

MISE EN ÉVIDENCE D'UNE ONDE DE 40-50 JOURS DE PÉRIODE SUR LES CÔTES DU GOLFE DE GUINÉE

JOËL PICAUT* -- JEAN-MARC VERSTRAETE**

* Laboratoire d'Océanographie Physique, Faculté des Sciences, 29233 Brest, Cedex (France)

** C.R.O.-O.R.S.T.O.M. B.P. V 18. Abidjan (Côte d'Ivoire)

RÉSUMÉ

Des mesures journalières de température de surface et de niveau moyen ont été régulièrement effectuées sur les côtes du Dahomey, Togo, Ghana et Côte d'Ivoire sur des intervalles de temps compris entre 2 et 16 ans. L'analyse spectrale détaillée de ces séries temporelles met en évidence de nombreuses oscillations de périodes comprises entre 6 et 50 jours. L'une des plus importantes, toujours présente aux différents points de mesure, a une période comprise entre 40 et 50 jours. Cette onde serait stationnaire et probablement induite par des oscillations atmosphériques de même période.

ABSTRACT

Long time series (2-16 years) of sea surface temperature and mean sea level from coastal stations located in Dahomey, Togo, Ghana and Ivory Coast have been subjected to spectral and cross-spectral analysis. The investigation detects numerous low frequency oscillations with a period range of 6-50 days. One of the most important appears at 40-50 days. This oscillation is probably induced by atmospheric oscillations of the same period.

1. Introduction.

Depuis une vingtaine d'années l'O.R.S.T.O.M. effectue des mesures régulières de température de la mer en différents points de la côte du Golfe de Guinée. Ces données chronologiques ont été soumises pour la première fois à l'analyse spectrale; les résultats encourageants nous ont incité à étendre l'analyse aux données météorologiques et marégraphiques. Dans le domaine des basses fréquences, nous mettons en évidence une oscillation de 40 à 50 jours toujours présente aux différents points de mesure. L'utilisation d'un filtre passe-bande a permis de déterminer l'amplitude de cette onde. Les calculs de spectres croisés et des études de corrélation semblent montrer que cette onde est stationnaire.

2. Les séries chronologiques.

Les données traitées couvrent une période comprise entre 1958 et 1974. Elles ont été collectées par l'O.R.S.T.O.M. en Côte d'Ivoire et au Togo, les Services Hydrographiques de Côte d'Ivoire et du Ghana, les Services des Pêches du Ghana et du Dahomey et les Offices Météorologiques de tous ces pays. Les paramètres utilisés pour ces analyses sont : la température de la mer, le niveau de la mer moyen journalier, la pression moyenne journalière au niveau de la mer et le vent moyen. Le tableau I ci-dessous donne la liste des stations et des paramètres mesurés, la durée de chaque série et le nombre de mesures par jour. Les positions de chaque station sont présentées sur la figure 1. Le niveau moyen journalier à Téma et Takoradi est calculé à partir de 24 observations

TABLEAU I

Station	Paramètre	Durée	Nombre de mesures par jour
Cotonou	Température 0-5-10 m	1 ^{er} avril 1958 - 31 juil. 1974	1
Lomé	Température surface	1 ^{er} janv. 1958 - 15 fév. 1962 18 juil. 1966 - 31 déc. 1968	1
Téma	Température surface Niveau moyen	1 ^{er} janv. 1969 - 31 déc. 1973 1 ^{er} janv. 1969 - 31 déc. 1973	1 24
Takoradi	Température surface Niveau moyen Pression atmosphérique au niveau de la mer	1 ^{er} janv. 1970 - 31 déc. 1973 1 ^{er} janv. 1969 - 29 sept. 1973 1 ^{er} janv. 1962 - 31 déc. 1968	1 24 24
Abidjan	Température 0-5-10-15-20 m Niveau moyen Pression atmosphérique au niveau de la mer Vent	29 mars 1966 - 29 avril 1974 1 ^{er} janv. 1969 - 31 déc. 1973 1 ^{er} janv. 1969 - 31 déc. 1973 1 ^{er} janv. 1966 - 31 déc. 1974	Bi hebdomadaire 4 4 8
Tabou	Température de surface	1 ^{er} avril 1958 - 31 mars 1960	3

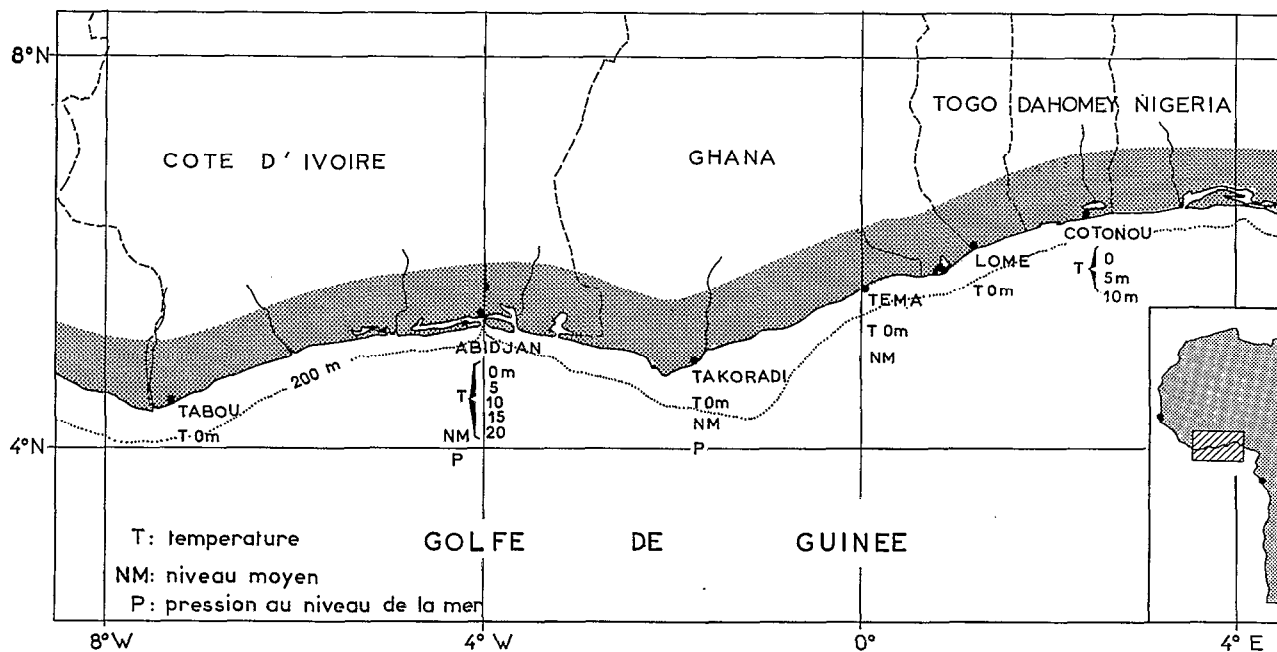


Fig. 1. — Position des stations.

horaires extraites des enregistrements continus de marégraphe; le niveau moyen à Abidjan est calculé à partir des hauteurs des pleines mers et basses mers observées chaque jour au marégraphe.

3. Rappels d'analyse spectrale.

3.1. TRAITEMENT D'UNE SÉRIE.

Pour mettre en évidence des oscillations privilégiées dans le Golfe de Guinée à l'aide de séries de mesures de longue durée, on a calculé la fonction de densité spectrale; celle-ci est la transformée de Fourier de la fonction d'autocorrélation calculée à partir de séries rendues stationnaires. Les séries analysées sont donc transformées de sorte que leur valeur moyenne soit nulle puis filtrées pour éliminer les termes de période longue devant la série disponible (variations saisonnières). On a essayé divers types de filtres (moyenne mobile, filtrage en sinus intégral, filtrage Hanning); ce dernier a été retenu étant donné son efficacité et son faible temps de calcul.

Soit $x(n \Delta t)$ la série discrète ainsi obtenue, n variant de 0 à N . On calcule :

— la fonction d'autocorrélation :

$$C_{xx}(k\Delta t) = \frac{1}{N-k} \sum_{i=k}^{N-k} x(i\Delta t) \cdot x(i\Delta t - k\Delta t) \quad 0 < k < M$$

M étant l'indice de décalage maximum.

— la fonction densité spectrale :

$$E_{xx}(f) = 2 \Delta t \delta_k \sum_{i=0}^M C_{xx}(i \Delta t) \cdot \cos \frac{k \pi i}{M} \cdot \cos^2 \frac{\pi i}{2M}$$

$$\delta_k = \begin{cases} 1/2 & \text{pour } k = 0 \text{ et } M \\ 1 & \text{pour } k \neq 0 \text{ et } M \end{cases}$$

Le terme en $\cos^2 \frac{\pi i}{2M}$ correspond à l'utilisation de la fenêtre de filtrage de Tukey. Les valeurs obtenues sont relatives à des fréquences centrées autour de $f = \frac{k}{2M \Delta t}$, avec une largeur de bande égale à $\Delta f = \frac{2}{3 M \Delta t}$ compte tenu de la fenêtre de Tukey. La fonction densité spectrale fournit pour

chaque série les fréquences dominantes et les variations d'énergie en fonction de la fréquence.

3.2. TRAITEMENT DE DEUX SÉRIES SIMULTANÉES.

Le calcul des spectres croisés permet d'étudier la cohérence et le déphasage entre deux séries simultanées. Soient $x(n \Delta t)$ et $y(n \Delta t)$ les deux séries rendues stationnaires. On calcule :

— Les coefficients de corrélation croisée :

$$C_{xy}(k\Delta t) = \frac{1}{N-k} \sum_{i=k}^{N-k} x(i\Delta t) \cdot y(i\Delta t - k\Delta t)$$

$$C_{yx}(k\Delta t) = \frac{1}{N-k} \sum_{i=k}^{N-k} y(i\Delta t) \cdot x(i\Delta t - k\Delta t)$$

— Les cospectres E_{xy} et spectres de quadrature E_{yx} :

$$E_{xy}(f) = 2\Delta t \delta_k \sum_{i=0}^M [C_{xy}(i\Delta t) + C_{yx}(i\Delta t)] \cdot \cos \frac{k \pi i}{M} \cdot \cos^2 \frac{\pi i}{2M}$$

$$E_{yx}(f) = 2\Delta t \delta_k \sum_{i=0}^M [C_{xy}(i\Delta t) - C_{yx}(i\Delta t)] \cdot \sin \frac{k \pi i}{M} \cdot \cos^2 \frac{\pi i}{2M}$$

— La cohérence et le déphasage :

$$\text{Coh}(f) = \frac{E_{xy}^2 + E_{yx}^2}{E_{xy} \cdot E_{yx}}$$

$$\theta(f) = \text{Arc tg} \frac{E_{yx}}{E_{xy}}$$

4. Résultats de l'analyse spectrale de chaque série.

Les spectres sont présentés pour les différentes stations côtières et les différents paramètres. Sur chaque spectre on indique la fréquence de coupure f_c du filtre passe-haut et l'intervalle de confiance à 90 %. La largeur de bande couramment utilisée est égale à 0.0025 cycle par jour. On observe de

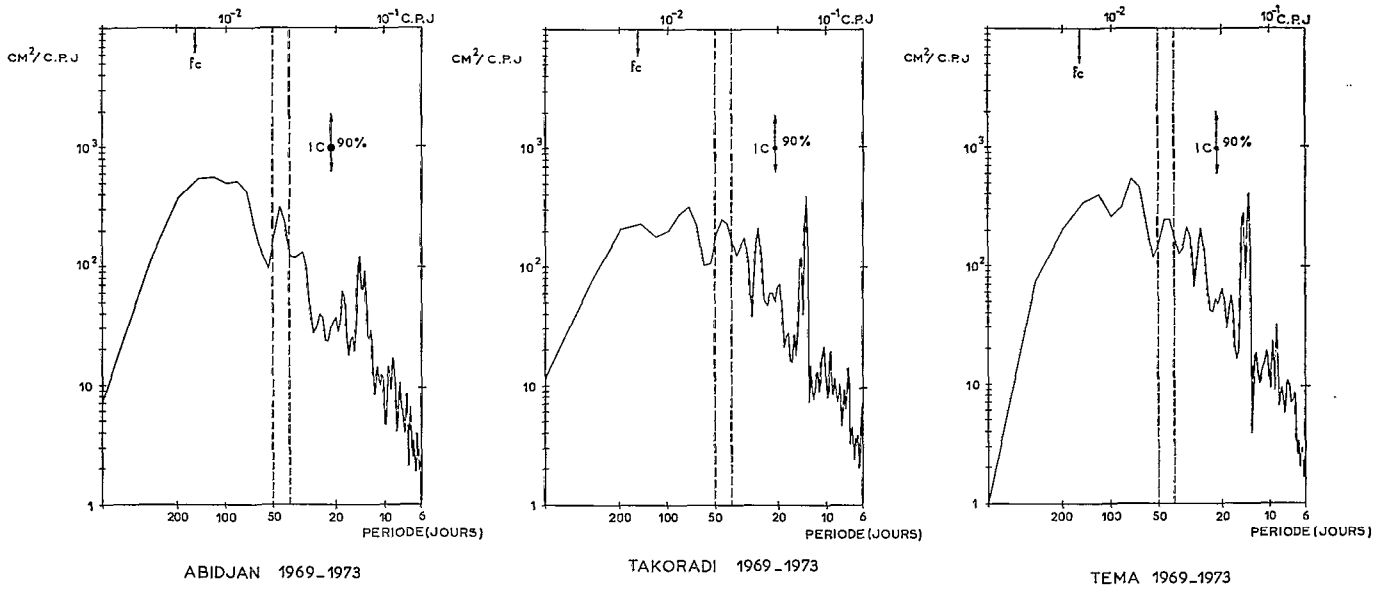


Fig. 2. — Spectres des niveaux moyens corrigés.

nombreux pics pour les périodes comprises entre 6 et 50 jours. Sur toutes les séries étudiées on trouve des pics autour des mêmes périodes : l'un se trouve dans l'intervalle de période 40-50 jours, deux autres pics apparaissent généralement entre 13,5 et 15 jours. L'un correspond à l'onde de marée semi-mensuelle lunaire Mf (13,7 jours), l'autre pourrait être la conjugaison des ondes de marées semi-diurnes M2 et S2 (14,7 jours).

Malgré le filtrage Hanning, on observe sur tous les spectres une forte densité spectrale dans les basses fréquences (variations saisonnières). Pour être certain que les pics observés ne soient pas des harmoniques de cette variation, on a moyenné les 16 années des données de température de Cotonou en une seule année type que l'on a soustrait des données brutes. Mis à part une meilleure décroissance dans les basses fréquences, le spectre ainsi obtenu demeure inchangé.

Cet article étudie plus spécialement les oscillations de périodes comprises entre 40 et 50 jours.

4.1. NIVEAU MOYEN (fig. 2).

La mer réagit comme un baromètre inversé aux variations de pressions atmosphériques. Afin de s'affranchir de cet effet direct, il convient d'utiliser le niveau moyen corrigé; celui-ci est défini comme étant le niveau moyen observé auquel on a retiré l'effet de pression barométrique (une augmentation de pression de 1 mb entraîne un abaissement de niveau moyen de 1 cm).

Les spectres d'Abidjan, Takoradi et Téma présentent un pic à 45 jours. Dans le domaine des périodes semi-mensuelles on notera les maxima d'énergie

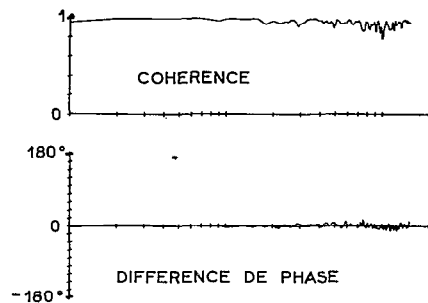
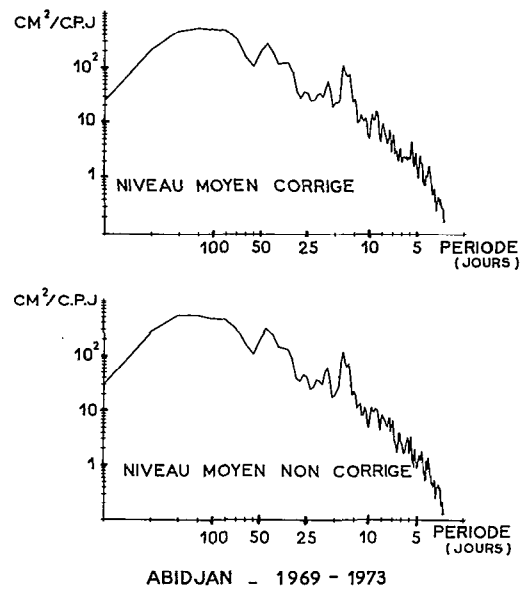


Fig. 3. — Spectres croisés des niveaux moyens corrigés et non corrigés.

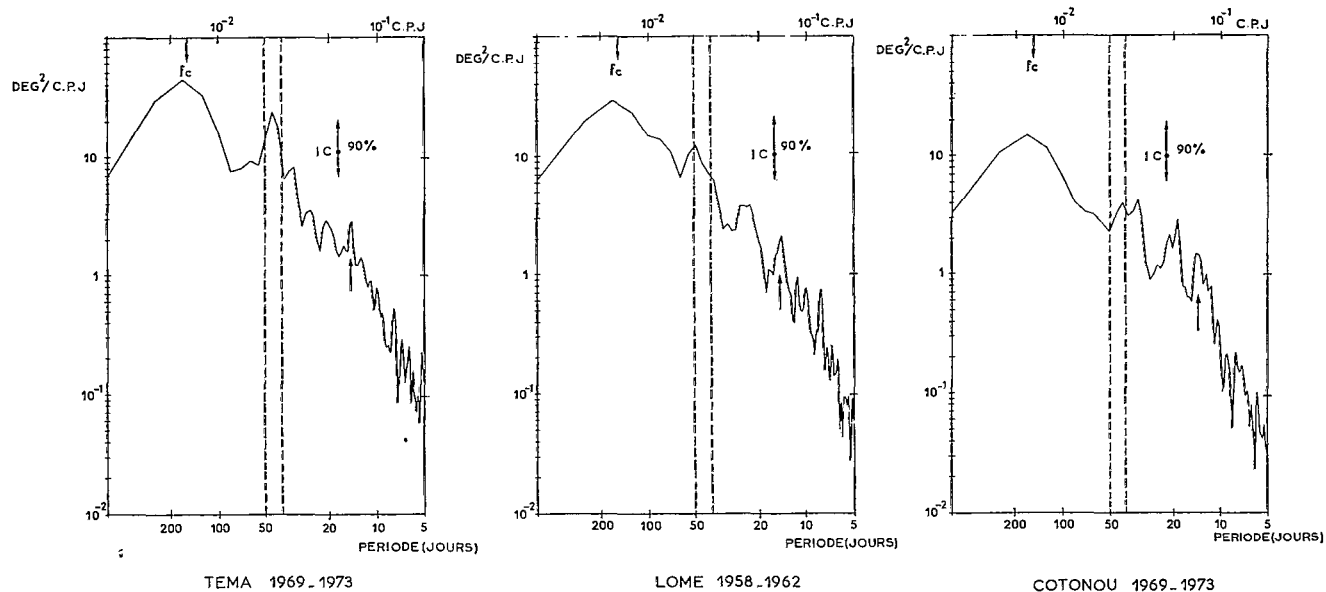


Fig. 4. — Spectres de température.

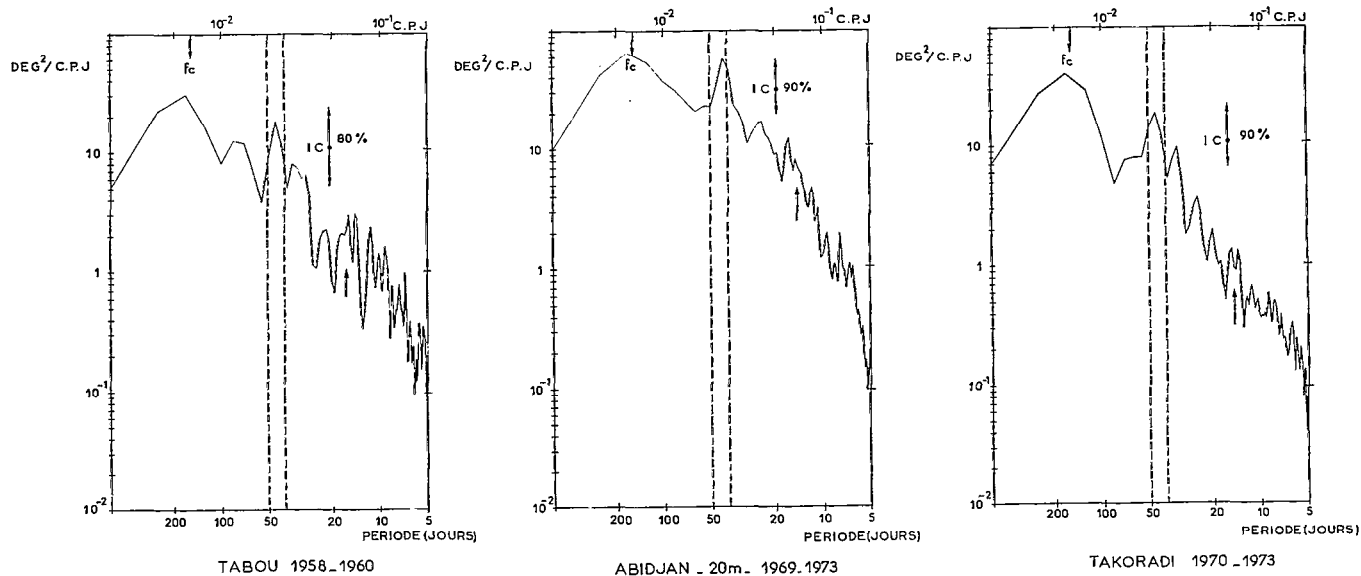


Fig. 5. — Spectres de température.

concentrées exactement à 13,7 et 14,7 jours, le pouvoir de résolution utilisé ici ($\Delta f = 0.0022$ cycle par jour) nous autorise à séparer ces deux pics

triqué sur le niveau moyen, nous avons effectué l'analyse spectrale croisée sur les niveaux moyen corrigé et non corrigé. La figure 3 montre la remarquable cohérence et l'absence de déphasage entre ces deux séries.

4.2. TEMPÉRATURE (fig. 4 et 5).

Les spectres de température de surface montrent stations, particulièrement dans les basses fréquences. Les oscillations ne concernent pas seulement la surface : avec les données d'Abidjan, on a trouvé environ 5 fois plus de variance à 20 mètres qu'en surface. Sur ces six stations on trouve en permanence

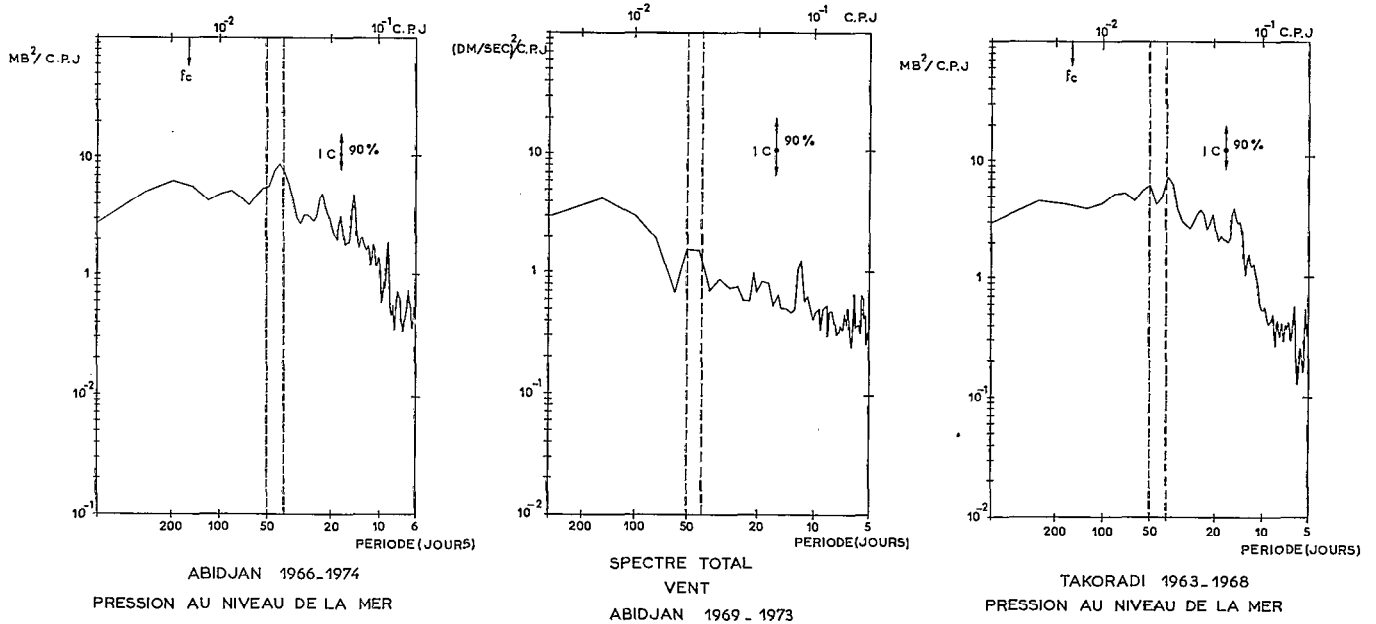


Fig. 6. — Spectres des données météorologiques.

un pic de variance entre 42 et 49 jours, significatif à 90 % à Abidjan, Takoradi, Téma. On notera que cette oscillation autour de 45 jours est observée depuis 1958; elle apparaîtrait comme un phénomène permanent.

Avec les températures, il n'a pas été possible en général de séparer les deux périodes bimensuelles; les flèches sur les figures indiquent le pic commun.

4.3. DONNÉES MÉTÉOROLOGIQUES (fig. 6).

Les spectres de la pression barométrique au niveau de la mer à Abidjan et Takoradi présentent un pic vers 40 jours. Il est remarquable de retrouver ce même pic avec les données de vent au sol à Abidjan. MADDEN et JULIAN (1972) ont étudié les données météorologiques (pression à différents niveaux, vents en altitude) en de nombreuses stations de la zone tropicale; ils ont mis ainsi en évidence une oscillation permanente de période 40-50 jours.

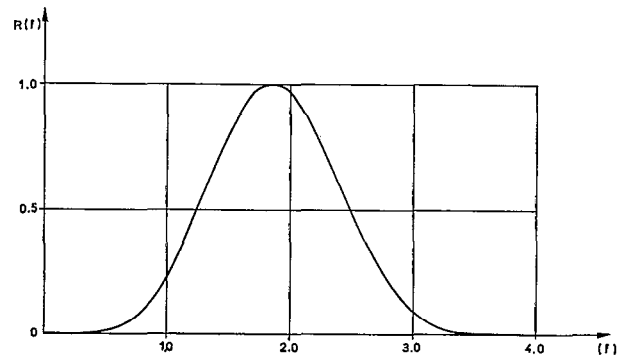


Fig. 7. — Réponse du filtre passe-bande.

à 45 jours, dont la réponse est présentée sur la figure 7. Les fréquences de coupure (réponse 1/2) correspondent aux périodes 34 et 68 jours. Les

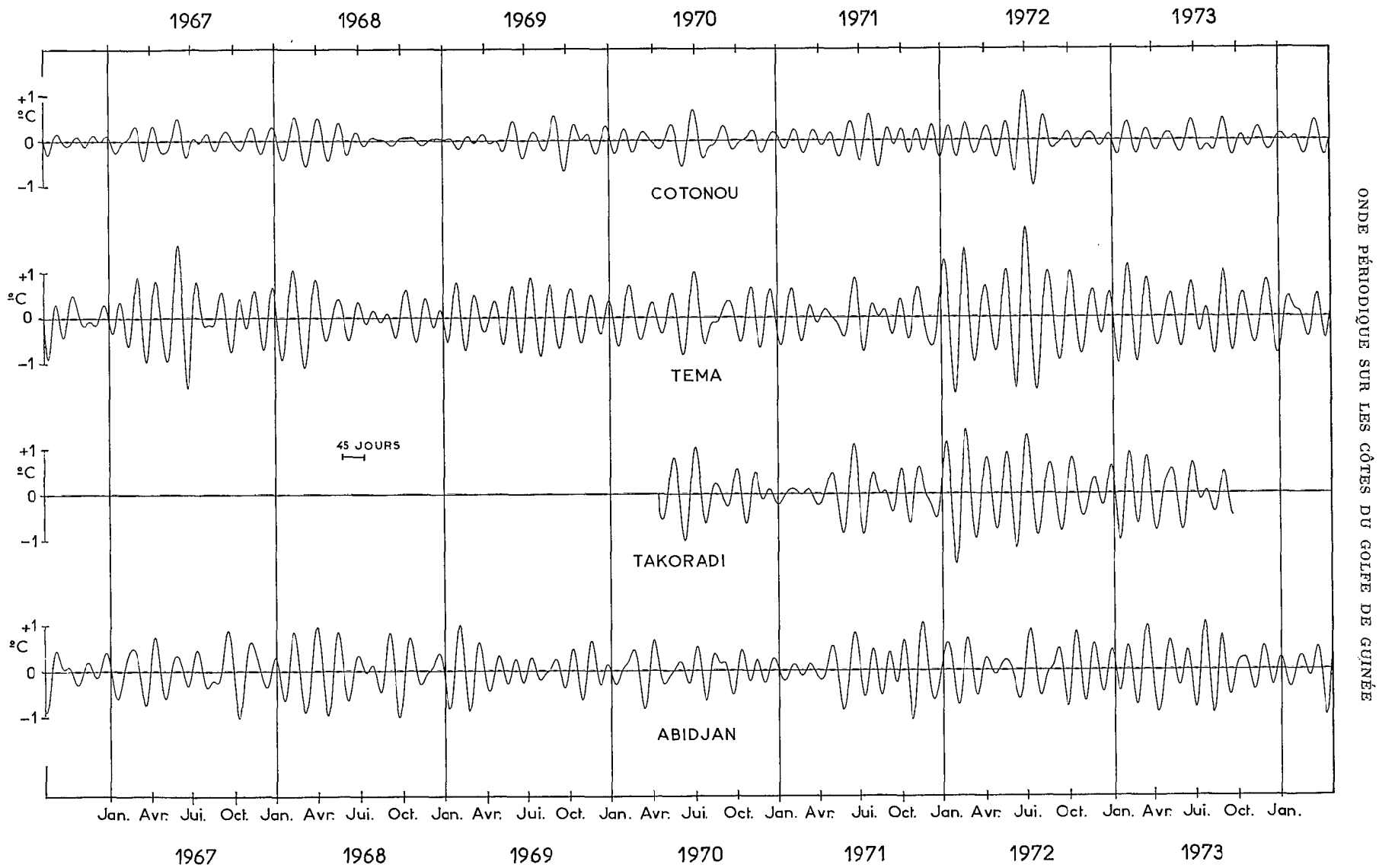
l'Océan Indien. Selon leur conclusion, cette oscillation serait le résultat d'une circulation cellulaire à grande échelle se déplaçant vers l'Est dans le plan équatorial.

5. Données filtrées.

En vue de déterminer l'amplitude de cette oscillation de 40-50 jours on a soumis toutes les séries chronologiques à un filtre passe-bande centré

sur toutes les séries de données mesurées, leur amplitude pour les températures de surface est d'environ 1,5 °C; on note que l'amplitude est moins importante à Cotonou que pour toutes les autres stations ce qui confirme ce résultat déjà obtenu par l'analyse spectrale. Il existe une très remarquable concordance entre les variations de température à Tema et Takoradi bien que ces deux stations soient distantes de plus de 200 km (fig. 8).

Les amplitudes des oscillations du niveau moyen



ONDE PÉRIODIQUE SUR LES CÔTES DU GOLFE DE GUINÉE

Fig. 8. — Données filtrées.

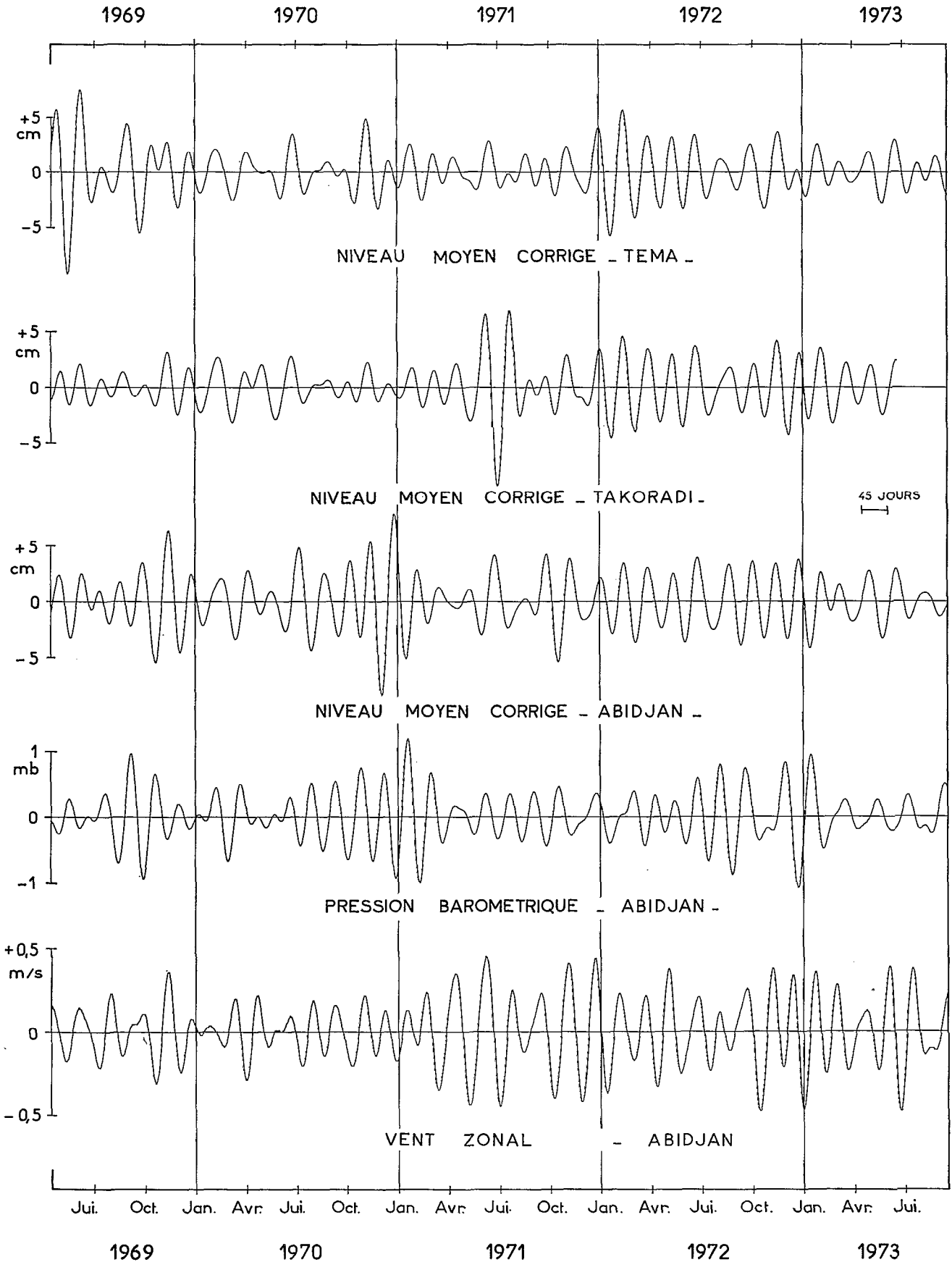


Fig. 9. — Données filtrées.

TABLEAU II
Analyse spectrale

TEMPÉRATURE : RÉFÉRENCE COTONOU

LOMÉ	TEMA	TAKORADI	ABIDJAN	TABOU
$5^{\circ} \pm 12^{\circ}$	$0^{\circ} \pm 33^{\circ}$	$-11^{\circ} \pm 35^{\circ}$	$-12^{\circ} \pm 46^{\circ}$	$-27^{\circ} \pm 70^{\circ}$

NIVEAU MOYEN CORRIGÉ : RÉFÉRENCE TEMA

TAKORADI	ABIDJAN
$-9^{\circ} \pm 38^{\circ}$	$-40^{\circ} \pm 43^{\circ}$

corrigé, de la pression barométrique et du vent zonal sont respectivement de 8 cm, 1,6 mb, et 0,7 m/s (fig. 9).

6. Analyse de l'oscillation de période 40-50 jours.

Afin de déterminer les caractéristiques de cette oscillation, nous avons calculé la cohérence et le déphasage par paires de stations d'une part et par paires de paramètres en une même station d'autre part.

6.1. ANALYSES ENTRE DIFFÉRENTES STATIONS.

Comme les mesures de température de surface à Cotonou recouvrent toutes les autres séries, nous avons utilisé cette série chronologique comme référence. On a donc calculé la cohérence et le déphasage entre les différentes stations côtières et Cotonou; bien que la station de Cotonou soit moins sensible au phénomène étudié, la cohérence est toujours élevée pour cette période. S'il y a propagation, le déphasage doit croître en fonction de la distance à la station de référence.

Pour contrôler les résultats obtenus avec les

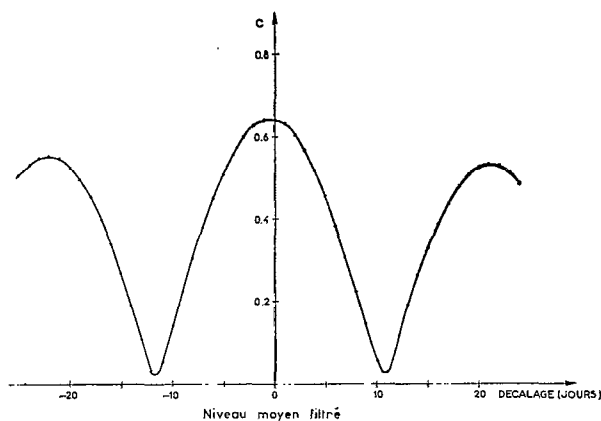


Fig. 10. — Corrélation après filtrage. Takoradi-Tema 1970-1973.

températures de surface, on a fait les mêmes calculs avec les niveaux moyens corrigés disponibles aux trois stations de Tema, Takoradi et Abidjan. Le tableau II présente l'ensemble des résultats avec l'intervalle de confiance à 90 %. Compte tenu de l'incertitude sur chacun des déphasages, l'analyse

TABLEAU III
Analyse de corrélation

TEMPÉRATURE : RÉFÉRENCE COTONOU

LOMÉ	TEMA	TAKORADI	ABIDJAN	TABOU
-1	0	+2	+1	-2

NIVEAU MOYEN CORRIGÉ : RÉFÉRENCE TEMA

TAKORADI	ABIDJAN
0	+5

TABLEAU IV
NIVEAU MOYEN CORRIGÉ - TEMPÉRATURE

Station	TEMA	TAKORADI	ABIDJAN
Type d'analyse			
Spectres croisés.....	$-12^{\circ} \pm 25^{\circ}$	$-28^{\circ} \pm 37^{\circ}$	$8^{\circ} \pm 45^{\circ}$
Corrélation.....	+ 2	- 4	- 1

PRESSION BAROMÉTRIQUE - ABIDJAN

Type de données	Temp. 20 m	Niveau moyen	Vent zonal
Type d'analyse			
Spectres croisés.....	$-154^{\circ} \pm *$	$-170^{\circ} \pm 31^{\circ}$	$-16^{\circ} \pm *$
Corrélation.....	+ 18	- 20	+ 4

* Intervalle de confiance indéterminé.

spectrale seule, ne permet pas de se prononcer sur la nature stationnaire ou progressive de cette onde.

Pour lever ce doute nous avons effectué la corrélation entre les deux séries après les avoir soumises au filtre passe-bande centré sur 45 jours. Sur la figure 10 on a représenté le coefficient de corrélation ainsi obtenu pour différents décalages de temps entre la série considérée et la série de référence. Les figures 8 et 9 montrant clairement une oscillation de 45 jours, il est logique de retrouver des maxima de corrélation voisins distants d'une demi période.

Ces calculs ont été faits avec un décalage maximum de ± 60 jours. Sur le tableau III, on donne le décalage en jours correspondant au maximum absolu du coefficient de corrélation. Les données ayant été filtrées au préalable et de ce fait non indépendantes, il n'a pas été possible de faire un calcul d'erreur sur les valeurs présentées.

Sur les tableaux II et III, les signes pour les déphasages ont la même signification : un signe > 0 correspond à une propagation vers l'Est, un signe < 0 à une propagation vers l'Ouest. Il apparaît

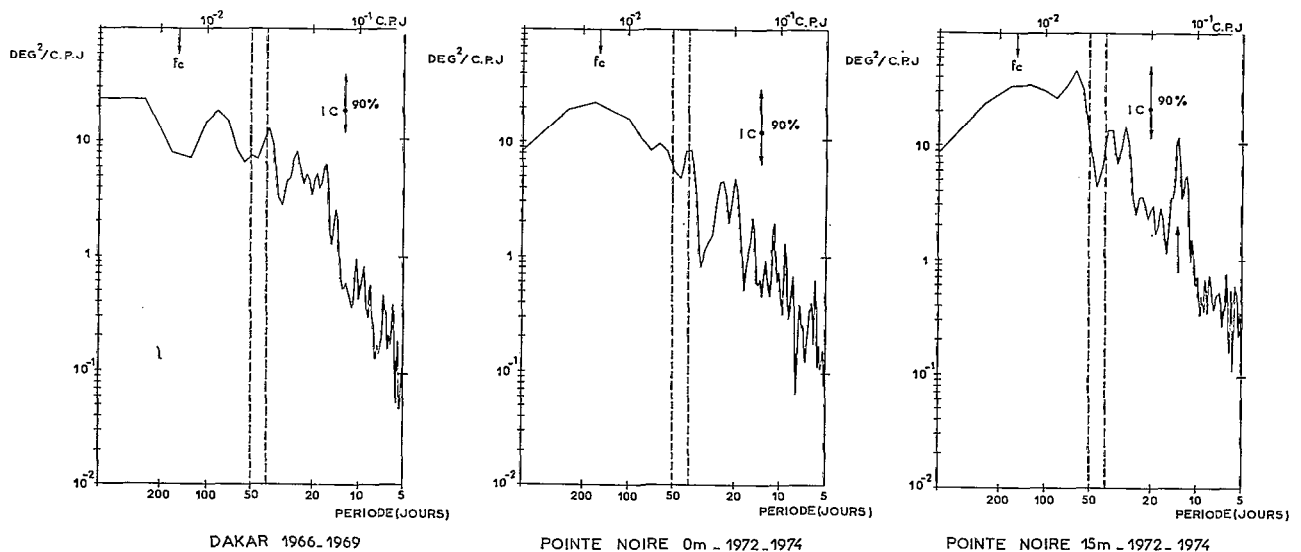


Fig. 11. — Spectres de température.

alors que les déphasages sont distribués de façon aléatoire autour de zéro, ce qui tendrait à montrer que cette onde est stationnaire.

6.2. ANALYSES À LA MÊME STATION.

Le tableau IV résume les résultats des analyses de spectres croisés et de corrélation après filtrage effectuées sur les différentes paires de paramètres :

- le niveau moyen corrigé et la température sont en phase;
- la pression barométrique est en opposition de phase avec le niveau moyen corrigé;
- la pression barométrique est en phase avec le vent zonal au niveau du sol; ce résultat est en accord avec celui trouvé par MADDEN et JULIAN (1972) dans l'île de Canton dans le Pacifique équato-

7. Extension à d'autres stations de la zone équatoriale.

Devant les résultats obtenus, il était intéressant de contrôler si ces phénomènes aux basses fréquences apparaissent ou non en des points éloignés de la zone comprise entre Tabou et Cotonou. Comme il n'était pas possible de reprendre une étude détaillée, nous donnons seulement les spectres de densité spectrale obtenus à l'aide des températures journalières mesurées aux stations côtières de Dakar Thiaroye (1966-1969) et de Pointe Noire (1972-1974) (fig. 11). On relève un pic d'énergie spectrale à 38,5 jours à Dakar et à Pointe Noire. Comme on l'a noté à Abidjan, la variance est beaucoup plus élevée au fond qu'en surface. Le spectre de Pointe Noire à 15 m de profondeur met en évidence un pic très important à 13,2 jours, très voisin de la période lunaire bimensuelle Mf. Il faudrait bien entendu reprendre l'étude de ces stations avec les données météorologiques et marégraphiques.

Ces résultats sont à rapprocher des observations de courant faites par BYSHEV et SHEKOTILLO (1974) pendant 198 jours par 16°30' N et 33°30' W en 1970. Ils mettent en évidence par l'analyse de Fourier des oscillations de courant dont les périodes sont comprises entre 36 et 68 jours sur 10 niveaux de 25 mètres à 1500 mètres.

8. Discussion.

Cette étude montre l'existence de nombreuses oscillations basses fréquences sur les côtes du Golfe de Guinée, dont une très importante de période 40-50 jours. L'extension géographique de ce phénomène doit être très importante, puisque les premiers résultats obtenus par l'analyse spectrale des données de stations aussi éloignées que Dakar et Pointe Noire présentent des oscillations de même période. Les mesures de courant faites par 33°30' W par BISHEV et SHEKOTILLO (1974) semblent indiquer que cette oscillation concerne l'ensemble de l'Atlantique inter-tropical.

L'étude des déphasages tend à prouver que cette onde est stationnaire.

L'origine de cette onde semble être atmosphérique, si l'on se base sur les pics d'énergie trouvés

dans noter que les pics d'énergie obtenus, soit avec la pression barométrique, soit avec le vent sont nettement moins accusés que ceux obtenus à l'aide des paramètres océanographiques. Cette différence se retrouve clairement sur les données filtrées. De plus les calculs de spectres croisés entre niveaux moyen corrigé et non corrigé montrent leur très forte cohérence et leur faible déphasage. Ceci nous amène à émettre l'hypothèse que cette oscillation d'environ 45 jours de période serait créée par un phénomène de résonance du bassin océanique constitué par le Golfe de Guinée sous l'excitation d'une onde atmosphérique.

Les expériences GATE faites en 1974 ont mis en évidence des oscillations de très grande longueur d'onde à l'équateur (2500 km, 16-18 jours de période). Les mesures étaient de trop courte durée pour permettre d'atteindre de plus longues périodes. On ne peut exclure que des ondes de très basses fréquences soient piégées à l'équateur et affectent les conditions hydrologiques des zones côtières avoisinantes.

Des mesures de courant de très longue durée (minimum un an) en différents points fixes le long de la côte permettraient de déterminer la nature exacte de ces ondes et leur rôle dans les variations hydrologiques importantes constatées.

Manuscrit reçu au S.C.D. de l'O.R.S.T.O.M. le 28 novembre 1975.

BIBLIOGRAPHIE

- BLACKMAN (R. B.) and TUCKEY (J. W.), 1958. — The measurement of power spectra. Dover Publ., New York.
- BYSHEV (V. I.) and CHEKOTILLO (K. A.), 1974. — A statistical analysis of certain current-velocity measurements in the north atlantic. *Izv., Atmospheric and Oceanic Physics*, vol. 10, n° 3 : 266-275.
- DUING (W.) and EVANS (R.), 1975. — Long westward waves in the Equatorial Atlantic. *GATE Report*, n° 14, vol. 1 : 30-319.
- MADDEN (R. A.) and JULIAN (P. R.), 1971. — Detection of a 40-50 day oscillation in the zonal wind in the tropical Pacific. *J. Atmos. Sci.*, 28 : 702-708.
- MADDEN (R. A.) and JULIAN (P. R.), 1972. — Description of global-scale circulation in the tropics with a 40-50 day period. *J. Atmos. Sci.*, 29 : 1109-1123.
- MAZÉ (R.), 1973. — Recherche et étude de mouvements à période propre du domaine des ondes internes dans l'Iroise. Thèse 3^e cycle. Fac. Sc. Brest.
- MUNK (W. H.), SNODGRASS (F. E.) and TUCKER (M. J.), 1959. — Spectra of low frequency ocean waves. *Bull. Scripps Inst. Oceanogr.*, 7 (4) : 283-362.