit en particulier en 1960 et une campagne au large a montré l'existence d'une zone plus chaude et plus salée près de la côte (Gousset, 1962). A cette époque, les mesures faites dans l'estuaire du Sénégal, devant Saint-Louis, montraient que les salinités étaient partout inférieures à celle de la station côtière et que des eaux dessalées étaient encore présentes en juin.

On a donc, probablement, une advection littorale d'eau ayant stagné au Nord de Saint-Louis. Ce phénomène masque, pendant quelques semaines, les conditions hydrologiques prévalant plus au large et rend ainsi impossible la détermination de la date du début du réchauffement à cette station.

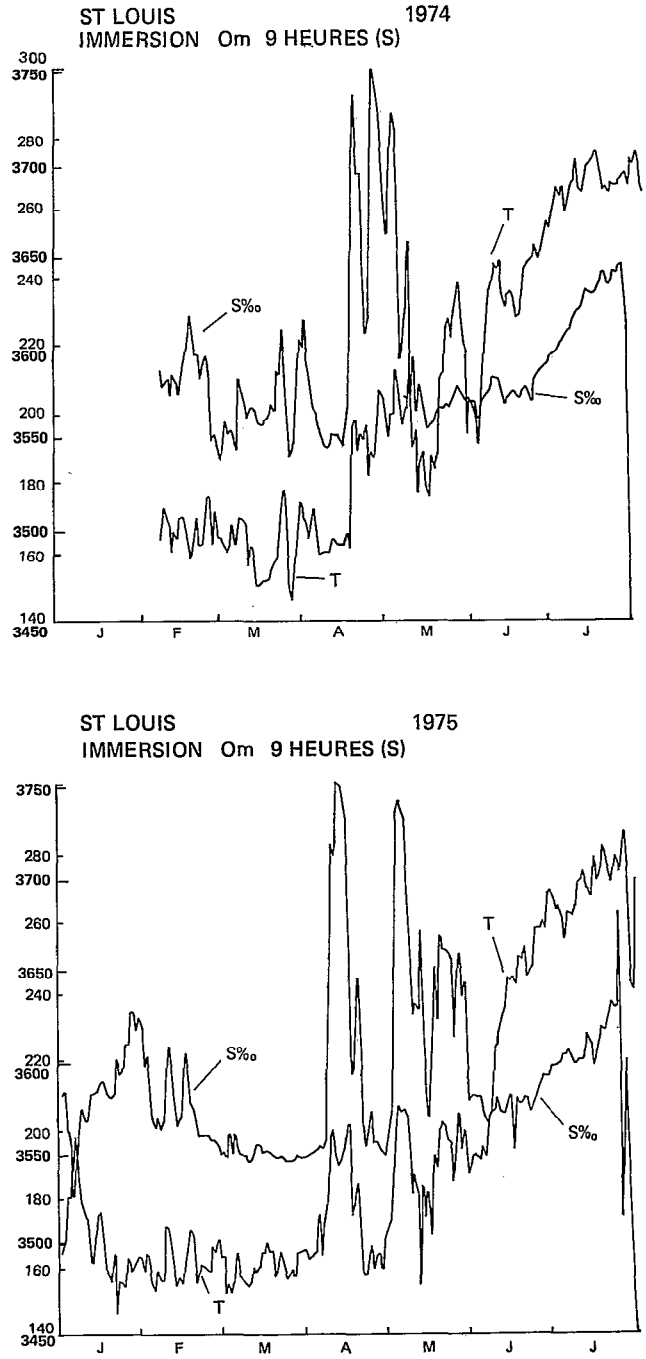


Fig. 8. — Comparaison de l'évolution de la salinité et de la température à St-Louis. *Comparison between salinity and temperature evolutions at St-Louis*

Station de Kayar

Nous n'avons rien remarqué d'anormal dans les températures. Par contre, les salinités sont anormalement faibles en saison froide, où l'on observe des salinités inférieures à 35,1‰. Les faibles salinités pourraient s'expliquer par une contamination par une nappe phréatique ou par des remontées d'eaux froides et dessalées.

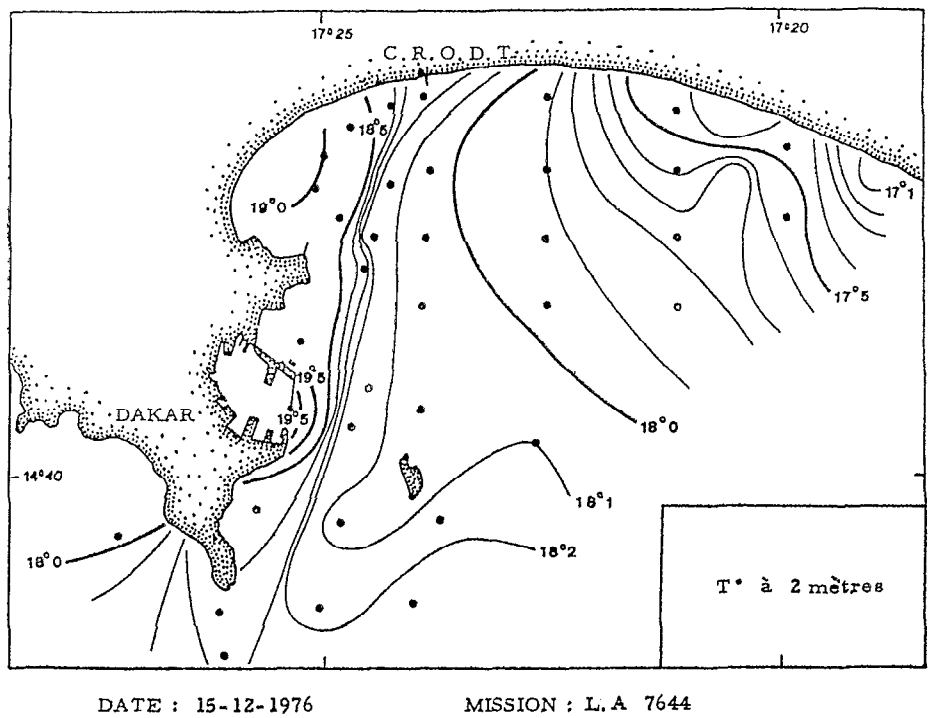


FIG. 9. — Situation de contamination thermique littorale au large de la Baie de Hann (Dakar). *Water temperature contamination off Baie de Hann (Dakar)*

Station de Yoff

Les salinités et les températures ne présentent aucune fluctuation suspecte et restent dans des valeurs raisonnables pour le large. Nous pensons que les phénomènes locaux ne sont pas prépondérants à cette station.

Station de Thiaroye

Cette station est située en zone urbaine dense. La circulation littorale est assez importante pour que des mesures faites à la côte représentent avec une approximation raisonnable les conditions sur le plateau. Toutefois, lorsque les alizés cessent pendant plusieurs jours en saison froide, cette circulation s'inverse et l'eau qui est alors échantillonnée peut provenir de la baie de Hann contaminée par les rejets urbains et de température supérieure de quelques degrés à celle plus au large (fig. 9).

Station de M'Bour

C'est la seule station où nous avons remarqué, en saison froide, des températures systématiquement plus élevées de quelques degrés par rapport à celles relevées quelques milles au large par des navires océanographiques. Les températures à la station de M'Bour sont, par ailleurs, supérieures de près de 3 °C à celles de Thiaroye en saison froide, alors qu'une différence de 1,5 °C le long du jet de la Petite Côte, entre Thiaroye et M'Bour, correspond à ce qui est généralement observé lors des campagnes océanographiques en période d'upwelling.

BERRIT (1961) a individualisé une zone plus chaude au Sud de la Petite Côte et la station de M'Bour appartient probablement à cette zone qui serait caractérisée par sa faible profondeur et des salinités plus élevées qu'au large depuis 1972 (PORTOLANO, 1981).

3.2.3. VALIDITÉ DES HYPOTHÈSES NÉCESSAIRES À L'ANALYSE SPECTRALE

Les mesures de température faites aux stations côtières sont supposées s'écrire sous la forme : $x(t) = X(t) + (Zt)$ où $X(t)$ est le signal que nous cherchons à analyser; il est constitué de l'ensemble des signaux d'origine hydroclimatique de fréquence inférieure à la fréquence de Nyquist ($0{,}5\ j^{-1}$); $Z(t)$ regroupe l'ensemble des autres signaux qui se manifestent au moment de la mesure; $Z(t)$ est constitué, en particulier :

— du bruit blanc généré par le mode opératoire,

— de la partie haute fréquence (supérieure à la

fréquence de Nyquist) du spectre de variabilité hydroclimatique, notamment celle liée aux phénomènes hydrométéorologiques très locaux.

Il apparaît, ainsi, que nous ne pouvons parler, au sens strict, de stationnarité d'ordre 2 pour les séries de températures, dans la mesure où la variabilité hydrométéorologique haute fréquence varie suivant la saison hydrométéorologique. Néanmoins, nous admettons, en première approximation, que l'hypothèse de stationnarité est quasiment vérifiée. Toutefois, les résultats des analyses spectrales seront contrôlés par l'examen des séries filtrées en passe bande dans les gammes de fréquence les plus significatives.

4. AUTOSPECTRES

4.1. **Prétraitement**

Le fort signal annuel nécessite d'être éliminé, afin de ne pas masquer la majorité des pics basses fréquences. Un filtre Hanning passe haut de fréquence de coupure 100 j (50 % de réduction d'amplitude) a donné des résultats satisfaisants pour l'examen de la bande 20 j à 60 j. Un filtre de fréquence de coupure 40 j a été utilisé pour l'examen de la bande 5 j à 20 j. Les cohérences n'ont pas été affectées de manière notable par ce changement de filtre. Par contre, le passage de 100 j à 40 j a éliminé de nombreux pics secondaires sur les spectres aux périodes inférieures à 20 j et a permis une meilleure résolution des pics restant.

4.2. **Aliasing**

Les mesures sur le plateau continental de la Petite Côte effectuées par le Baffin (MAEHER *et al.*, 1977) ont été utilisées afin d'estimer les fréquences auxquelles un aliasing dû aux ondes de marée est susceptible de se produire. Le pas d'échantillonnage étant de 1 j, la fréquence de Nyquist est de 0,5 j^{-1}. Le tableau I montre les fréquences susceptibles d'être « aliaisées » par des fréquences supérieures à 0,5 j^{-1}.

Par ailleurs, la période d'inertie 12 h/sinφ, φ étant la latitude, est inférieure de 2 j au Nord de 14°29′ N. Les périodes « aliaisées » qui en résultent sont, dans tous les cas, inférieures à 2,2 j et n'ont donc aucune influence notable sur les spectres. Il est donc possible d'après le tableau I que des pics aux périodes 7,4 j, 9,4 j, 13,7 j, 14,2 j, 14,8 j et 32,1 j, reflètent une variabilité à des périodes inférieures à 2 j.

Toutefois, il convient de remarquer que :

(a) de forts effets non linéaires aux fréquences supérieures à la fréquence de Nyquist sont probables :

TABLEAU I

Fréquences susceptibles d'être « aliaisées » par des fréquences supérieures à 0,5 j^{-1}. *Frequencies liables to aliasing by frequencies higher than 0.5 day^{-1}*

ONDE DE MAREE	AMPLITUDE (mètres)	PERIODES (heures)	PERIODES "ALIAISEES" (jours)
M2	0,455	12,42	14,8
S2	0,174	12,00	2,0
N2	0,098	12,66	9,6
K1	0,050	23,93	342
K2	0,049	11,97	14,2
O1	0,041	25,82	200,0
L2	0,032	12,19	32,0
MU 2	0,030	12,87	7,4
Q1	0,011	26,87	9,4

une analyse des courants et des températures enregistrés par REBERT (1983) avec un courantomètre Anderaa devant l'embouchure du Siné Saloum a montré qu'il existait effectivement un fort brouillage des températures par rapport aux courants, qui se traduit par un pic semi-diurne des températures très atténué, de nombreux autres pics mal résolus (notamment à 16 h et 10 h, qui correspondent à une interaction entre la marée et les mouvements inertiels), une variabilité concentrée aux périodes inférieures à 24 h et l'absence de pic spectral à la période d'inertie ;

(b) le manque de ponctualité des opérateurs contribue à répartir sur une large bande de fréquence l'énergie qui serait associée à un pic de fréquence supérieure à la fréquence de Nyquist.

Nous admettrons donc, dans la suite de ces analyses, que la variabilité thermique aux fréquences supérieures à la fréquence d'inertie peut être considérée comme un bruit blanc. Le signal « aliaisé » aux fréquences subinertielles est donc également un bruit blanc qui constitue probablement une part importante de la variabilité du bruit de fond Z_t.

4.3. **Autospectres de températures**

Les spectres de températures aux cinq stations côtières sont représentés figures 10 à 15. On remarquera qu'il n'existe pas de pic particulièrement net pour l'ensemble des spectres. Nos analyses porteront donc surtout sur des bandes de fréquence et des groupes de pics de fréquences voisines. On note sur tous ces spectres une importante chute d'énergie entre 15 j et 20 j, ce qui amène à séparer le domaine fréquentiel en une partie basses fréquences et une partie moyennes fréquences (frontière fixée à 17 j).

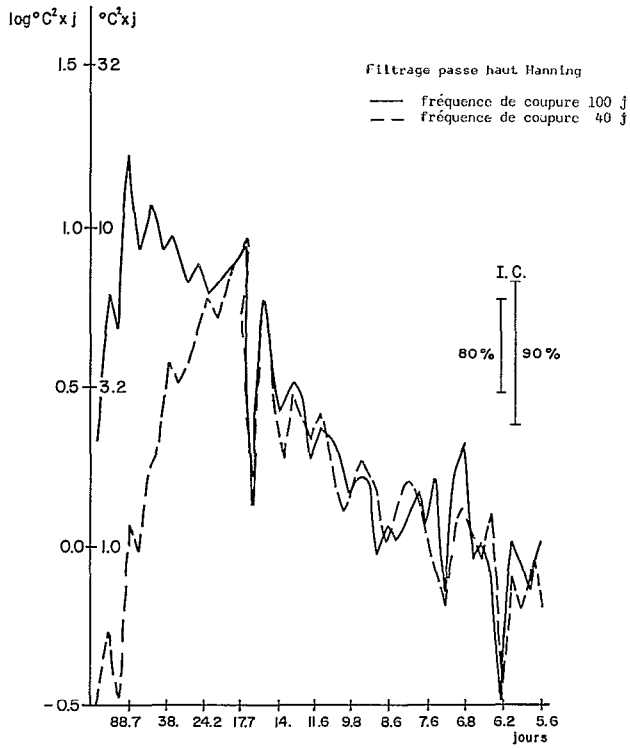


FIG. 10. — Autospectres des températures à St-Louis de 1974 à 1979 (7 blocs de 266 éléments). *Temperature autospectra at St-Louis, from 1974 till 1979 (7 blocs of 266 elements)*

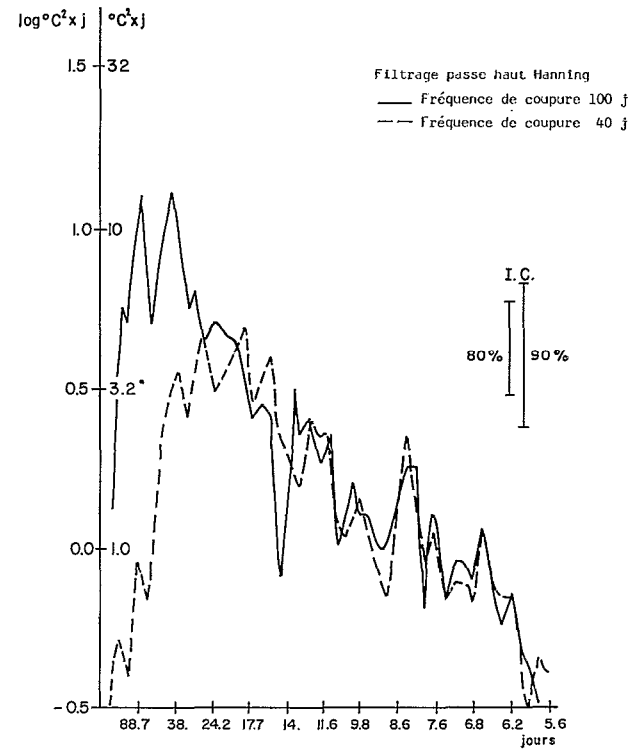


FIG. 12. — Autospectres des températures à Yoff de 1974 à 1979 (7 blocs de 266 éléments). *Temperature autospectra at Yoff, from 1974 till 1979 (7 blocs of 266 elements)*

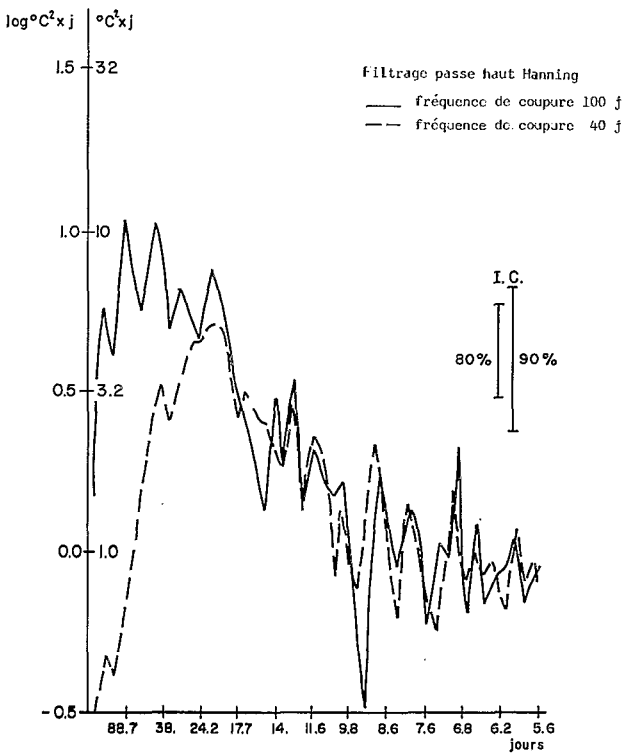


FIG. 11. — Autospectres des températures à Kayar de 1974 à 1979 (7 blocs de 266 éléments). *Temperature autospectra at Kayar, from 1974 till 1979 (7 blocs of 266 elements)*

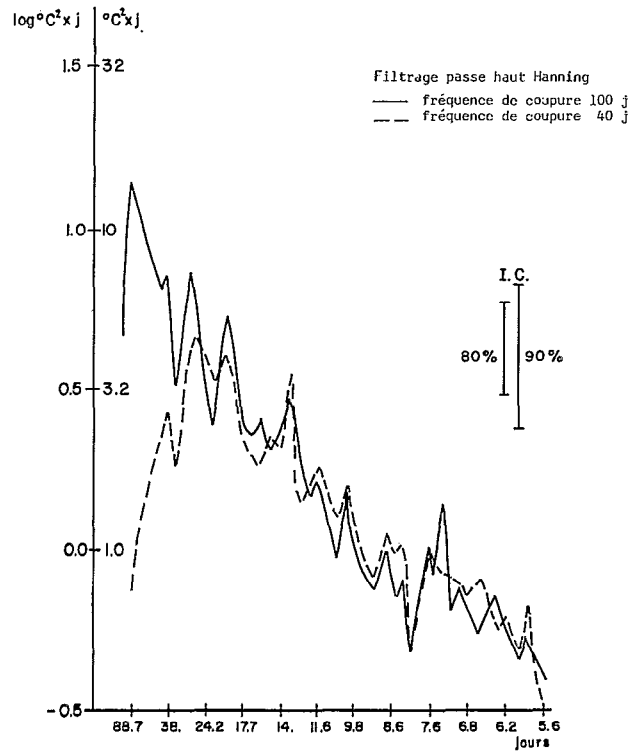


FIG. 13. — Autospectres des températures à Thiaroye de 1974 à 1979 (7 blocs de 266 éléments). *Temperature autospectra at Thiaroye, from 1974 till 1979 (7 blocs of 266 elements)*

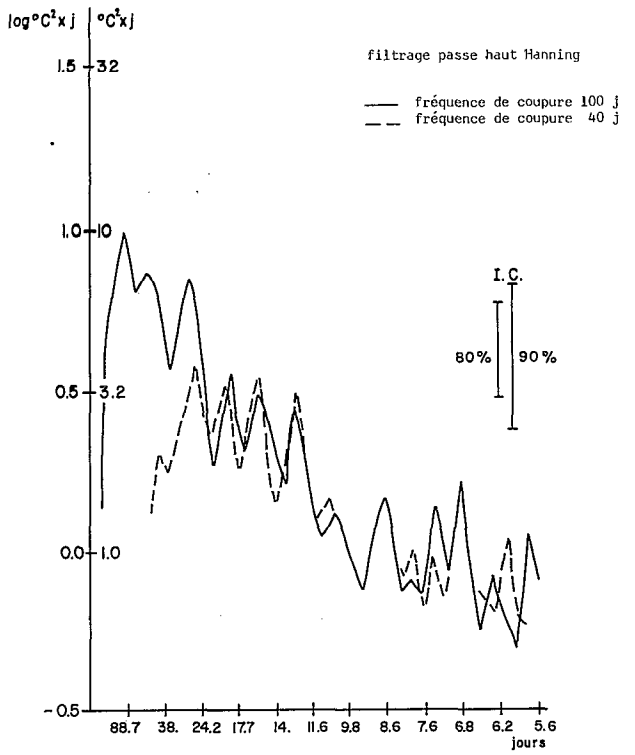


FIG. 14. — Autospectres des températures à M'Bour de 1974 à 1979 (7 blocs de 266 éléments). *Temperature autospectra at M'Bour, from 1974 till 1979 (7 blocks of 266 elements)*

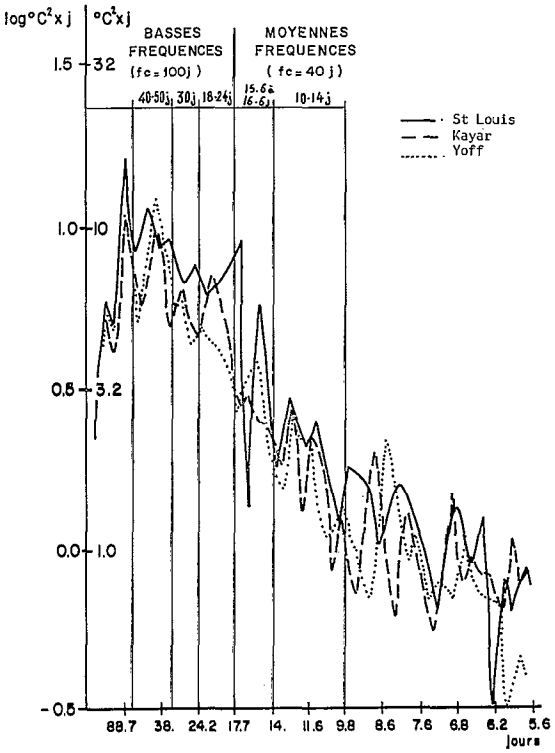


FIG. 15. — Séparation des spectres de températures, aux stations de St-Louis, Kayar et Yoff (Grande Côte). *Parting of temperature spectra, at St-Louis, Kayar and Yoff (Grande Côte)*

Basses fréquences (17 j à 90 j)

A chacune des stations côtières, on observe trois bandes de fréquence d'énergie significative :

— 1 pic entre 38 j et 53 j,
— 1 pic entre 27 j et 30 j,
— 1 pic entre 18 j et 24 j.

Moyennes fréquences

Il semblerait exister dans ce domaine cinq bandes de fréquences d'énergie significative :

— 1 pic entre 15 j et 17 j pour toutes les stations,
— 1 pic entre 12,5 j et 13,5 j pour toutes les stations,
— 1 pic entre 10 j et 11,6 j à Saint-Louis, Kayar, Yoff et Thiaroye,
— 1 pic entre 8 et 9 j partout,
— 1 pic à 7 j à Saint-Louis et Kayar.

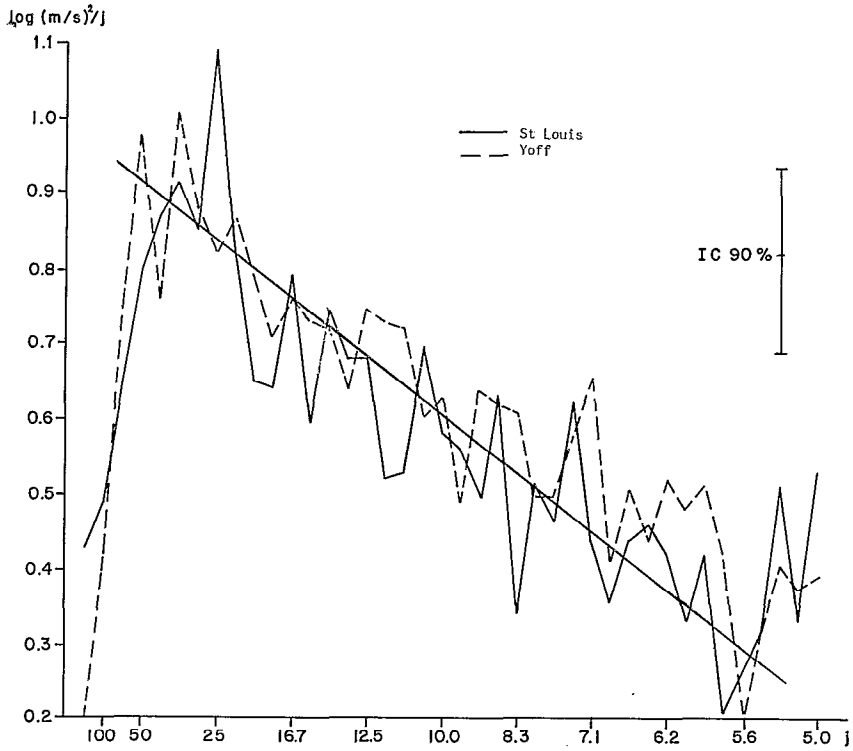
Cet examen des spectres révèle que sur une large bande de fréquence les intervalles de variabilité maximale sont à peu près les mêmes pour l'ensemble des stations. Il importe maintenant de savoir si ces pics d'énergie thermique sont révélateurs de phénomènes intéressant l'ensemble des côtes sénégalaises.

4.4. **Autospectres des vents**

Deux exemples de spectres d'intensité du vent pour les secteurs correspondant aux alizés sont présentés aux figures 16 et 17 (stations de Saint-Louis et Yoff). Ces spectres ont été obtenus en annulant l'intensité du vent lorsque sa direction n'était pas comprise dans le secteur indiqué (300°-30° ou 330°-60°). Le coefficient de déclin de ces spectres est compatible avec le coefficient théorique de $-\frac{1}{3}$ impliqué par les théories sur la turbulence. Cependant ces spectres se sont révélés être peu exploitables directement pour les problèmes traités ici.

5. SPECTRES CROISÉS — ÉTUDE COMPARATIVE DES SÉRIES

L'analyse directe des autospectres a permis de séparer, en fonction de leur niveau d'énergie, les bandes de fréquences les plus représentatives des phénomènes thermiques des côtes sénégalaises. Dans cette section, une tentative de mise en évidence de



FIF. 16. — Autospectres d'intensité du vent, de 1968 à 1977, dans le secteur 300°-30° (7 blocs de 200 éléments) ; la droite de pente $-\frac{1}{3}$ est figurée. *Wind speed autospectra, from 1968 till 1977, on the 300°-30° sector (7 blocks of 200 elements); a* $-\frac{1}{3}$ *slope line is drawn*

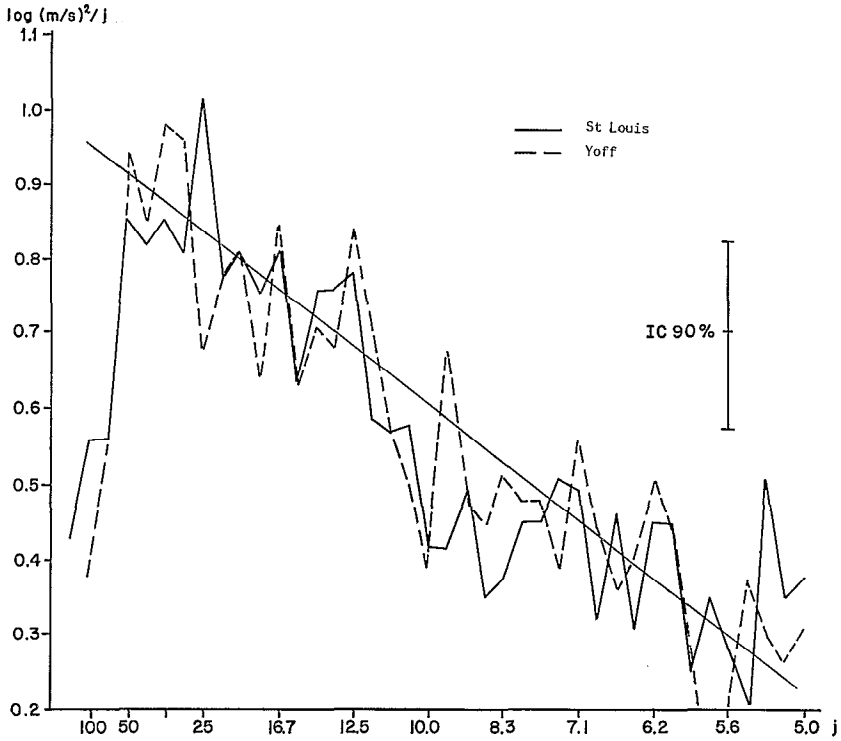


FIG. 17. — Autospectres d'intensité du vent, de 1968 à 1977, dans le secteur 330°-60° (7 blocs de 200 éléments) ; la droite de pente $-\frac{1}{3}$ est figurée. *Wind speed autospectra, from 1968 till 1977, on the 330°-60° (7 blocks of 200 elements); a* $-\frac{1}{3}$ *slope line is drawn*

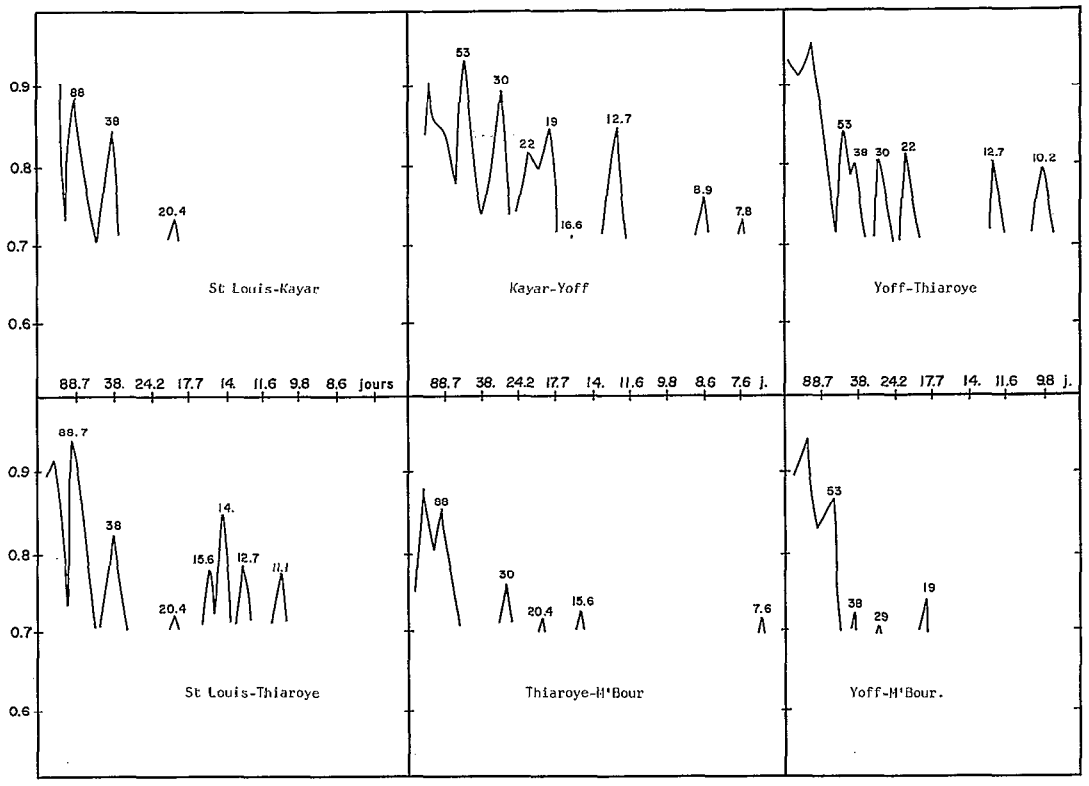


FIG. 18. — Cohérence des températures entre stations, de 1974 à 1979 (7 blocs de 266 éléments). *Temperature coherence between stations, from 1974 till 1979 (7 blocs of 266 elements)*

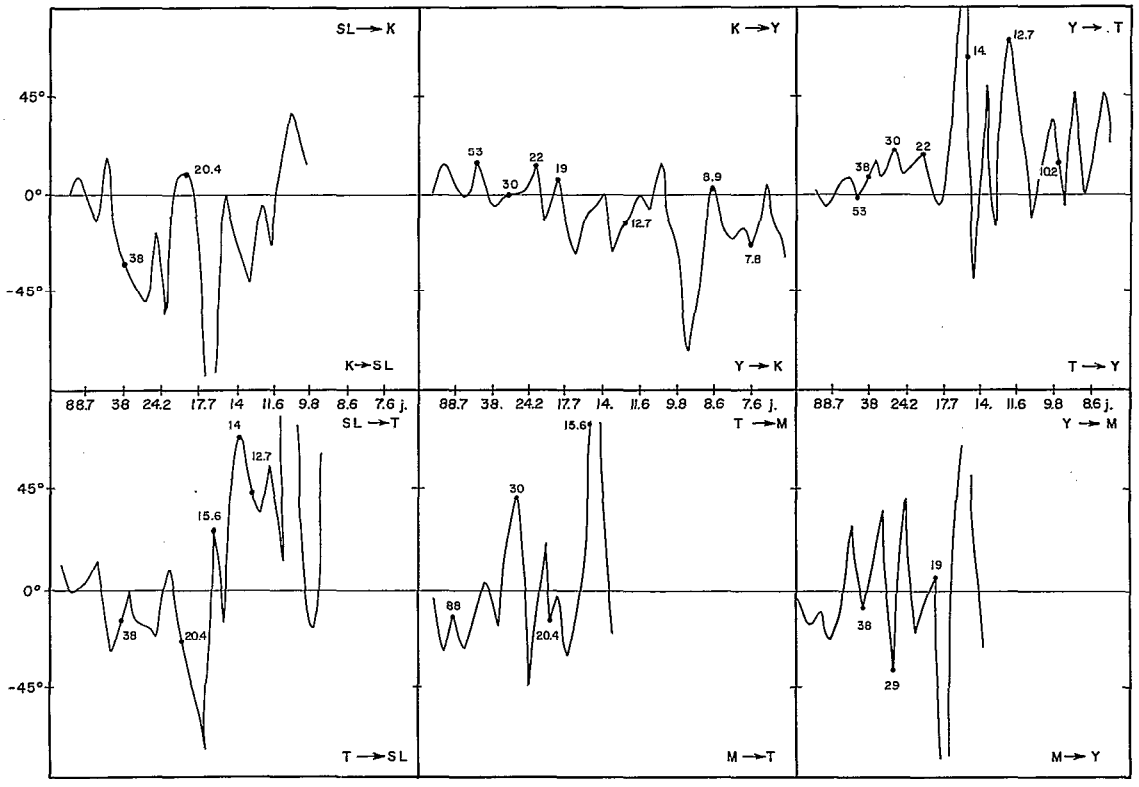


FIG. 19. — Déphasage des températures entre stations, de 1974 à 1979 (7 blocs de 266 éléments) (K : Kayar ; M : M'Bour ; SL : St-Louis ; T : Thiaroye ; Y : Yoff). *Temperature phase difference between stations, from 1974 till 1979 (7 blocs of 266 elements) (K: Kayar; M: M'Bour; SL: St-Louis; T: Thiaroye; Y: Yoff)*

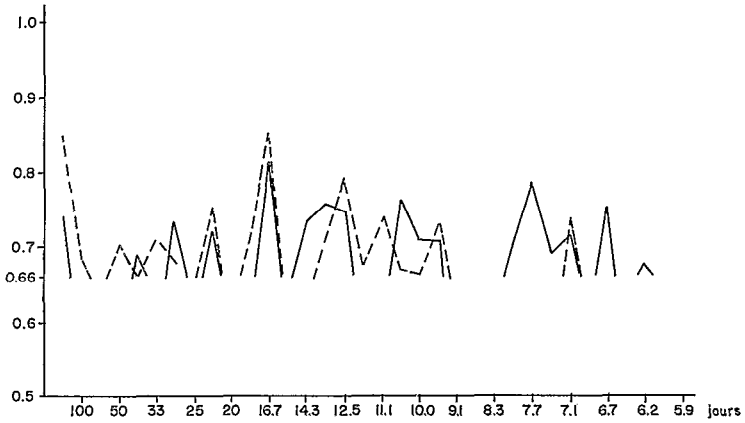


FIG. 20. — Cohérence des vents entre les stations de St-Louis et de Yoff (trait plein : secteur 300°-30° ; pointillé : secteur 330°-60°). *Wind coherence between St-Louis and Yoff stations (full line: 300°-30° sector; dotted line: 330°-60° sector)*

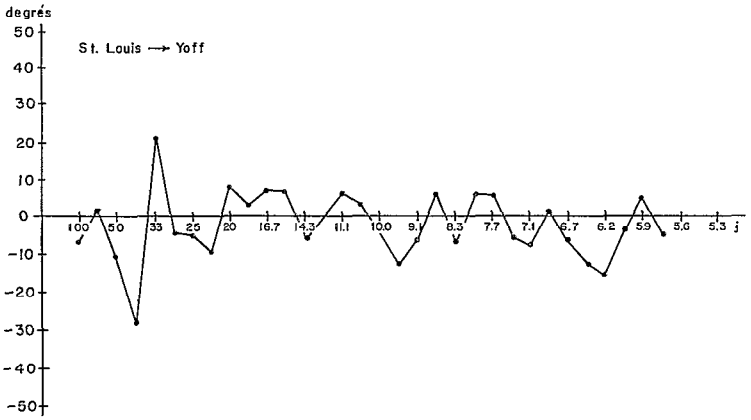


FIG. 21. — Déphasage des vents de secteur 300°-30° entre les stations de St-Louis et de Yoff (1968-1977). *Wind phase difference on the 300°-30° sector between St-Louis and Yoff stations (1966-1977)*

phénomènes de propagation et d'évaluation des échelles de l'interaction vent-température sera présentée. Pour cela, nous utiliserons :

(a) les spectres de cohérence et de phase, déduits des calculs de spectres croisés entre deux séries de températures ou de vent à différentes stations ou une série de vent et une série de température à deux stations voisines. Les spectres de cohérence et de phase sont présentés aux figures 18 à 23. Les cohérences sont jugées significatives lorsqu'elles sont supérieures à 0,35 au seuil de 90 %, c'est-à-dire :

— supérieures à 0,70 pour les spectres croisés de deux séries de températures,

— supérieures à 0,70 pour les spectres croisés d'une série de températures et d'une série de vents,

— supérieures à 0,66 pour les spectres croisés de deux séries d'intensité de vent.

(b) des filtrages passe bande des séries de températures aux fréquences jugées les plus représentatives. Le filtre utilisé est connu sous le nom de filtre Picaut (PICAUT et VERSTRAETE, 1976) et a l'avantage de

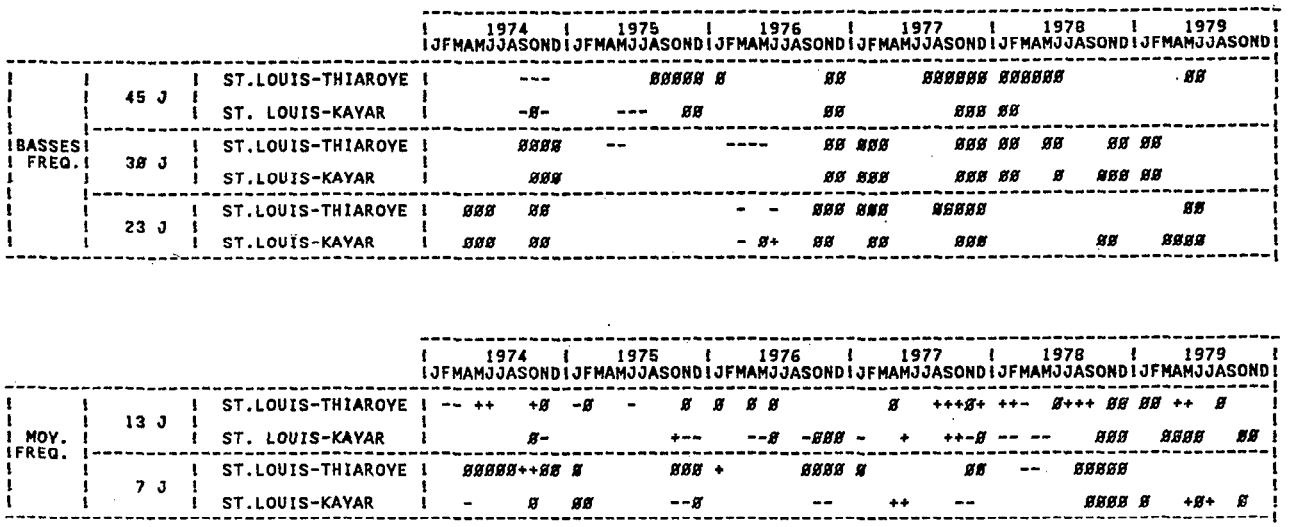
TABLEAU II

Bande passante du filtre (PICAUT et VERSTRAETE, 1976) ; coupure du filtre (46 % du signal). *Width of the pass band filter* (PICAUT *et* VERSTRAETE, *1976*) ; *signal level at the cut: 46 %*

45 j	35 j à 65 j
30 j	23 à 43 j
23 j	17 à 35 j
13 j	10 à 18 j
7 j	6 à 10 j

TABLEAU III

Résultats des analyses en passe bande. *Results from pass band analysis*



minimiser les fuites d'énergie dans la bande passante en provenance des fréquences adjacentes. Ce filtre réagit moins de 1,5 périodes avant l'apparition d'une très forte discontinuité d'amplitude du signal. Les largeurs des fenêtres de filtrage sont explicitées au tableau II. Un exemple de résultats de ces filtrages est présenté à la figure 24. Pour plus de commodité, les résultats de ces examens sont présentés sous forme de tableau (tableau III).

5.1. **Domaine des basses fréquences** (17 j-60 j)

Des pics de cohérence existent entre les séries de températures aux périodes suivantes :

— bande 33 j à 53 j (toutes les stations);
— 30 j (toutes les stations sauf Saint-Louis);
— bande 18 j à 22 j (toutes les stations).

Les phases associées à ces pics de cohérence sont trop proches de zéro pour que leur signe soit significatif. L'analyse des séries filtrées en passe bande (tabl. III) confirme le caractère stationnaire de ces oscillations. Tout au plus, peut-on noter, en fin de saison froide, le fait que celles-ci se manifestent à Thiaroye avant Saint-Louis aux périodes de 22,5 j et 30 j. L'analyse de l'équation de dispersion thermique pourrait suggérer que les oscillations à 22 j et 45 j résultent d'interactions non linéaires dues au terme d'advection entre oscillations à 30 j et 90 j. Toutefois, les analyses passe bande ne montrent aucune corrélation particulière entre l'apparition des oscillations à 30 j et celles à 22 j et 45 j, ce qui impliquerait que ces trois types d'oscillations se présentent de manière indépendante sur les côtes sénégalaises.

L'examen des spectres croisés vents-températures indique de bonnes cohérences entre les températures de Thiaroye, Yoff et Kayar avec le vent à Yoff et les températures et le vent à Saint-Louis aux périodes 22 j et 45 j. Les phases proches de — 180° indiquent une corrélation inverse entre fluctuations de vent et de températures et un retard des températures sur les vents de quelques jours. On notera l'absence de cohérence dans la bande 26 j à 33 j entre vents et températures, alors qu'une telle cohérence existe à la fois dans les températures et dans les vents.

On retiendra donc l'existence de trois bandes de réponses thermiques privilégiées dans le domaine basse fréquence; elles intéressent l'ensemble des côtes sénégalaises et ont principalement un caractère stationnaire :

— une bande centrée à 22,5 j et une bande centrée sur 45 j, pour lesquelles les oscillations thermiques répondent avec un retard de 2 j à 6 j aux oscillations d'alizés de même période;

— une bande centrée à 30 j, mais qui ne présente pas de cohérence avec les vents.

5.2. **Domaine moyennes fréquences** (10 j-17 j)

De très bonnes cohérences existent dans la bande 10 j à 16 j entre les températures des stations de

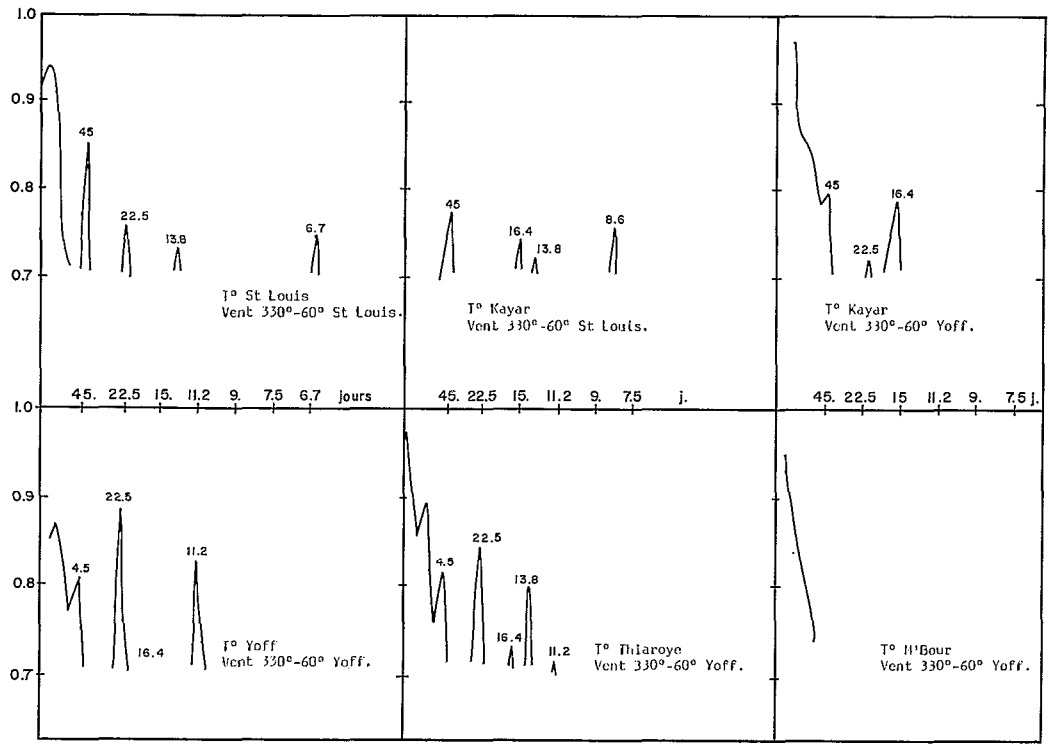


FIG. 22. — Cohérence vents-températures : divers exemples (7 blocs de 180 éléments) (1974-1977). *Wind-temperature coherence: some examples (7 blocs of 180 elements) (1974-1977)*

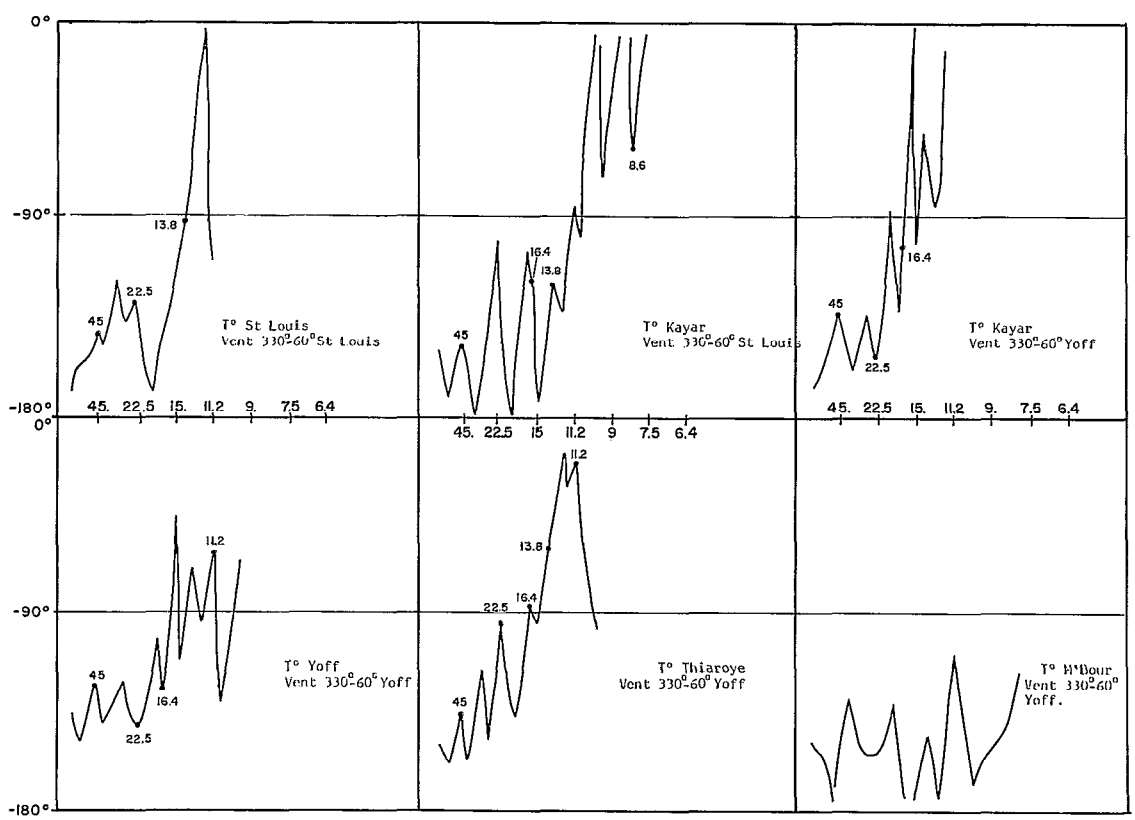


FIG. 23. — Déphasage vents-températures : divers exemples (7 blocs de 180 éléments) (1974-1977). *Wind-temperature phase difference: some examples (7 blocks of 180 elements) (1974-1977)*

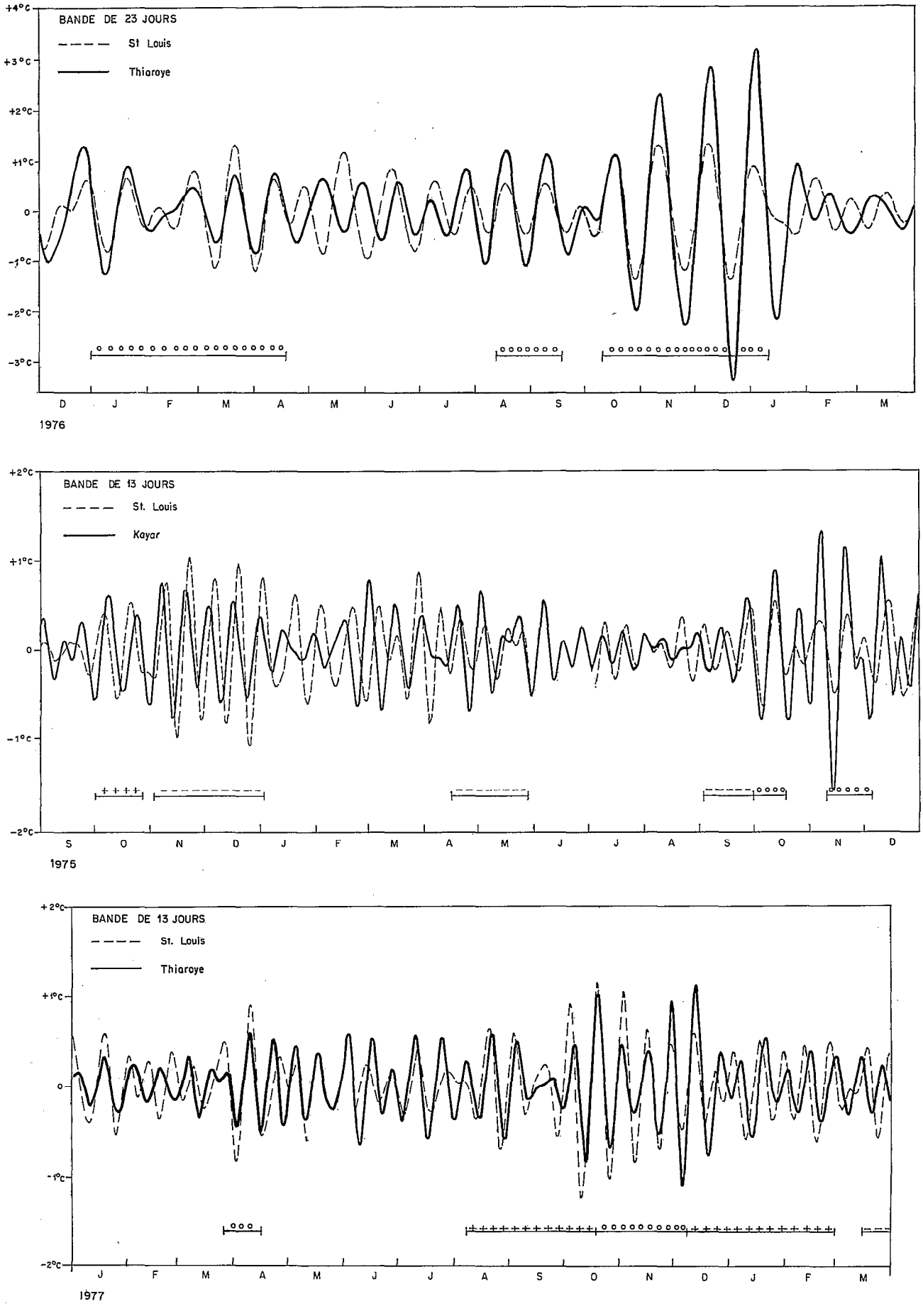


FIG. 24. — Exemples de déphasages thermiques. *Examples of temperature phase differences*

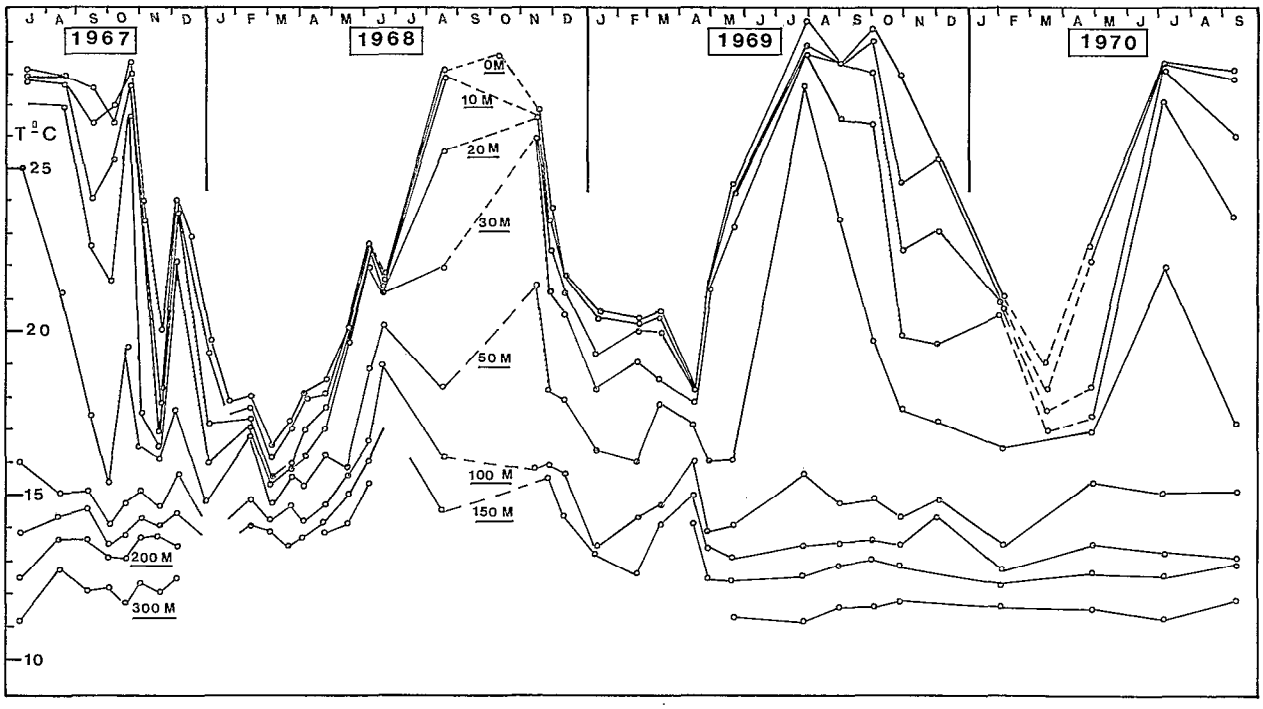


FIG. 25. — Évolution de la température au large du Cap Vert. *Temperature evolution off Cap Vert*

Thiaroye et de Saint-Louis. Les phases indiquent un retard de quelques jours de la réponse de Thiaroye par rapport à celle de Saint-Louis. La comparaison des séries filtrées en passe bande à Saint-Louis et Thiaroye montre que des oscillations significatives de la bande 11 j à 16 j peuvent être observées toute l'année et confirme l'existence d'un retard de Thiaroye par rapport à Saint-Louis, toute l'année sauf en saison froide, durant laquelle un retard de phase en sens inverse vers le Nord se produirait. On note également de bonnes cohérences à 12,7 j entre Yoff et Kayar, d'une part, et Kayar et Saint-Louis, d'autre part. Les phases, faiblement significatives, indiqueraient une propagation vers le Nord, ce que la comparaison des analyses passe bande des températures à Saint-Louis et Kayar confirme en dehors de la saison chaude.

Les vents de secteur alizé montrent une bonne cohérence entre Saint-Louis et Yoff sur la bande 10 j à 16 j. Les spectres croisés vents-températures indiquent des cohérences significatives à 11,2 j (vent à Yoff, températures à Yoff et Thiaroye), 13,8 j (vent à Yoff, températures à Yoff et Thiaroye, vent à Saint-Louis et Kayar) et 16,4 j (vent à Yoff, températures à Thiaroye, Yoff et Kayar, vent à Saint-Louis, températures à Kayar). Les phases indiquent une chute de température, 3 à 6 j postérieure à un accroissement du vent, ainsi qu'une réponse plus tardive à Thiaroye qu'à Saint-Louis pour une même fluctuation des vents dans les moyennes fréquences.

Aux périodes inférieures à 10 j, on observe un pic de cohérence à 7,6 j entre Kayar et Yoff, ainsi qu'entre M'Bour et Thiaroye. Les déphasages et les analyses passe bande indiqueraient une propagation vers le Nord sur la Grande Côte durant le refroidissement. Une importante bande cohérente existe entre les alizés à Saint-Louis et à Yoff aux environs de 7 j. Il ne semble pas exister de phénomène corrélable entre stations côtières aux périodes inférieures à 7 j.

6. DISCUSSION

6.1. **Basses fréquences**

Les oscillations basse fréquence décelées par ces analyses peuvent être observées sur les stations fixes de la radiale du Cap Vert occupée par ROSSIGNOL et ABOUSSOUAN (1965) et CRÉMOUX (*in* MERLE, 1973). On remarquera sur la figure 25 que ces oscillations se manifestent toute l'année jusqu'à 300 m de fond et que leur amplitude s'intensifie au-dessus de la thermocline en période de refroidissement.

A plus de 16° de longitude des côtes du Sénégal, BYSHEV et CHEKOTILLO (1974) ont également observé des oscillations basse fréquence des courants, dont la période est de l'ordre de 40 à 70 j, et qui se manifestent jusqu'à 1 000 m de profondeur. L'amplitude de ces oscillations dépasse de 1 à 2 ordres de grandeur les valeurs du courant moyen entre 100 et 200 m, où

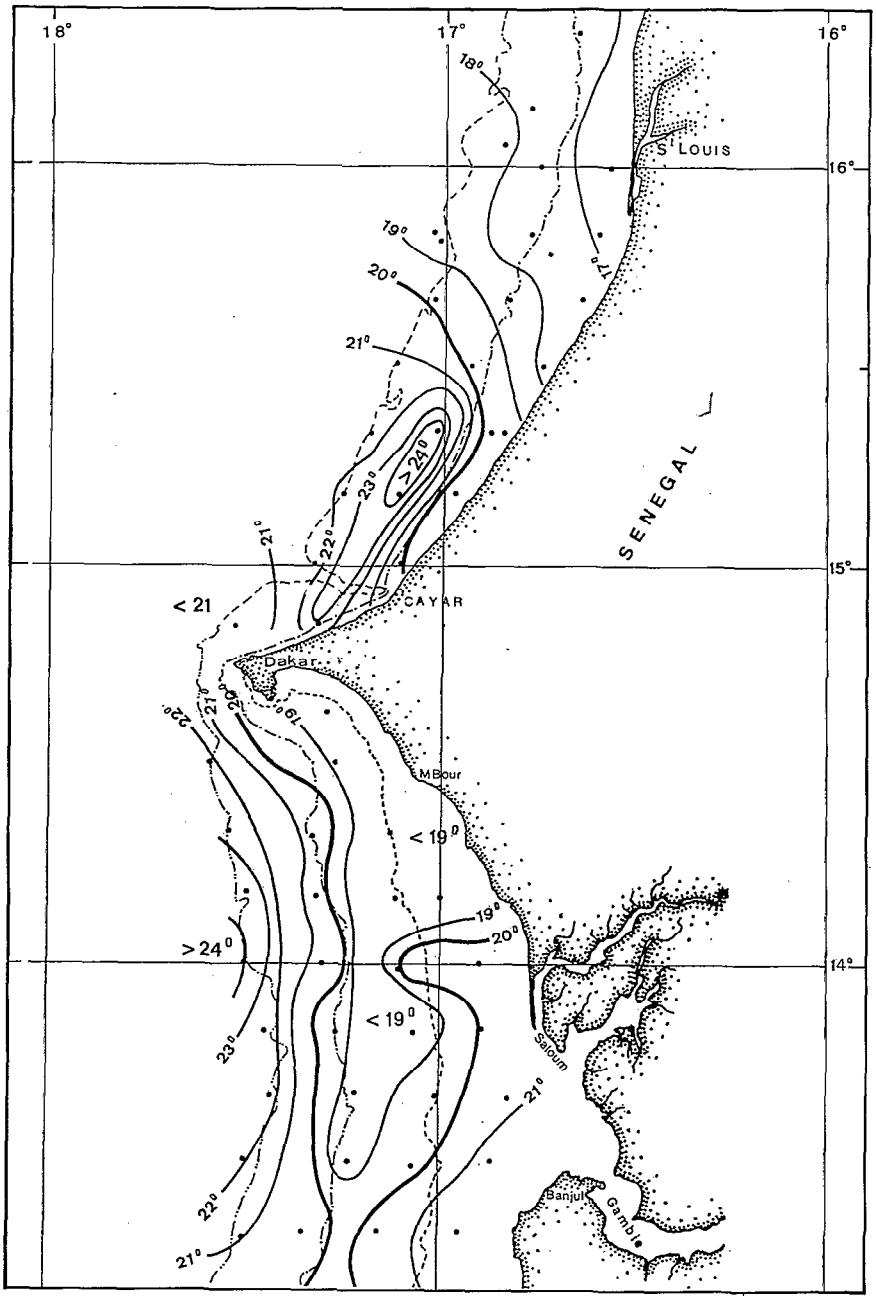


FIG. 26. — Structure hydrologique en fin de saison froide (avril 1977) sur les côtes du Sénégal. *Hydrological structure at the end of the cold season (April 1977) along senegalese coasts*

la fréquence de Brunt-Vaïsala est maximale. Les ellipses de courant sont plutôt aplaties; l'axe principal étant orienté NW-SE au-dessous de 50 m et WNW-ESE à 25 m.

PICAUT et VERSTRAETE (1976) ont par ailleurs mis en évidence des oscillations de 40 à 50 j dans le Golfe de Guinée ne présentant pas de propagation le long de la côte et étant en phase avec la pression et le vent zonal.

Il semblerait donc que les oscillations stationnaires observées devant le Sénégal soient présentes dans une grande partie de l'Atlantique Tropical Nord et de manière plus surprenante qu'elles soient également présentes dans le Golfe de Guinée (notons à ce sujet

également les oscillations de 31 j mises en évidence par WEISBERG *et al.*, 1979). Leur cohérence avec les phénomènes atmosphériques a été observée en des points aussi éloignés que Dakar et Abidjan. Il est donc possible que, si ces oscillations ont une même origine, celle-ci soit atmosphérique. De plus, elles se manifestent au Sénégal avec une amplitude maximale durant les périodes de transition Nord-Sud de la ZITC.

6.2. Moyennes fréquences

De nombreux phénomènes cohérents entre températures à différentes stations, d'une part, et entre vents et températures, d'autre part, semblent se produire dans les moyennes fréquences. L'identification de mécanismes élémentaires du type ondes de plateau n'est toutefois pas clairement établie par l'examen des traitements effectués. Tout au plus peut-on présumer :

— des oscillations se propageant vers le Nord aux périodes de 7 j et 12 j à 13 j sur la Grande Côte et cohérentes avec les alizés à Yoff et à Saint-Louis;

— une oscillation dans la bande 10 j à 16 j se propageant vers le Nord et se manifestant uniquement à Thiaroye et à Saint-Louis en saison froide. L'examen des structures hydrologiques de saison froide (fig. 26) pourrait suggérer l'existence d'ondes piégées sous la thermocline, ce qui expliquerait des cohérences meilleures entre Thiaroye et Saint-Louis qu'entre Saint-Louis et Yoff ou Kayar.

L'existence d'un retard global de la réponse thermique de la Petite Côte par rapport à la Grande Côte paraît toutefois mieux établie et la raison tient probablement à la plus petite taille du plateau continental de la Grande Côte. On notera également que plus de 50 % des oscillations examinées ont un caractère stationnaire et il n'est pas exclu que l'on observe dans cette gamme de fréquences un nombre important d'harmoniques des oscillations basses fréquences. Aux périodes inférieures à 7 j, il n'a pas été possible d'identifier d'oscillations se manifestant à l'échelle du plateau continental de la Grande Côte ou de la Petite Côte.

7. CONCLUSIONS

Les résultats obtenus grâce aux stations côtières ont permis une meilleure connaissance des échelles de temps et d'espace auxquelles se manifeste l'interaction vent-températures le long des côtes sénégalaises : il a été possible de séparer des phénomènes stationnaires basse fréquence (inférieure à 17 j^{-1}) cohérents le long des côtes sénégalaises et probablement présents à l'échelle de l'Atlantique Tropical Nord et du Golfe de Guinée, de phénomènes à plus haute fréquence (bande 6 j^{-1} à 17 j^{-1}), au plus cohérents à l'échelle du plateau continental sénégalais et vraisemblablement forcés par les alizés. Cependant, la nature de ce dernier type d'interaction, largement analysé dans la littérature, s'opérant dans le contexte d'une excitation des vents à forte variabilité fréquentielle avec, en prime, l'existence de phénomènes d'interactions non linéaires entre températures et courants, rend très difficile l'identification de mécanismes physiques élémentaires du type propagation d'ondes de plateau. Les outils d'analyse des séries temporelles mis en œuvre, bien que sophistiqués, posent de délicats problèmes d'interprétation : la non stationnarité en variance des séries a rendu souhaitable le contrôle des résultats des analyses spectrales par l'examen des séries filtrées en passe bande. Il serait intéressant que ce type de données soit comparé avec des spectres thermiques synthétiques obtenus sur modèle mathématique, ce qui permettrait une éventuelle validation de théories physiques.

De manière schématique, l'interaction vent-températures le long des côtes sénégalaises peut se résumer ainsi : une fluctuation des alizés consistant en un accroissement des vents, suivi d'une chute de l'intensité, sera correlée à :

— une diminution des températures sur une large zone incluant les eaux sénégalaises, si elle dure plus de 17 j;

— une diminution des températures sur les plateaux continentaux, si elle dure entre 10 j et 17 j, le plateau de la Petite Côte réagissant quelques jours plus tard que celui de la Grande Côte;

— une diminution des températures dans une zone de taille sensiblement inférieure aux plateaux continentaux, si elle dure entre 6 j et 10 j;

— une diminution ou une augmentation des températures très localement, si elle dure moins de 6 j.

REMERCIEMENTS

Ce travail a été réalisé à l'issue d'un séjour d'un an, en 1980, au Centre de Recherches Océanographiques de Dakar-Thiaroye (CRODT), complété par un séjour de deux semaines au Centre Océanographique de Bretagne (COB). Nous remercions les directions de l'ORSTOM et du CRODT pour leurs encouragements quant à la poursuite de ce travail, le Docteur PHILANDER et les chercheurs du Muséum, du CRODT et COB pour leurs discussions stimulantes. Les sociétés de conseil SOGREAH et FRANLAB ont apporté un concours matériel à la rédaction de ce travail et nous remercions vivement leur direction de leur compréhension et de leur appui.

Manuscrit accepté par le Comité de Rédaction le 15 janvier 1987 et reçu au Service des Éditions le 21 avril 1987.

BIBLIOGRAPHIE

BERRIT (G.), 1952. — Esquisse des conditions hydrologiques du plateau continental du Cap-Vert à la Gambie. *Bull. IFAN*, 14 (3) : 735-761.

BERRIT (G.), 1961. — Contribution à la connaissance des variations saisonnières dans le Golfe de Guinée. *Cah. océanogr.*, 13 : 715-727.

BYSHEV (V. I.) and CHEKOTILLO (K. A.), 1974. — A statistical analysis of current-velocity measurements in the North Atlantic. *Izv., Atmospheric and Oceanic Physics*, 10 (3) : 266-275.

DOMAIN (F.), 1980. — Contribution à la connaissance de l'écologie des poissons démersaux du plateau continental sénégalo-mauritanien. Les ressources démersales dans le contexte général du Golfe de Guinée. Thèse d'État, Univ. Paris VI. Vol. 1 : 342 p. ; vol. 2 : 68 p.

GOUSSET, 1962. — Variations saisonnières de la température et de la salinité des eaux marines de surface et de profondeur au large des côtes de la République du Sénégal. Rapport de la Direction de l'Océanographie et des Pêches du Sénégal.

HALPERN (D.), 1977. — Description of wind and of upper ocean currents and temperature variations on the continental shelf off North West Africa during March and April 1974. *J. Phys. Oceanogr.*, 7 (3) : 422-430.

HASTENRATH (S.) and LAMB (P.), 1977. — Climatic Atlas of the tropical Atlantic and Eastern Pacific Ocean. Univ. Wisconsin Press, Madison, Wisc., 97 charts.

MEAHER (L. J.), RUFFMAN (A. S.), STEWART (W. J. M.), VAN DER LINDEN et ZUKANSKAS (W.), 1977. — Le Baffin : levé au large du Sénégal et de la Gambie. Vol. 2. Contribution à la géophysique et à la géologie du plateau continental et de la marge continentale du Sénégal et de la Gambie, Afrique de l'Ouest. Ministère des Pêches et de l'Environnement et Ministère de l'Énergie, des Mines et des Ressources, 85 p.

MERLE (J.), 1973. — Hydrologie saisonnière de la région de Dakar (étude descriptive). Document provisoire ORSTOM.

MERLE (J.) et LE FLOCH (J.), 1978. — Cycle annuel moyen dans les couches supérieures de l'Océan Atlantique intertropical. *Oceanol. Acta*, 1 : 271-276.

PICAUT (J.) et VERSTRAETE (J. M.), 1976. — Mise en évidence d'une onde de 40-50 jours de période sur les côtes du Golfe de Guinée. *Cah. ORSTOM, sér. Océanogr.*, 14 : 3-14.

PORTOLANO (P.), 1981. — Contribution à l'étude de l'hydroclimat des côtes sénégalaises. Rapport interne CRO Dakar-Thiaroye/ORSTOM. Vol. 1 : texte, 68 p. ; vol. 2 : figures, 61 p.

REBERT (J. P.), 1983. — Hydrologie et dynamique des eaux du plateau continental sénégalais. Doc. scient. CRO Dakar-Thiaroye, 89, 99 p.

ROSSIGNOL (M.) et ABOUSSOUAN (M. T.), 1965. — Hydrologie marine côtière de la presqu'île du Cap-Vert. Contribution à la productivité des eaux. Publication provisoire ORSTOM (CRO Dakar-Thiaroye), 168 p., 37 pl.

WEISBERG (R. H.), HORIGAN (A.) and COLIN (C.), 1979. — Equatorially trapped Rossby-gravity wave propagation in the Gulf of Guinea. *J. Mar. Res.*, 37 : 67-86.