

## CONDITIONS HYDROLOGIQUES DE LA ZONE FRONTALE DU CAP LOPEZ PENDANT LA CAMPAGNE THONIÈRE DE JUIN-JUILLET 1971

B. VOITURIEZ, J. M. VERSTRAETE et R. LE BORGNE

*Océanographes de l'O.R.S.T.O.M. Abidjan (Côte d'Ivoire)*

### RÉSUMÉ

*Des séries de stations perpendiculaires à la zone frontale du Cap Lopez, ont permis d'en dégager les principales caractéristiques hydrologiques et d'amorcer l'étude biologique.*

*La descente vers le sud des eaux chaudes et dessalées du Golfe de Biafra s'effectue régulièrement au début juin puis progresse irrégulièrement, une fois passé l'équateur. Ces eaux recouvrent celles du sud, formant une nappe peu épaisse inférieure à 30 mètres, siège de variations brusques de la stabilité verticale. Cette dernière est constante dans les eaux sous-jacentes. La turbulence est très faible dans le sens N-S et plus nette dans le sens E-W. Les gradients horizontaux de salinité sont en moyenne de 0,1 ‰ par mille, mais la zone frontale présente des aires de très forts gradients, pouvant atteindre 14 ‰ par mille.*

*L'hypothèse d'un enrichissement au niveau de la zone frontale susceptible d'expliquer la présence des concentrations de thons, n'a pu être démontrée. Les valeurs de sels nutritifs et de chlorophylle « a » ne présentent pas de différences au nord et au sud. A l'est comme à l'ouest de Sao Tomé, les biomasses de zooplancton sont plus élevées dans la zone frontale et au sud. Des différences qualitatives séparent également la partie nord des parties frontale et sud-frontale à l'est. L'enrichissement en zooplancton au niveau du front n'a pu être démontré de façon certaine et nécessitera des observations ultérieures plus complètes.*

### ABSTRACT

*Perpendicular sections across the Cape Lopez front led to the definition of the main hydrological features and cast the main lines of a biological study.*

*Warm and low-salinity waters of the Gulf of Biafra drift southwards, regularly at the beginning of June, then irregularly past the equator. They overlay southern waters, making a rather thin sheet (less than 30 meters deep) where sudden variations of the vertical stability occur. The deeper layers underneath, show a constant vertical stability. The turbulence is close to zero in the N-S direction, more developed in the E-W direction. Horizontal salinity gradients are equal to 0.1 ‰ per mile on the average, but the front shows in some areas, very sharp gradients that can reach 14 ‰ per mile.*

*The frontal enrichment hypothesis which could explain high concentrations of tuna-fish cannot be proved. Values of nutrient salts and chlorophyll « a » are not different to the north and south. Zooplankton biomasses, however, are higher in the front and the south on both sides of Sao Tomé. Qualitative differences differentiate northern, frontal and southern parts, East of Sao Tomé. Frontal enrichment in zooplankton could not be proved with certainty either, and will need further observations.*

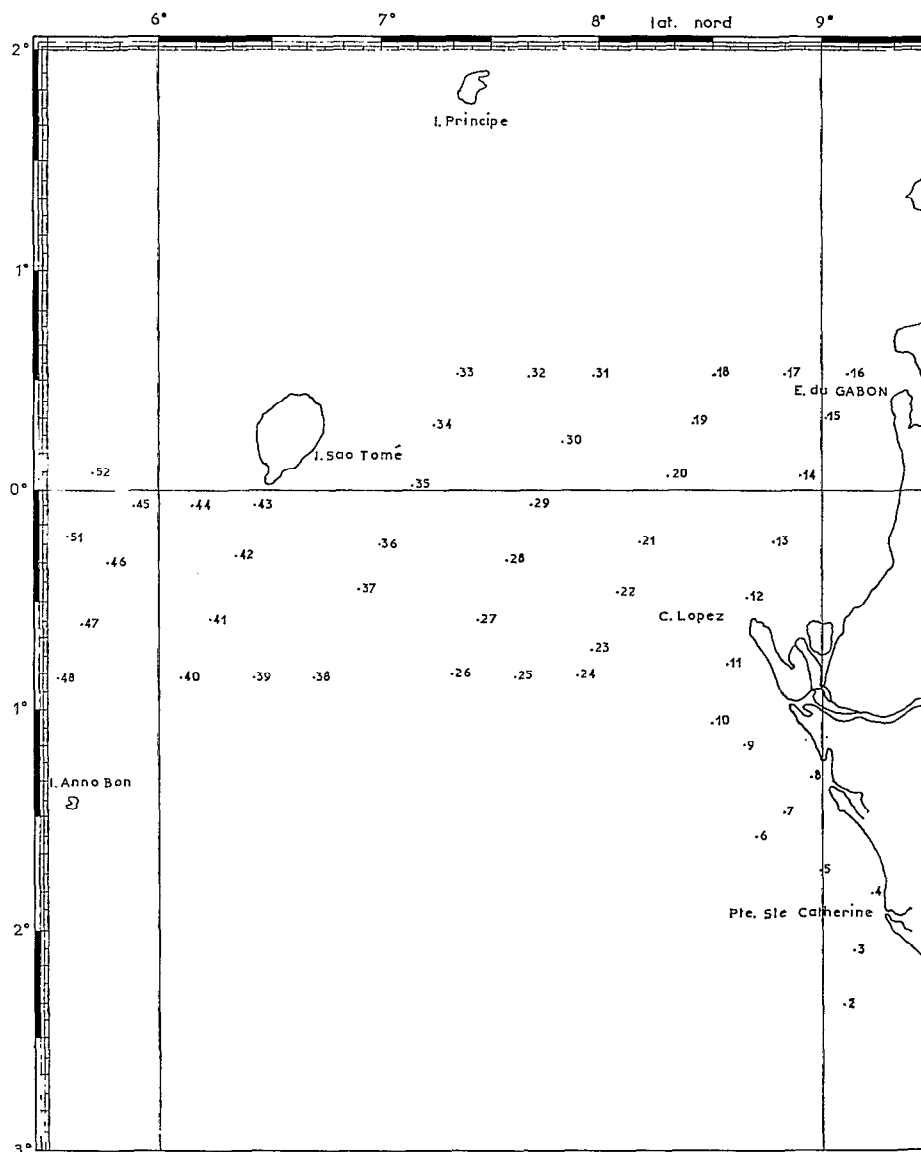


Fig. 1. — Stations d'hydrologie faites par le NIZERY du 10 au 14 juin 1971.

Les études menées par le centre O.R.S.T.O.M. de Pointe-Noire sur la pêche du yellowfin dans le golfe de Guinée ont montré que les captures étaient particulièrement abondantes dans la zone frontale qui sépare les eaux chaudes et peu salées de la baie de Biafra des eaux salées et froides des régions tropicales (LE GUEN, POINSARD, TROADEC, 1965; LE GUEN, POINSARD, 1966; POINSARD, 1967). La position de cette zone frontale suit un rythme saisonnier entre le Cap Lopez où elle s'établit de juin à septembre (BERRIT, 1964) et la région de Mossamédès où on la retrouve entre novembre et

avril. Entre juin et novembre la flotille thonière suit le front dans son mouvement général vers le sud. Ces observations sont un exemple de plus de l'association des fronts avec une grande abondance de poissons pélagiques comme on en trouve dans les systèmes frontaux formés par l'Oyashio et le Kuroshio, ou par le Gulf Stream (GRIFFITHS, 1965).

Cette association qui se répète chaque année au niveau du Cap Lopez entre l'abondance de yellowfins, attestée par la présence à partir du mois de juin d'une importante flotille de pêche, et l'existence plusieurs fois constatée d'un front océanique, a

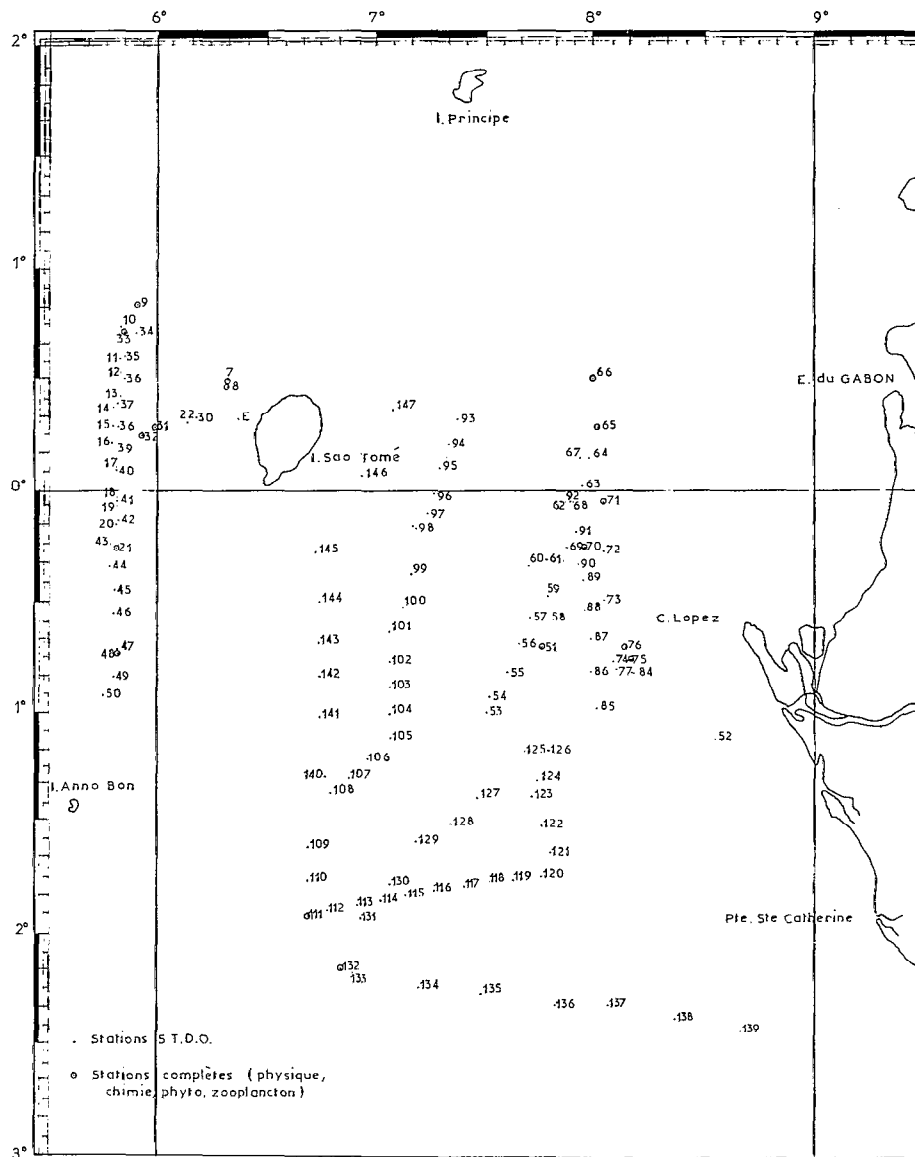


Fig. 2. — Stations faites par le CAPRICORNE du 17 juin au 4 juillet 1971.

incité l'O.R.S.T.O.M. à entreprendre une étude dans cette région pour rechercher quels pouvaient être les paramètres responsables de la présence des thons. L'une des explications pourrait être l'existence d'une grande abondance de nourriture des thons, formée principalement de micronecton, et qui proviendrait d'un enrichissement au niveau de la zone frontale. Un tel enrichissement, s'il existe, peut s'expliquer de plusieurs façons : GRIFFITHS (1965) distingue les fronts convergents où le plancton serait accumulé mécaniquement et les fronts divergents qui seraient le siège d'une production neuve par apport vers la

surface d'eaux riches en sels nutritifs. Il se pourrait également que dans la zone frontale le mélange horizontal d'eaux de caractères très différents et relativement pauvres crée des cellules plus fertiles, responsables de blooms localisés.

#### 1. PLAN DE LA CROISIÈRE ET MÉTHODES

Cette campagne a mis en œuvre deux navires de l'O.R.S.T.O.M. : le N.O. NIZERY (croisières Niz 7106

et 7107) et le N.O. CAPRICORNE (croisière Cap 7103). Le N.O. NIZERY précéda le N.O. CAPRICORNE et décrit, du 10 au 14 juin, la zone frontale (fig. 1) en enregistrant la température de surface, en faisant toutes les 2 heures environ des bathythermogrammes et en prélevant des échantillons pour la mesure des salinités de surface.

Le CAPRICORNE effectua du 17 juin au 4 juillet une série de sections à travers la zone frontale (fig. 2) en faisant des stations rapprochées (tous les 8 milles environ) avec une sonde STD0 BISSETT-BERMANN et en effectuant également de part et d'autre de la zone frontale et en son milieu, des stations complètes de jour et de nuit comportant :

- 1° des mesures de courant (courantomètre ECKMAN) entre 0 et 400 m ;
- 2° des prélèvements à la rosette associée à la sonde, à 12 niveaux entre 0 et 100 m pour l'analyse des sels nutritifs : nitrites, nitrates, phosphates, azote total, phosphore total, silicates ;
- 3° des prélèvements faits à six niveaux entre 0 et 100 m avec une bouteille de 30 litres pour l'analyse du phosphore en particules, des pigments photosynthétiques et l'étude du zooplancton ;
- 4° une série de traits pour la récolte du zooplancton.

Les données recueillies par la sonde (salinité, température, oxygène) étaient d'une part enregistrées graphiquement et d'autre part corrigées par l'ordinateur du bord et stockées sur rubans perforés.

Les méthodes employées pour l'analyse du nitrite, nitrate, phosphate, silicate, étaient celles de STRICKLAND et PARSONS (1968). Les analyses du phosphore et de l'azote total étaient faites par oxydation de la matière organique avec une lampe UV de 1.200 watts (STRICKLAND et PARSONS, 1968). L'analyse du phosphore en particules utilisait la méthode de MENZEL & CORWIN (1965).

Des échantillons de 4 litres recueillis à la bouteille de 30 litres étaient filtrés sur filtres Whatman GF/C, extraits à l'acétone et mesurés au spectrophotomètre. Le calcul des teneurs en chlorophylle « a » et phéophytine fait intervenir les équations de LORENZEN (1967).

Enfin, pour l'étude du zooplancton chaque station complète comprenait :

1° un ou plusieurs traits horizontaux de surface au filet WP2 (200 microns de vide de maille) de 5 à 10 minutes. Le plancton recueilli était immédiatement fixé et mis à sédimenter.

2° un ou plusieurs traits obliques de 60 m à la surface au filet FAO Larval Tuna (500 microns de vide de maille) d'une quinzaine de minutes. Comme pour les traits horizontaux, le volume filtré était mesuré par un débit-mètre T.S.K.

Le plancton recueilli au filet FAO Larval Tuna était trié à bord ; larves de thons, poissons et orga-

nismes de grande taille étaient isolés et le reste mis à sédimenter. Quelques heures plus tard, après la lecture du volume sédimenté, l'échantillon était fractionné au « Folsom Plankton Sample Splitter » de façon à ne conserver que 1500 à 2000 individus. De retour à Abidjan, les comptages ont été faits au niveau des principaux groupes taxonomiques. Dans le tableau III ne figurent que les résultats des groupes les mieux représentés ou subissant des variations notables d'une zone à l'autre.

3° Une série de prélèvements à la bouteille « Niskin » de 30 litres aux six profondeurs échantillonnées par les phytoplanctologistes. La totalité de l'eau de la bouteille était filtrée sur un tamis de 300 microns avant d'être utilisée en partie pour le dosage des pigments chlorophylliens. Le zooplancton était immédiatement déterminé au niveau des taxons et compté à bord du navire.

Enfin des séries de 4 ou 5 traits obliques et horizontaux ont permis d'estimer la variabilité des résultats de biomasses et d'effectifs, et d'obtenir une meilleure estimation de ces quantités. Ces opérations se sont déroulées en moins d'une heure et dans une même masse d'eau, aux stations 65, 66, 70, 71, 111 et 132.

## 2. CARACTÈRES PHYSIQUES DES FRONTS OBSERVÉS

CROMWELL & REID (1956) définissent un front comme une « bande à la surface de la mer au travers de laquelle la densité change brutalement ». Il y a lieu de distinguer les fronts proprement dits, phénomènes actifs analogues aux fronts météorologiques, qui se déplacent et sont entretenus par un système particulier de circulation verticale, tel celui décrit par CROMWELL & REID (1956), des zones frontales qui séparent des masses d'eau différentes. Les fronts intéressent une bande très étroite de l'ordre de quelques centaines de mètres et ont une existence éphémère alors que les zones frontales sont beaucoup plus statiques, ont un caractère quasi permanent et sont le siège de gradients horizontaux beaucoup plus faibles. Il est vraisemblable d'ailleurs que les zones frontales soient des régions privilégiées pour la formation de fronts, ceux-ci correspondant à des mouvements ou des ondulations de la zone frontale.

La carte des salinités de surface dressée par le N.O. NIZERY (fig. 3) une semaine avant l'arrivée du N.O. CAPRICORNE, montre clairement la zone frontale à l'ouest du Cap Lopez. Au nord de la ligne joignant Sao Tomé au Cap Lopez, on observe des eaux superficielles chaudes ( $t^{\circ} > 25^{\circ}C$ ) et dessalées ( $S < 35 \text{ ‰}$ ). La dessalure s'accroît à mesure que l'on s'approche des estuaires du Gabon ( $S = 31 \text{ ‰}$ ) ; au sud de cette ligne, les eaux sont relativement moins chaudes et de salinité élevée ( $S > 35 \text{ ‰}$ ). Le contact de ces deux masses d'eau constitue une zone frontale, et cette situation reste stable du 10 au 14 juin 1971, avec un gradient moyen horizontal égal à  $0,1 \text{ ‰}$  par mille dans le 195°.

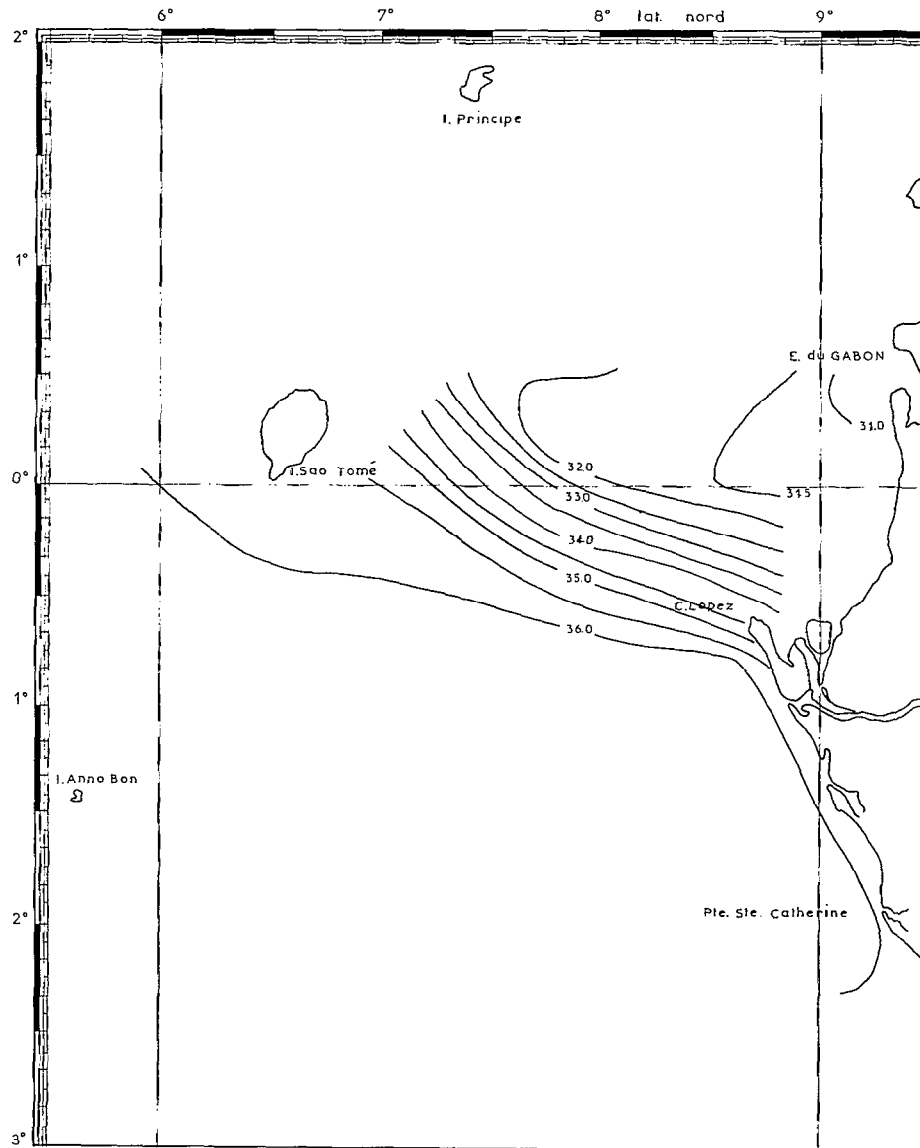


Fig. 3. — Salinités de surface du 10 au 14 juin 1971 (NIZERY 7106).

Par la suite, du 17 juin au 4 juillet le CAPRICORNE fit un grand nombre de sections à travers la zone frontale à un moment où elle s'était mise en mouvement, comme l'attestent sur les figures 3 et 4, les positions respectives de l'isohaline 36 ‰.

La figure 4 ne traduit pas une situation réelle puisque les mesures s'étendent sur une quinzaine de jours, mais donne une image de la complexité de la situation au moment où l'on assistait à un mouvement vers le sud des eaux chaudes et peu salées. La figure 5 présente le diagramme TS de surface pour les radiales faites par 6° est et 8° est. Les stations « complètes » sont indiquées par un rond

noir ; sur la figure 6 sont représentés les diagrammes TS des stations caractéristiques chaudes et froides.

### 2.1. Gradients horizontaux

A l'intérieur de la zone frontale où le gradient horizontal moyen de salinité était de l'ordre de 0,1 ‰ par mille, on a pu observer des fronts où ce gradient dépassait 10 ‰ par mille. Ainsi le 17 juin 1971 à une quinzaine de milles au nord-ouest de Sao Tomé un front a-t-il été repéré à vue. Il était matérialisé par une bande au clapot intense sur laquelle de nombreux débris s'étaient accumulés. Ce front était

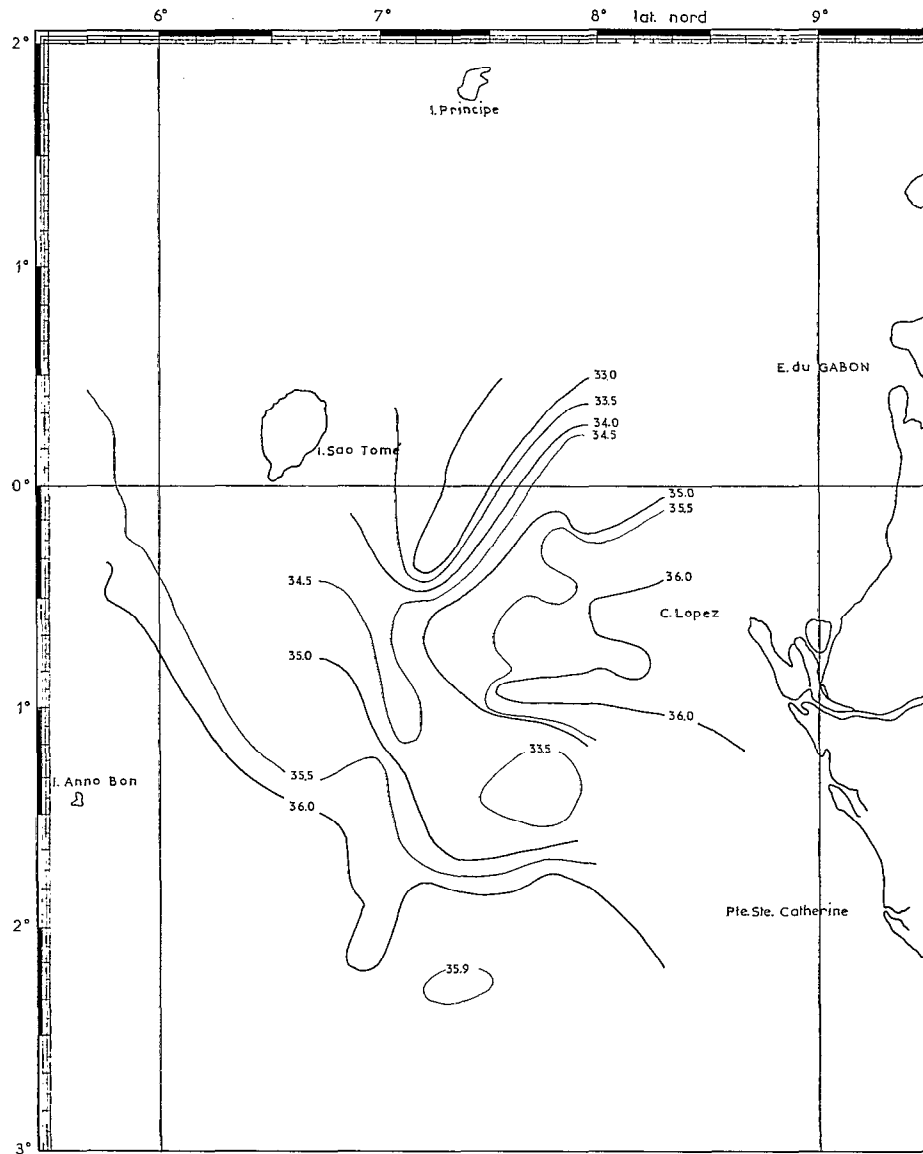


Fig. 4. — Salinités de surface du 17 juin au 4 juillet 1971.

très nettement visible au radar et il était facile ainsi de connaître la position du navire par rapport à lui. En traversant le front la température passa de  $25^{\circ}6$  à  $24^{\circ}6$ . Il était orienté sensiblement est-ouest et une section sud-nord fut faite à travers le front avec la sonde STDO, de 16 h à 17 h 15 (stations 1 à 7) (fig. 7).

Entre les stations 3 et 4 distantes d'environ 0,1 mille, la salinité est passée de  $35,1\text{‰}$  à  $33,7\text{‰}$  soit un gradient horizontal de salinité de  $14\text{‰}$  par mille. De la station 1 à la station 6 le bateau est resté en dérive et sa vitesse de dérive par rapport au front

était beaucoup plus importante entre les stations 1 et 3 au sud du front où elle était voisine de 1 nœud, qu'entre les stations 3 et 6 où elle n'était que de 0,5 nœud. A partir de la station 6, il fallut remettre en route pour s'éloigner jusqu'à la station 7. Le vent soufflait du sud à 7-8 m/s et entraînait donc le navire vers le nord. On peut en déduire que le front se déplaçait vers le sud à une vitesse proche de 0,5 nœud si l'on admet que la dérive due au vent était elle-même voisine de 0,5 nœud. De plus, l'accumulation de débris le long du front permet de supposer qu'il s'agissait d'un front convergent associé à un mouve-

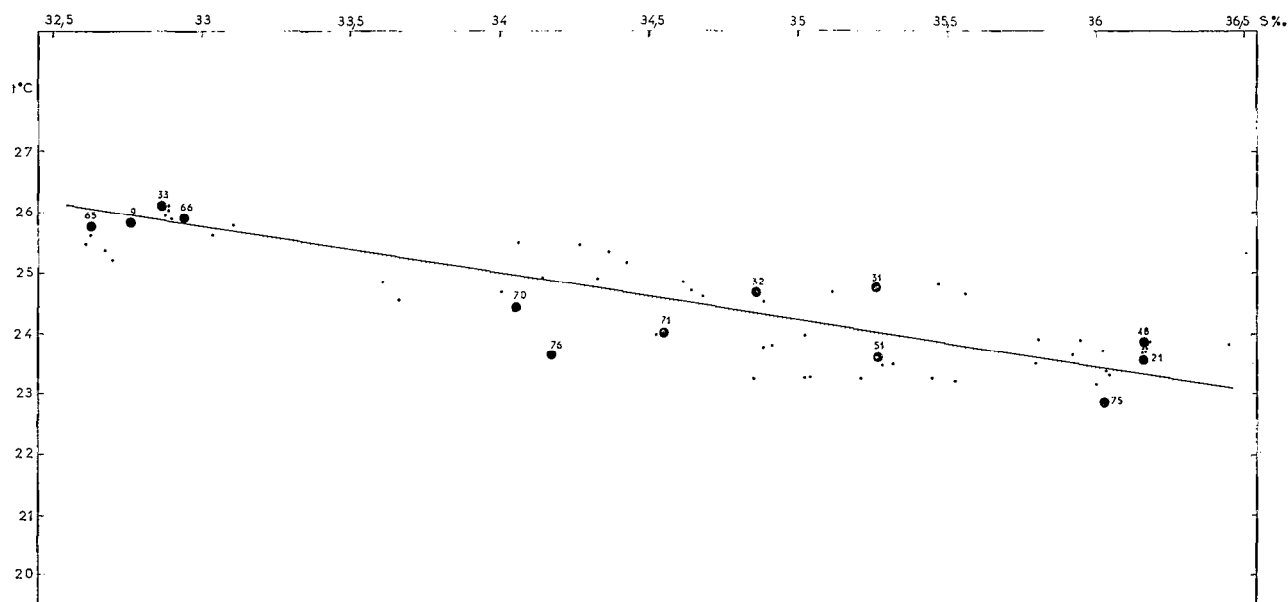


Fig. 5. — Diagramme T. S. de surface pour les radiales faites par 6° E et 8° E.

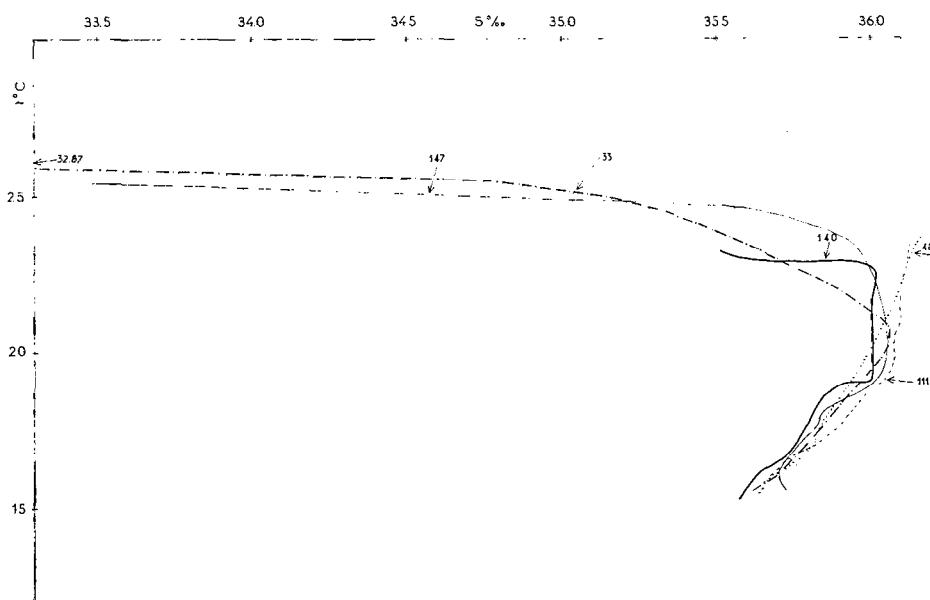


Fig. 6. — Diagramme T. S. ; Stations Nord-frontales : N° 33 et 147. — Stations Sud-frontales : N° 48, 111 et 140.

ment vers le sud des eaux chaudes dessalées.

Un deuxième front orienté NW-SE, observé visuellement, se trouvait à 40 M à l'ouest du Cap Lopez (26 juin 1971) ; il était matérialisé par un clapotis visible au radar et un changement de couleur (plus bleu du côté froid, à l'ouest) ; de

nombreux débris et des goémons restaient piégés sur le front. L'examen des diagrammes TS de part et d'autre du front permet de différencier une couche d'eau dessalée très mince, de 10 m d'épaisseur au maximum. Au-dessous, on relève des températures à peu près identiques aux mêmes profondeurs et des

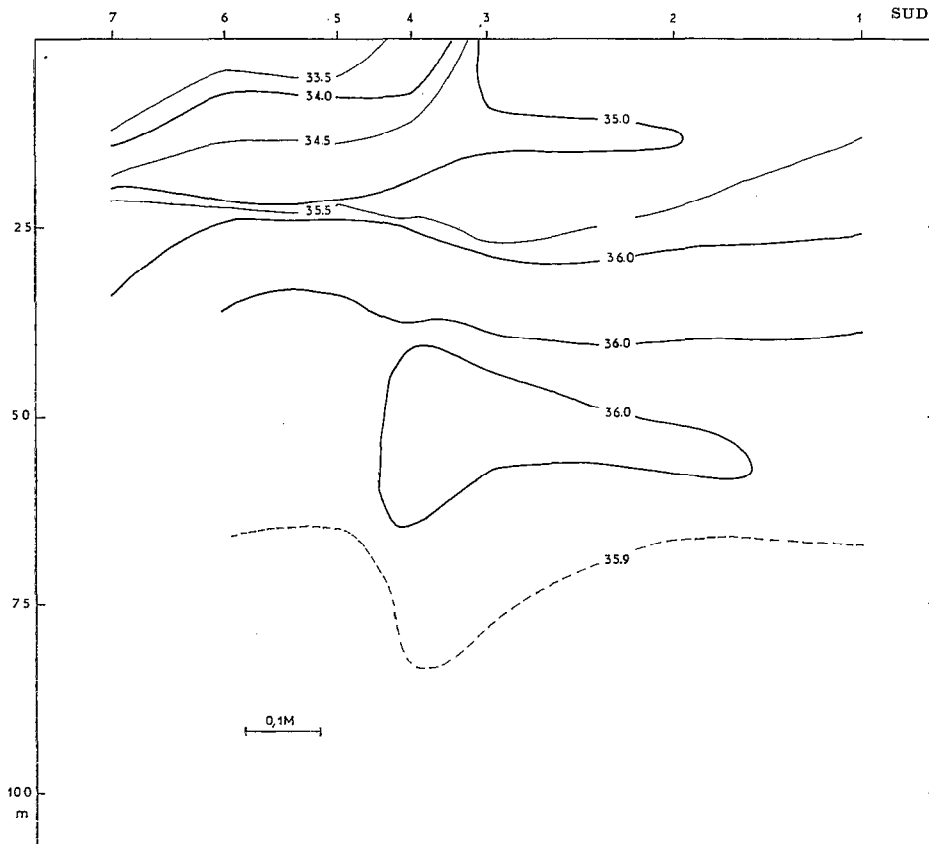


Fig. 7. — Coupe du front observé à 15 Milles au N-W de Sao Tomé : a) Salinités.

salinités à peu près constantes, autour de 36 ‰, sur toute la couche entre 10 et 50 m. Ce front analogue au précédent, correspondait à l'écoulement vers le sud le long de la côte, des eaux dessalées isolant une poche de salinité supérieure à 36 ‰ (fig. 4).

2.2. Structure verticale

La couche frontale, qui sépare les eaux dessalées du maximum de salinité sous-jacent est peu épaisse et peu profonde ; il lui correspond évidemment un gradient vertical de salinité maximum qui se situe toujours au-dessus de 30 m. Sous la couche frontale, on trouve un maximum de salinité généralement supérieur à 36 ‰ et qui fait surface dans la partie sud-frontale. Enfin on observe sous la première pycnocline — qui correspond à la couche frontale — une deuxième pycnocline que l'on pourrait qualifier de permanente et qui prolonge la pycnocline de la zone sud-frontale (fig. 8).

2.3. Relief dynamique

Le relief dynamique varie sur de courtes distances perpendiculairement au front ; les régions chaudes et dessalées sont toujours des points hauts géostrophiques. En prenant une surface de référence à 100 m, on relève les variations de hauteur dynamique maximum suivantes à la surface de la mer :

Radiale Nord-Sud						
Radiale	10-21	34-50	53-66	85-92	93-111	140-147
$\Delta D$ cm dyn.	5,0	7,6	6,2	7,3	4,0	5,6
Distance (Milles)	56	91	78	47	93	102

On voit que le relief dynamique présente les variations maximums pour les radiales nord-sud : 0,08 cm. dyn. par mille entre les stations 34 et 50 ; 0,15 cm. dyn.



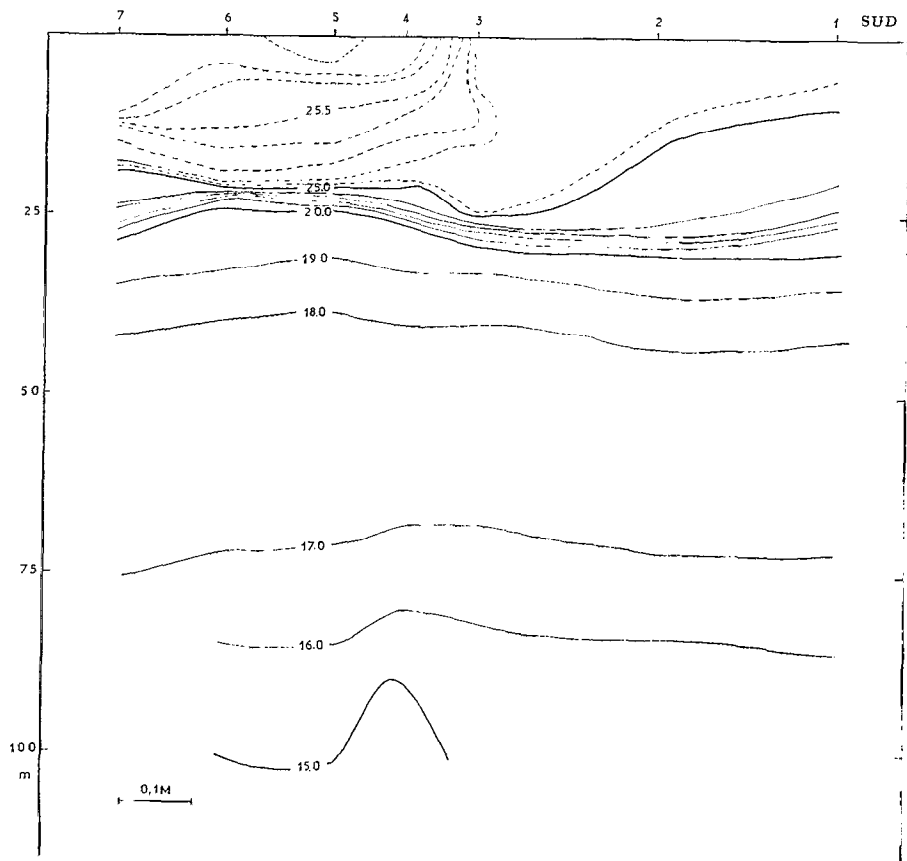


Fig. 7 — b) Températures.

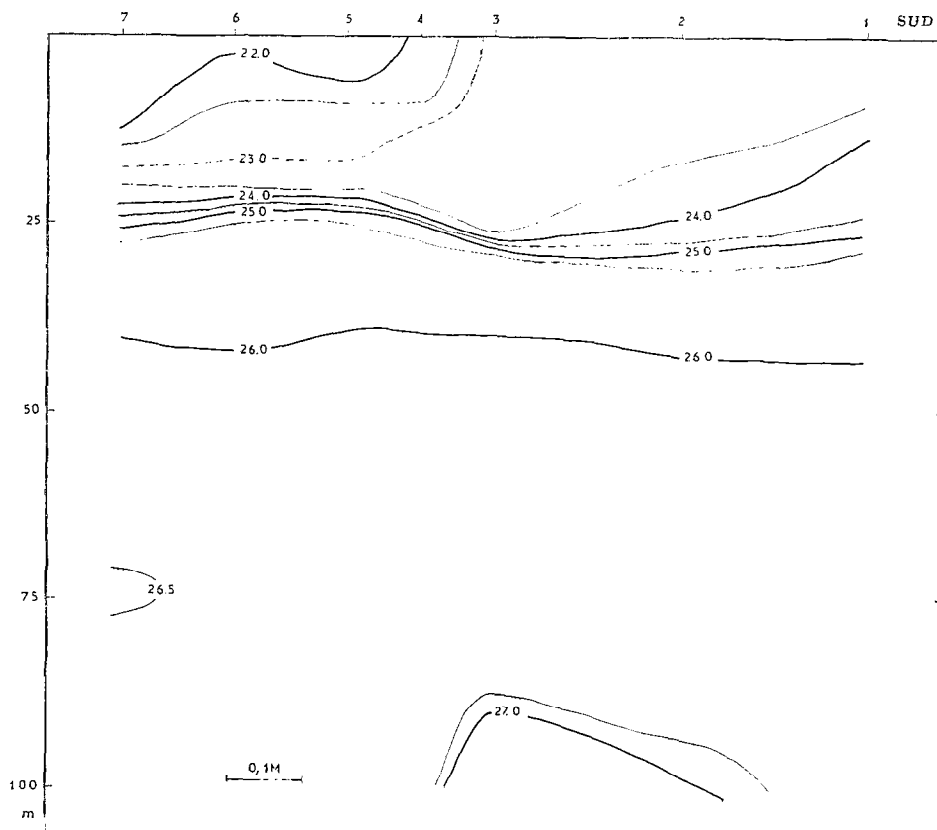


Fig. 7 — c) Sigma-t.

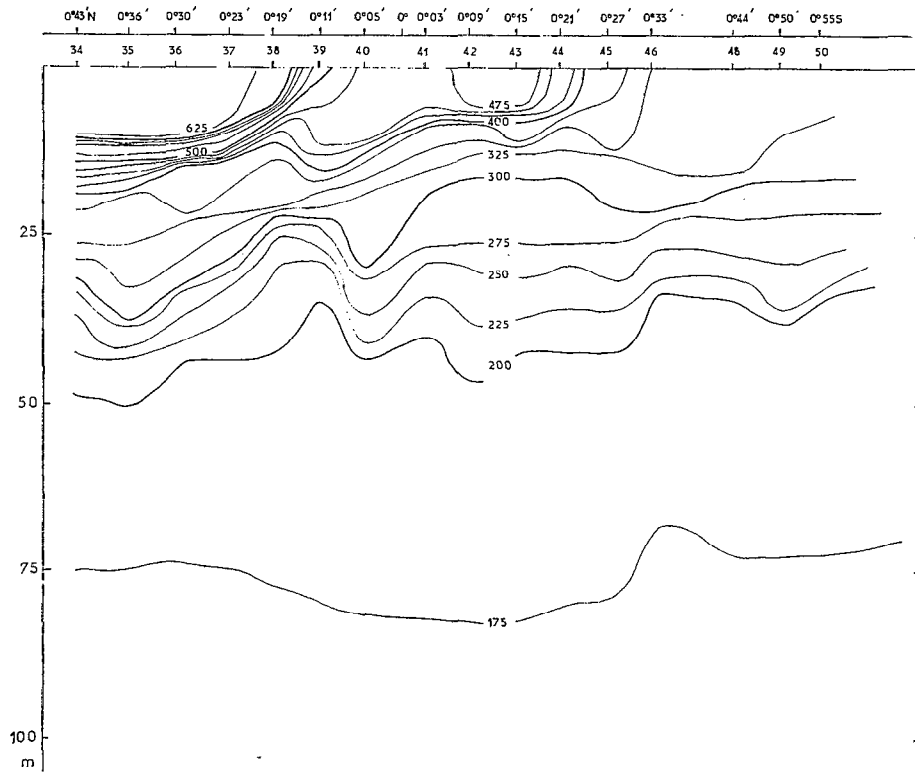


Fig. 8. — Coupe  $\Delta$  s, t pour les stations 34 à 50 sur le méridien 6° Est.

par mille entre les stations 85 et 92. Ceci est confirmé par les mesures directes de courant à 10 m, faites soit au nord soit au sud de l'équateur. Ces mesures sont assez précises, car on a pris pour niveau de référence 300 ou 500 mètres.

### 3. MOUVEMENT DES FRONTS

Si l'on compare la situation observée par le N.O. NIZERY avec celle observée 15 jours plus tard par le N.O. CAPRICORNE (fig. 3 et 4), on peut constater que les eaux dessalées situées au nord de l'équateur vers la mi-juin, s'étalent vers le sud, l'axe de leur progression étant assez net sur la carte des salinités de surface (fig. 4). Cette invasion d'eau à faible salinité déborde également le Cap Lopez et se manifeste jusqu'à 1° 20'S le long de la côte (fig. 9).

Au schéma simple du début juin succède une situation très compliquée due au fait que cette invasion d'eau dessalée ne se fait pas régulièrement ; les isohalines s'enfoncent en coin vers le sud avec des vitesses de progression différentes.

### Vitesse de déplacement d'un front

Deux radiales N-S ont été faites à 3 jours d'intervalle environ entre les méridiens 5°50'E et 6°E : première radiale, stations 10 à 21 (fig. 10) ; deuxième radiale, stations 35 à 50 (fig. 11).

Entre 45'N et 15'S, la salinité en surface a varié en moyenne de 1,5 ‰ en 64 heures (fig. 12). On observe un déplacement général des isohalines vers le sud dans la couche superficielle, et on peut calculer la composante de leur vitesse suivant la direction nord-sud. Les résultats sont regroupés dans le tableau ci-dessous.

Isohaline	Déplacement Sud (en Milles)	Intervalle de temps	Vitesse (Nœuds)	
33,5 ‰	26	63 h 30	0,41 } groupe 1	
34,0 ‰	24	63 h 30		0,38
34,5 ‰	37	62 h	0,60 } groupe 2	
35,0 ‰	42	64 h 30		0,65
35,5 ‰	39	64 h 30		0,60
36,0 ‰	39	64 h		0,61

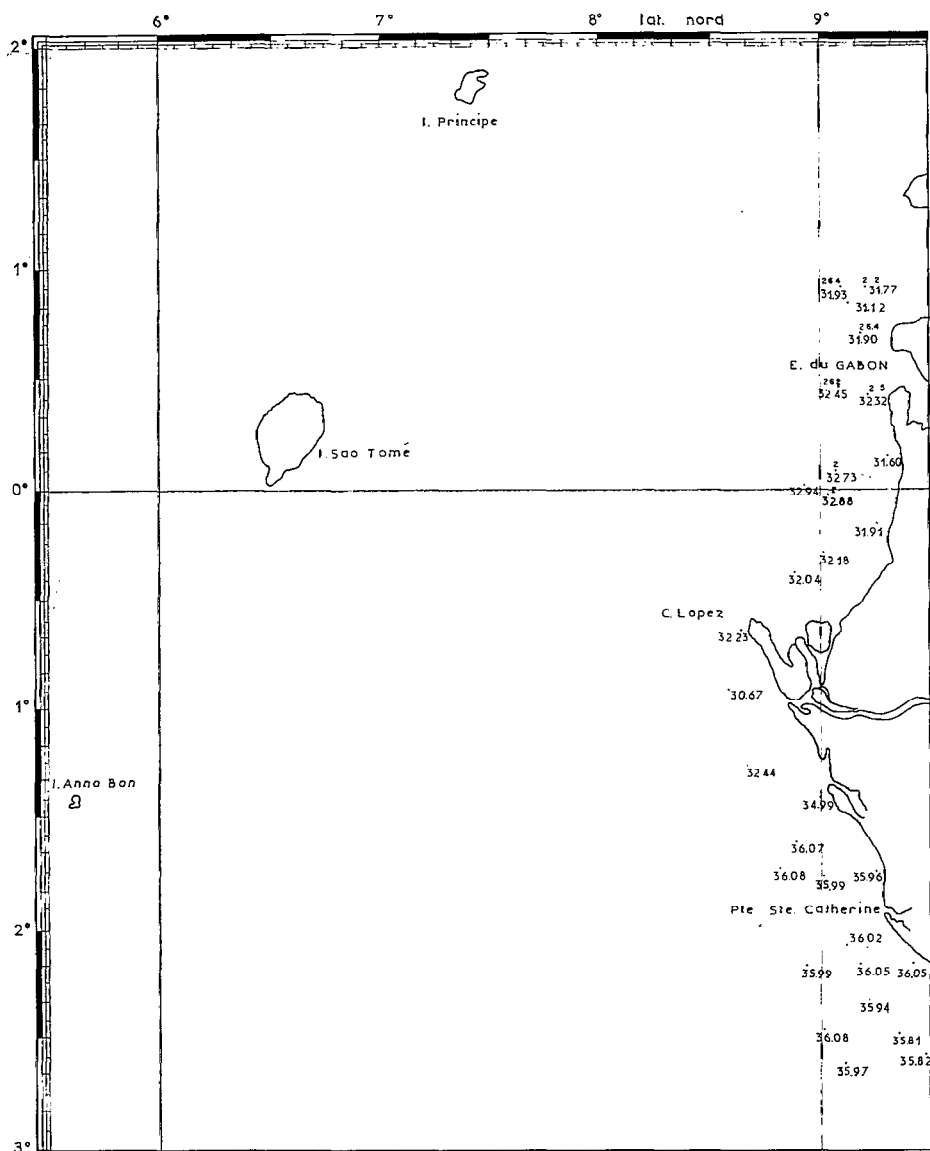


Fig. 9. — Salinités de surface (NIZERY 7107).

On distingue deux groupes d'isohalines qui se déplacent à des vitesses différentes. Le premier groupe (faibles salinités) progresse vers le sud à la vitesse moyenne de 0,36 nœud, tandis que le second groupe (fortes salinités) à la vitesse moyenne de 0,62 nœud.

La zone frontale serait ainsi composée de deux fronts, chacun entraînant sa circulation propre : convergence et plongée au niveau des fronts, tandis qu'on aurait une divergence entre les deux fronts.

Les eaux chaudes et dessalées seraient animées d'un mouvement cylindrique de translation vers le sud. Les isohalines de départ (fig. 10) s'inclinent en progressant et la couche superficielle dessalée s'amincit dans sa progression vers le sud (fig. 11). La divergence nécessaire pour un tel schéma apparaît sur la figure 11 où l'on observe entre les deux fronts une zone homogène (St. 40) avec un maximum de salinité (34,68 ‰), alors que de part et d'autre on observe des valeurs inférieures à 34,5 ‰.

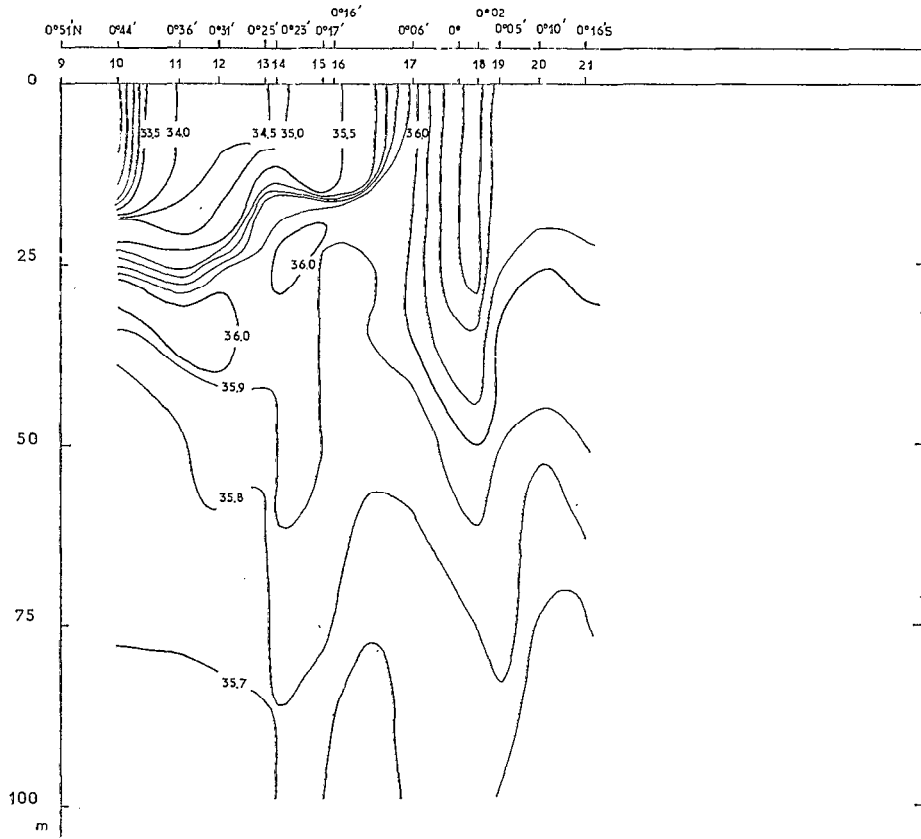


Fig. 10. — Salinités entre 0 et 100 m sur le méridien 6° Est.

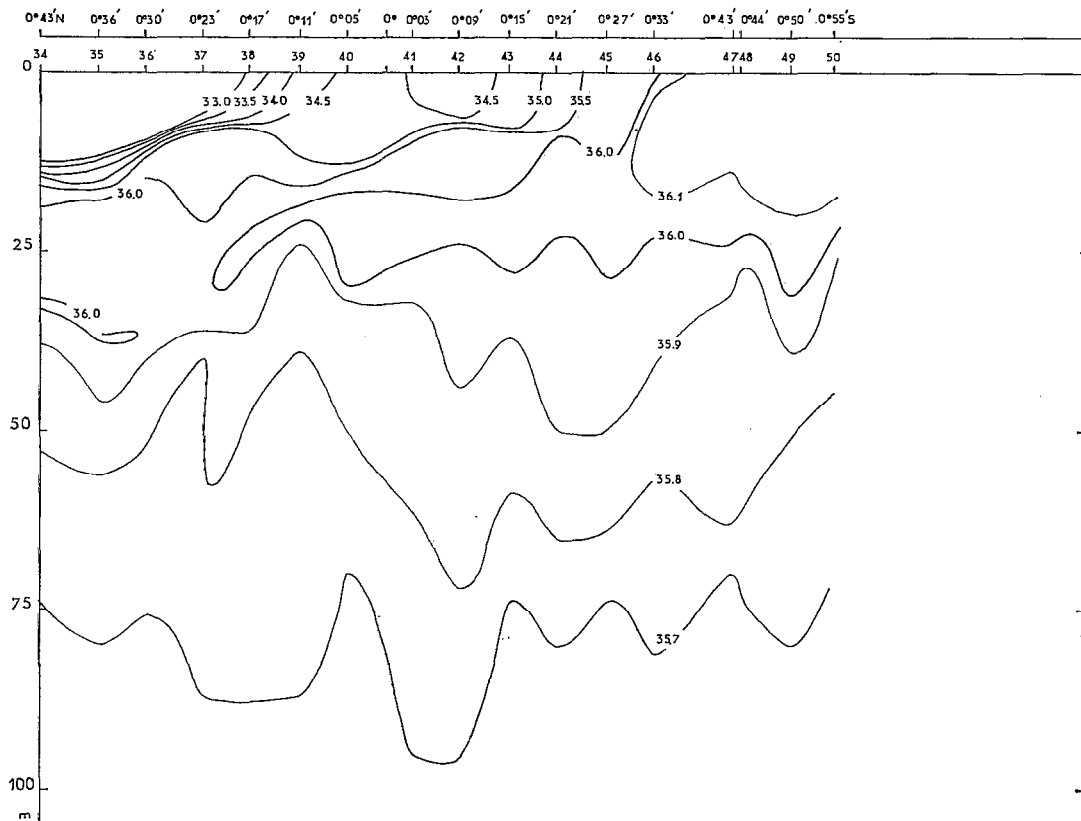


Fig. 11. — Salinités entre 0 et 100 m sur le méridien 6° Est (64 h entre les fig. 10 et 11).

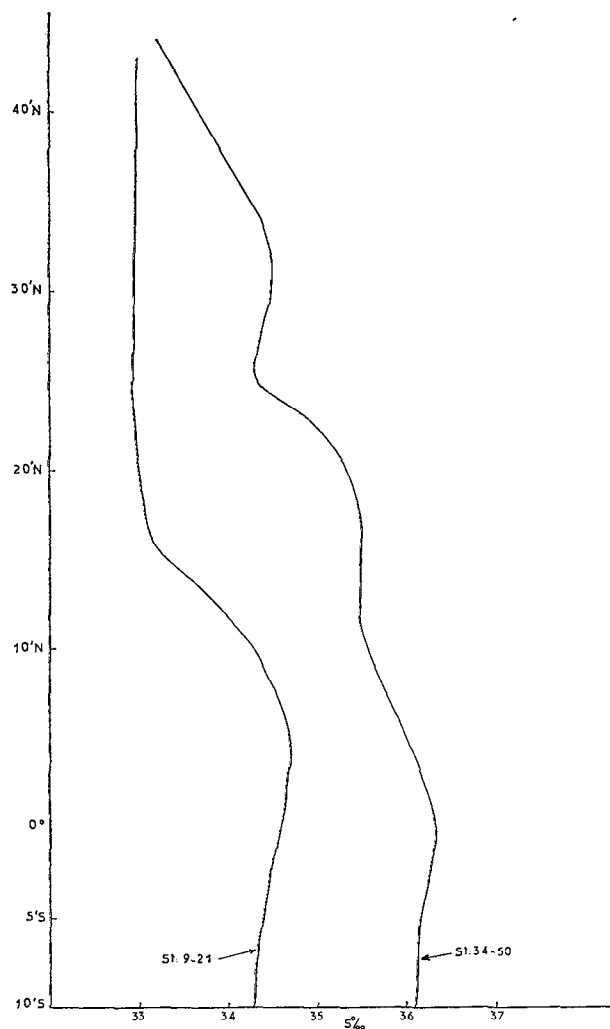


Fig. 12. — Salinités de surface à trois jours d'intervalle sur le méridien 6° Est

#### 4. ÉTUDE DE LA STABILITÉ VERTICALE DES MASSES D'EAU EN ZONE FRONTALE

On sait que la fréquence de Vaisala exprime simplement la stabilité des masses d'eau suivant la verticale. Sa valeur est donnée par la formule :

$$N^2 = - \frac{g}{\rho} \frac{d\rho}{dz} - \frac{g^2}{c^2}$$

Les masses d'eau sont stables si  $N^2 > 0$ , c'est-à-dire si  $N$  est un nombre réel.  $Z$  est orienté vers le haut.

$$g = 980 \text{ cm.s}^{-2}$$

$$c = \text{vitesse du son dans l'eau} = 1500 \text{ m/s}^{-1}$$

$$\rho = \text{masse volumique de l'eau en g/cm}^3$$

Dans la zone étudiée, la stratification est forte et le premier terme l'emporte sur le second dans les couches superficielles. Nous nous contenterons donc du premier terme.

La période de Vaisala des masses d'eau entre 5 m et 25 m de profondeur est très souvent inférieure à 3 minutes, avec des minimums voisins de 1 minute. Cette stabilité verticale élevée est due à la présence des couches d'eau superficielles chaudes ( $t > 25^\circ\text{C}$ ) et très peu salées ( $S < 34 \text{ ‰}$ ). Nous pouvons comparer ces résultats à ceux obtenus par d'autres chercheurs : au niveau du maximum de stabilité du contre-courant équatorial Atlantique (MONTGOMERY, 1939), la période de Vaisala atteint un minimum de l'ordre de 30 secondes. Dans le golfe de Guinée, LE FLOCH (1970) donne pour ordre de grandeur de la période de Vaisala au niveau du gradient maximum de masse volumique, une valeur de 3 mn. Si nous étudions une coupe caractéristique (stations 53 à 66) centrée sur le méridien 8°Est, on observe une couche d'eau peu salée ( $S < 33 \text{ ‰}$ ) dont l'épaisseur (5 m à la station 62) croît vers le nord (15 m à la station 66). Juste au-dessous de cette couche dessalée et chaude ( $t > 25^\circ\text{C}$ ), les fréquences de Vaisala sont maximums :

$$77.10^{-3} < N < 89.10^{-1} \text{ rad. s}^{-1}$$

soit une période minimum de l'ordre de 1 mn 20 s. Un autre exemple caractéristique est fourni par la coupe des stations 1 à 7. Le front, détecté à vue et repéré au radar, se trouvait au N-W de Sao Tomé. On constate en étudiant la stabilité verticale :

1° que les stations sud (1 et 2) présentent un maximum de stabilité entre 25 m et 30 m inférieur à  $50.10^{-3} \text{ rad. s}^{-1}$ . Au passage du front, la stabilité croît très nettement et il y a discontinuité dans la couche de stabilité maximum : en 0,1 Mille, elle passe de 25-30 m (station n° 3) à 20-25 m (station n° 4). Pour toutes les stations 3, 4, 5, 6 et 7, le maximum est supérieur à  $50.10^{-3} \text{ rad. s}^{-1}$ , soit une période minimum inférieure à 2 mn.

2° que seules les couches superficielles sont concernées par ces variations brusques, les couches sous-jacentes au-dessous de 50 m gardent une stabilité verticale à peu près constante. Les stations nord (4, 5, 6, 7) ont une stabilité verticale forte entre 0 et 40 m, en moyenne supérieure à  $20.10^{-3} \text{ rad. s}^{-1}$  ( $T < 5 \text{ mn}$ ).

3° qu'il existe également sur l'ensemble des radiales nord-sud une deuxième couche à maximum de stabilité verticale au-dessous de la pycnocline principale décrite ci-dessus. Dans cette deuxième pycnocline, les périodes de Vaisala sont comprises entre 3 mn et 10 mn. Au-dessous de 70 m, les périodes de Vaisala sont généralement supérieures à 10 mn.

## 5. TURBULENCE

Pour avoir une idée des possibilités d'échanges par mélanges verticaux, il faut déterminer la turbulence verticale. En effet, le coefficient de viscosité turbulente vertical  $A_v$  dépend :

- 1° de la stabilité verticale,
- 2° du gradient vertical de vitesse.

$A_v$  est donc une fonction du nombre de Richardson :

$$Ri = \frac{-\frac{g}{\rho} \frac{d\rho}{dz}}{\left[\frac{\Delta v}{\Delta z}\right]^2} = \left[\frac{N}{\frac{\Delta v}{\Delta z}}\right]^2 \quad (\text{sans dimension})$$

On voit immédiatement que dans la zone étudiée entre 1°N et 1°S, la stratification  $N$  varie dans de grandes limites suivant le lieu et suivant le niveau. Au contraire, les gradients verticaux de vitesse sont faibles ; ceci veut dire que la turbulence dépendra surtout de la stabilité dans la zone considérée. D'une façon générale, nous avons trouvé des nombres de Richardson élevés, ce qui implique peu de mélanges verticaux. On a calculé  $Ri$  entre 0 et 100 mètres et suivant les deux composantes du courant E-W et N-S.

Si nous étudions la turbulence dans le front observé entre les stations 38 et 40 (fig. 11), on trouve que (station courantométrie n° 32) :

(a) la turbulence est très faible dans le sens N-S ( $Ri > 1$ )

(b) par contre, dans le sens E-W, on note une certaine turbulence :

$Ri < 1$  jusqu'à 30 mètres.

Aux stations éloignées du front (stations n° 33 et 48), la turbulence est mieux établie entre 0 et 30 m, soit dans le sens N-S soit E-W. Par contre, partout, au-dessous de 30 m la turbulence est très réduite.

## 6. SELS NUTRITIFS ET PHYTOPLANCTON

Les mesures de concentrations en sels nutritifs et chlorophylle « a » ne montrent pas de différences entre les différentes zones, par ailleurs assez pauvres. Seules les stations 75 et 76, proches du Cap Lopez, présentent des teneurs plus élevées en chlorophylle « a ». Ceci s'explique par la présence quasi permanente

d'un upwelling au niveau du Cap, descendant parallèlement à la côte (GALLARDO, 1972).

## 7. ZOOPLANCTON

L'étude biologique de la région a consisté à comparer les zones situées au nord, au sud et au niveau même du front d'un point de vue qualitatif et quantitatif. Il est en effet intéressant de savoir si la présence des thoniers à cette époque dans les zones frontale et sub-frontale, coïncide avec un enrichissement en necton et micronecton constituant la nourriture des thons. Le zooplancton représente des organismes beaucoup moins indépendants des masses d'eau, reliant la production primaire au micronecton. Son étude présente donc l'avantage de mettre en évidence un enrichissement éventuel au niveau de la zone frontale (1).

## 7.1. Résultats

Il a paru préférable de grouper les stations selon les critères suivants :

1° Les  $\sigma_t$  de surface :

$\sigma_t = 21-23$  correspondant à la zone dessalée et chaude au nord.

$\sigma_t = 23-24$  correspondant à la zone frontale.

$\sigma_t > 24$  correspondant à la zone à salinité élevée et température basse, au sud.

2° La position géographique, suivant l'ordre chronologique de la campagne :

— Ouest de Sao Tomé, du 18 au 21 juin.

— Est de Sao Tomé, du 23 juin au premier juillet.

En raison des fortes variations nyctémérales, les comparaisons se sont toujours faites entre stations de nuit ou stations de jour. D'une façon générale, les résultats nocturnes confirment les résultats diurnes. Toutes les figures et tableaux tiennent compte du mode de regroupement effectué.

(a) *Variations quantitatives*

Les valeurs des volumes sédimentés sont reproduites dans le tableau n° I et leurs variations en fonction des  $\sigma_t$  de surface sur les figures 13 et 14, respectivement pour les traits obliques et horizontaux. En outre figurent pour les séries de 4 ou 5 traits les intervalles de confiance des moyennes (2).

(1) La perte des filets « Bongo » dès le début de la campagne explique l'absence de résultats concernant le micronecton.

(2) Dans une zone considérée comme homogène, nous supposons que la distribution des volumes sédimentés au cours de l'échantillonnage, est normale. L'intervalle de confiance  $i$  de la moyenne est alors estimé par la formule :

$$i = m \pm t \cdot 0,05 \cdot s / \sqrt{n} \quad (\text{au seuil de probabilité } 5 \%)$$

avec  $m$  = moyenne de  $n$  valeurs  
et  $s$  = écart type de  $n$  valeurs

TABLEAU N° 1

Valeurs des volumes sédimentés de zooplancton ( $\text{ml}/\text{m}^3$ )

Position par rapport à Sao Tomé	Stations diurnes	Dates	Traits obliques	Traits horizontaux	Position par rapport à Sao Tomé	Stations nocturnes	Dates	Traits obliques	Traits horizontaux
W	9 (C)	18-6-71	0,14	0,03	W	33 (C)	20-6-71	0,36	0,21
	32 (M)	20-6-71	0,62	0,16		31 (M)	19-6-71	0,46	0,17
	48 (F)	21-6-71	0,47	0,06		21 (F)	19-6-71	0,42	0,14
E	$\overline{66}$ (C)	23-6-71	$0,12 \pm 0,04$	$0,08 \pm 0,05$	E	$\overline{65}$ (C)	24-6-71	$0,28 \pm 0,06$	$0,28 \pm 0,05$
	$\overline{71}$ (M)	25-6-71	$0,59 \pm 0,16$	$0,35 \pm 0,24$		$\overline{70}$ (M)	24-6-71	$0,65 \pm 0,13$	$1,51 \pm 0,03$
	76 (M)	26-6-71	Colmatage	$0,29 \pm 0,12$		79 (F)	25-6-71	Colmatage	$1,14 \pm 0,53$
	$\overline{132}$ (F)	1-7-71	$0,56 \pm 0,24$	—		$\overline{111}$ (F)	30-6-71	$0,85 \pm 0,22$	—

Légende : C : Zone chaude et dessalée (nord). M : Zone mixte. F : Zone froide et salée (sud).  
E : Zone est de Sao Tomé. W : Zone ouest de Sao Tomé. — : Estimation sur 4-5 traits

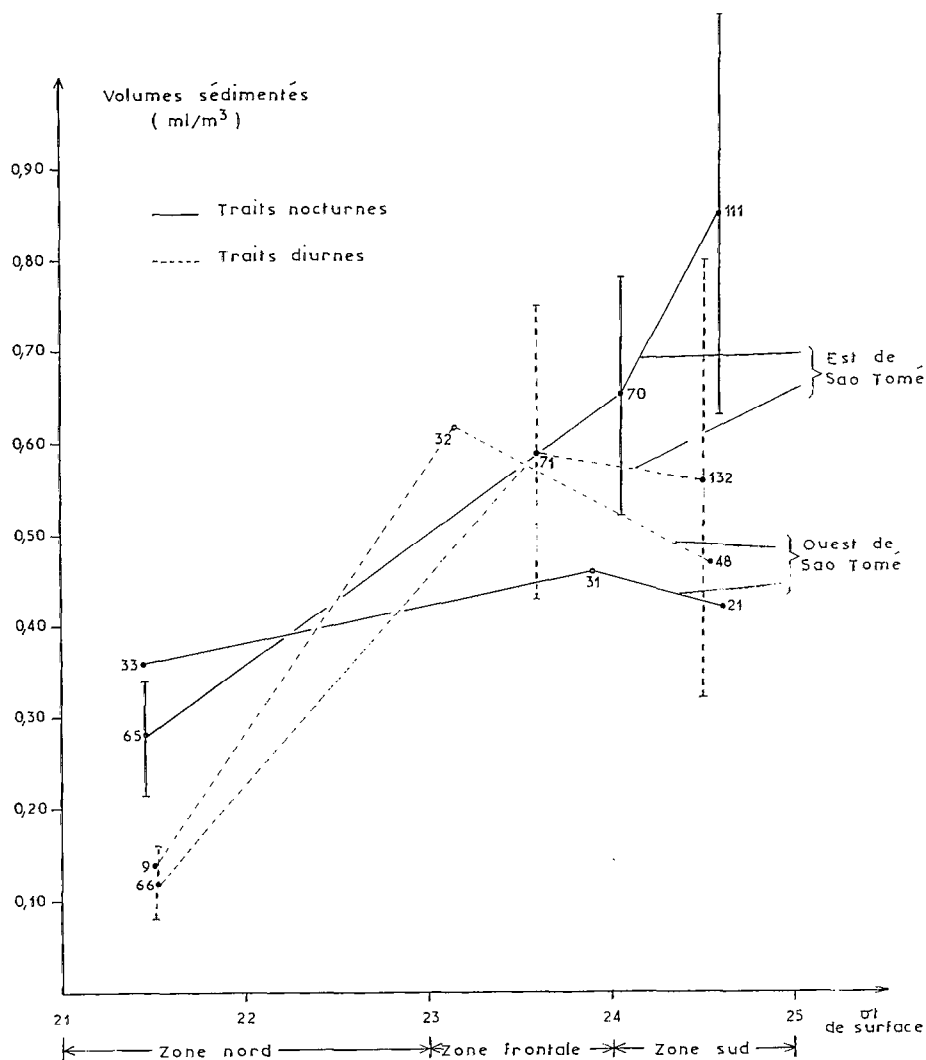


Fig. 13. — Valeurs des volumes sédimentés des traits obliques (filet FAO LT) aux différentes stations placées en abscisse selon leur ct. Les traits unissent les stations nocturnes ou diurnes, à l'Est ou à l'Ouest de Sao Tomé.

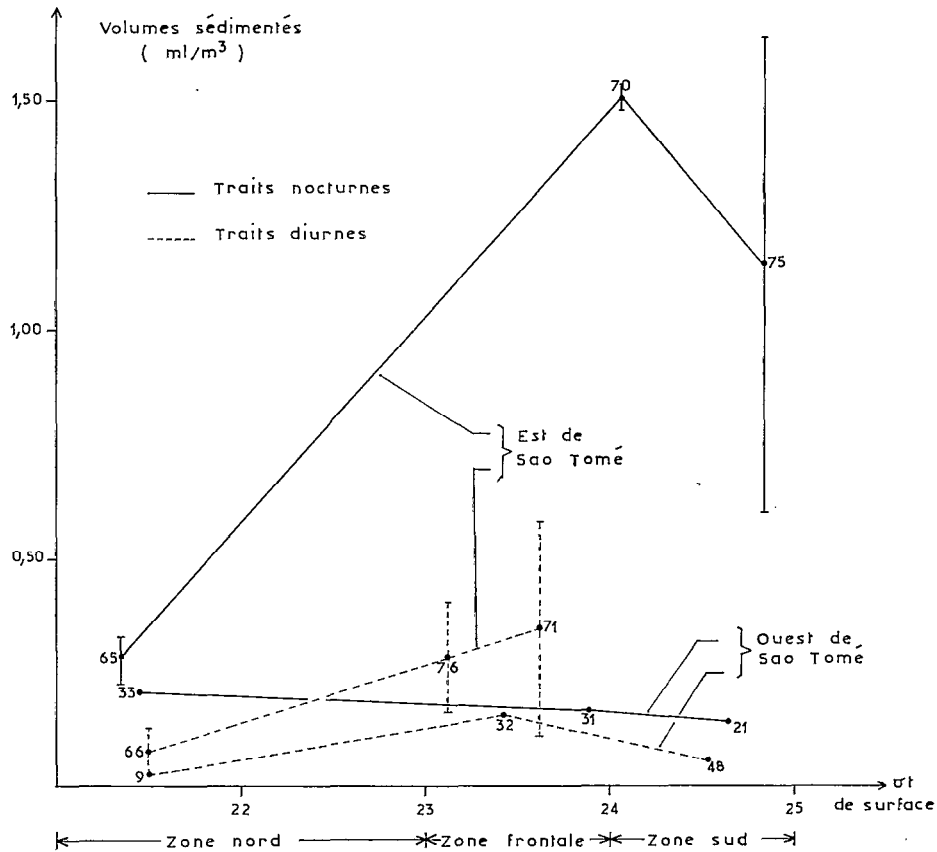


Fig. 14. — Valeurs des volumes sédimentés des traits de surface (filet WP2) aux différentes stations placées en abscisse selon leur  $\sigma_t$ . Les traits unissent les stations nocturnes ou diurnes, à l'Est ou à l'Ouest de Sao Tomé.

La zone au nord du front est caractérisée par sa pauvreté, comparée aux deux autres. Les valeurs des biovolumes des stations diurnes 9-66 et nocturnes 33-65 sont inférieures à celles des autres stations, tant en ce qui concerne les traits obliques que les traits de surface (exception cependant pour le trait horizontal de la station 33). Cette différence est surtout marquée le jour et s'atténue la nuit.

La distinction entre stations frontales et sub-frontales apparaît moins nettement. Seule la station 32 présente des biovolumes nettement supérieurs à celles des zones nord (station 9) et sud (station 48). Dans le cas des stations 31, 70 et 71, l'augmentation quand elle existe n'est pas nette.

Enfin la comparaison des quatre séries de stations tend à montrer que les volumes sédimentés sont plus importants dans la zone frontale et sub-frontale à l'est de Sao Tomé qu'à l'ouest.

#### (b) Variations qualitatives

La figure 15 représente les proportions des principaux groupes taxonomiques recueillis au filet « FAO Larval Tuna » aux différentes stations. Aux tableaux II et III figurent les concentrations de ces groupes pour les prélèvements au filet « FAO Larval Tuna » (1) et à la bouteille. Bien que chacun de ces modes de collecte du zooplancton ne recueille pas les mêmes organismes (mailles différentes, évitement des formes vagiles), les résultats concordent assez bien pour les petits Copépodes (stades copépodites essentiellement), les Ostracodes et les Thaliacés. Nous utiliserons les résultats du « plancton-bouteille » pour deux raisons :

— préciser les concentrations de Thaliacés et d'Ostracodes lors du colmatage du filet aux stations 75 et 76,

(1) Pour les stations 65, 66, 70, 71, 111 et 132, les estimations sont les moyennes des résultats de 4-5 traits.



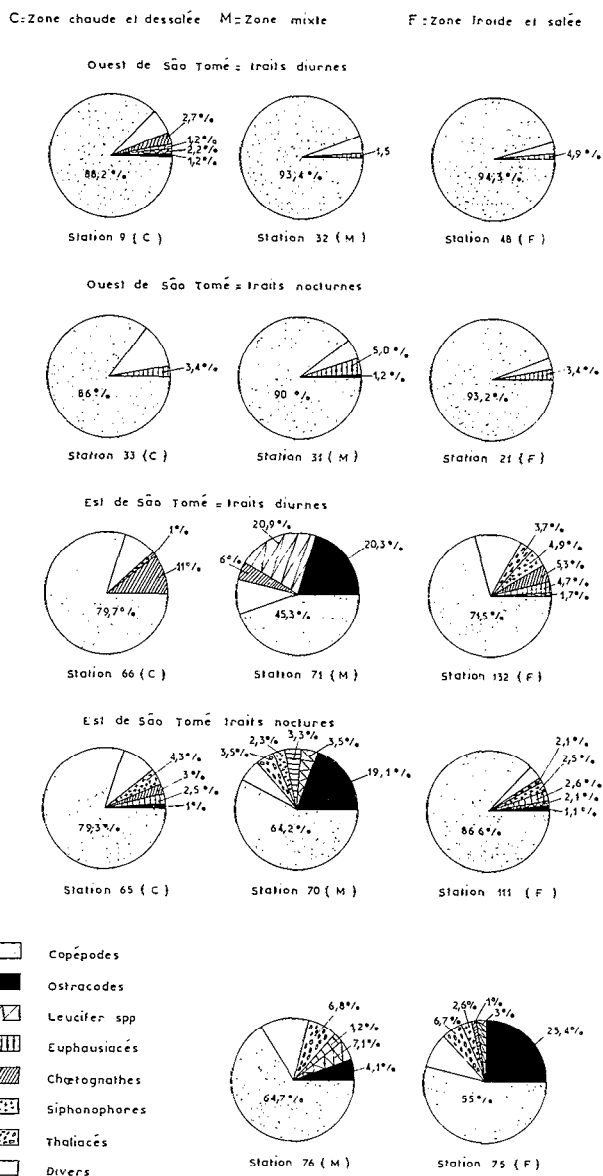


Fig. 15. — Pourcentages des effectifs des principaux groupes taxonomiques représentés (traits obliques). A noter la position particulière de la Station 75 (voir texte)

— connaître la profondeur à laquelle se trouvent ces organismes.

L'examen des proportions des différents groupes (fig. 15) permet de distinguer les zones à l'est et à l'ouest de Sao Tomé.

1° Le zooplancton à l'ouest de Sao Tomé est caractérisé tant au nord qu'au sud du front par la dominance des Copépodes : 86 à 88 % dans la zone dessalée et chaude au nord, 93 à 94 % au niveau

du front et au sud. Les Thaliacés, Ostracodes et le genre *Leucifer* sont très peu ou pas représentés dans les prélèvements. Les Euphausiacés sont surtout abondants la nuit, à l'ouest comme à l'est, ce qui confirme l'importance des migrations verticales de ces organismes.

2° Le zooplancton à l'est de Sao Tomé présente pour la zone septentrionale des caractéristiques voisines de celles de la zone occidentale (stations 65-66) : prédominance des Copépodes (79 % du zooplancton du filet en effectifs).

Les stations 51, 70, 71, 75, 76 voient l'apparition des Thaliacés (Salpes et Doliolles) responsables du colmatage du filet aux stations 75 et 76. Pour ces deux stations, les valeurs de concentrations et de pourcentages (fig. 15, tabl. n° II) obtenus à partir des traits obliques sont donc sujettes à caution ; en particulier, il y a sous-estimation des Thaliacés retenus par les mailles du filet et qui n'ont pu être recueillis pour les mesures de volume et les comptages. La figure 16 indique que les Salpes et les Doliolles se trouvent sur les dix premiers mètres. A cette abondance des Thaliacés au niveau du front, correspondent également de fortes concentrations de *Leucifer* et d'Ostracodes. Les Copépodes ne représentent plus que 45 à 65 % des effectifs. La station 75, dont les st correspondent nettement à la zone froide, se rattache aux stations frontales à la fois géographiquement et par la composition de son plancton. L'anomalie négative de température que l'on observe est la conséquence de l'upwelling côtier dont il a été question plus haut.

Enfin, dans la zone froide (stations 111 et 132), les Copépodes représentent de nouveau l'essentiel du zooplancton avec toutefois une importance non négligeable des *Leucifer*, Ostracodes et Thaliacés. En faisant route sur Pointe-Noire (voir fig. 2), les traits obliques ont mis en évidence des essais importants de Pyrosomes, Méduses et Cténophores (*Beroe*).

## 7.2. Discussion

Cette étude du zooplancton montre l'antagonisme qui existe entre les régions situées à l'est et à l'ouest de Sao Tomé. Pour la partie occidentale, la détermination au niveau des principaux taxons n'a pas permis de mettre en évidence de différences qualitatives de part et d'autre du front, différences qui existent vraisemblablement à l'échelon spécifique. Le front ne sépare apparemment que deux zones : une pauvre au nord et une riche au sud avec peut-être un enrichissement dans la zone frontale. En outre, les volumes sédimentés de la partie occidentale sont plus faibles que ceux de la partie orientale. Il serait erroné de conclure à des biomasses plus riches à l'est qu'à l'ouest, puisque comme nous venons de le voir,

TABLEAU N° II  
Concentrations par m<sup>3</sup> des principaux groupes (traits obliques)\*  
(même légende que pour le tabl. n° I)

Position par rapport à Sao Tomé	Stations diurnes	Copép.	Euphaus.	Chaetogn.	Ostrac.	Siphono.	Thaliacés	Leucifer
W	9 (C)	68,3	0,8	1,9	0,9	0,7	—	1,6
	32 (M)	165,0	8,8	5,4	1,9	0,9	1,1	1,8
	48 (F)	120,5	1,9	0,5	0,5	—	0,3	0,5
E	65 (C)	38,3	—	5,2	—	0,5	—	0,1
	71 (M)	163,3	0,6	22,0	73,4	2,7	1,8	75,4
	76 (M)	19,6	0,1	0,3	1,2	—	2,1	2,1
	132 (F)	187,5	12,4	2,6	0,5	12,9	9,6	4,5
Position par rapport à Sao Tomé	Stations nocturnes	Copép.	Euphaus.	Chaetogn.	Ostrac.	Siphono.	Thaliacés	Leucifer
W	33 (C)	165,0	8,8	5,4	1,9	0,8	1,1	1,8
	31 (M)	160,0	8,8	0,6	2,1	—	—	—
	21 (F)	176,0	6,5	1,7	0,8	—	—	—
E	65 (C)	133,9	4,2	5,1	1,5	7,2	0,4	0,7
	70 (M)	71,3	3,9	0,7	19,4	2,9	3,5	4,2
	75 (F)	352,0	6,9	22,0	75,4	17,0	43,0	19,1
	111 (F)	223,6	6,8	1,0	2,8	6,4	2,3	5,4

\* Colmatage par Thaliacés.

TABLEAU N° III  
Concentrations par m<sup>3</sup> des principaux groupes (plancton bouteille)\*  
(même légende que pour le tabl. n° I)

Position par rapport à Sao Tomé	Stations diurnes	Copépodes	Protozoa.**	Ptérop.	Ostrac.	Siphono.	Thaliacés
W	32 (M)	553,0	120,0	—	—	—	—
	48 (F)	413,0	266,0	13,3	—	—	—
E	66 (C)	333,0	66,6	—	—	16,6	—
	71 (M)	733,0	22,2	—	300,0	—	11,1
	76 (M)	750,0	297,0	—	116,6	—	616,0
	51 (M)	326,0	13,3	—	—	—	186,6
	132 (F)	466,0	200,0	16,6	—	16,6	33,0
Position par rapport à Sao Tomé	Stations nocturnes	Copépodes	Protozoa.**	Ptérop.	Ostrac.	Siphono.	Thaliacés
W	33 (C)	280,0	180,0	6,6	—	6,6	—
	31 (M)	313,3	—	—	—	6,6	—
	21 (F)	553,0	120,0	13,3	—	—	—
E	65 (C)	633,3	283,3	—	—	16,6	—
	70 (M)	546,0	26,6	—	150,0	—	153,0
	75 (F)	855,0	277,0	11,1	111,1	11,1	647,7
	111 (F)	364,0	300,0	11,1	11,1	11,1	744,0

\* Moyenne des prélèvements de 0 à 60 mètres.

\*\* Radiolaires-Acanthaires.

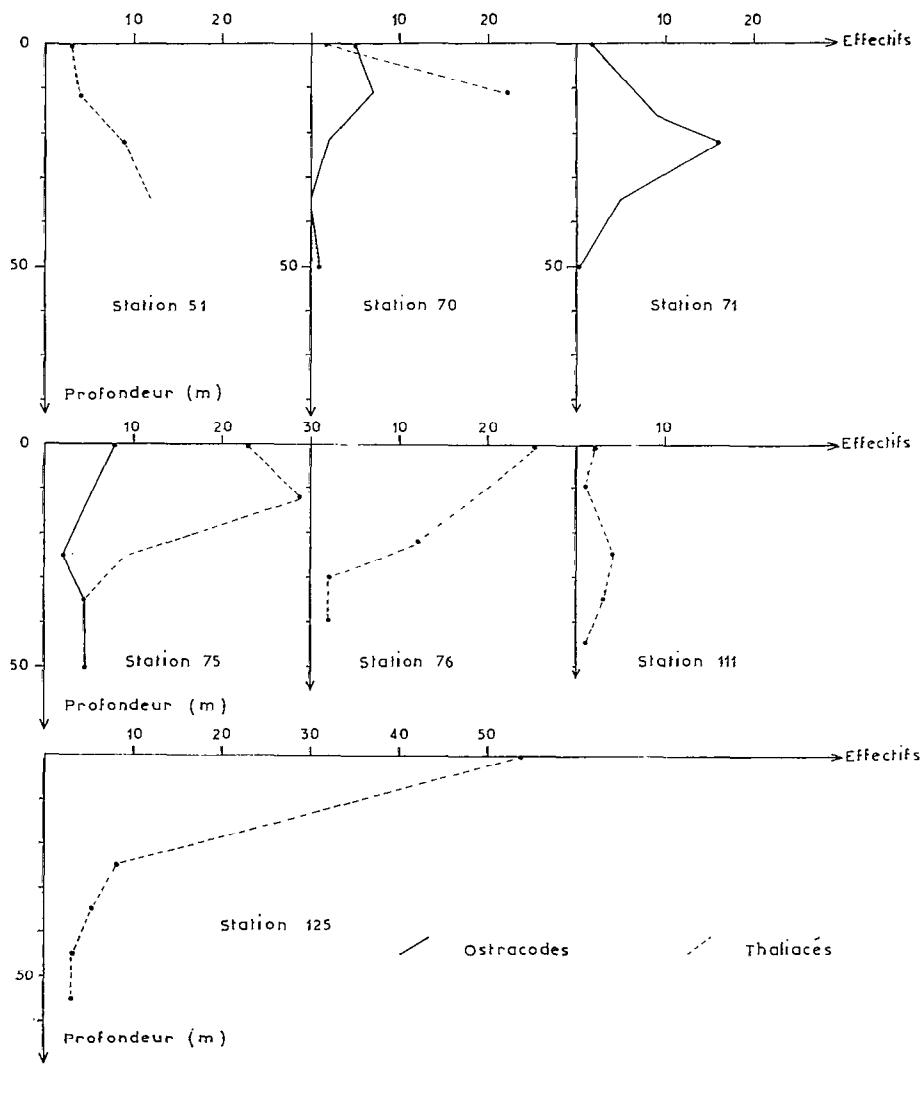


Fig. 16. — Répartition verticale des Ostracodes et Thaliacés (effectifs pour 30 litres).

le plancton n'a pas la même composition. Les organismes « gélatineux » tels les Thaliacés, donnent de fortes valeurs de volumes sédimentés.

A l'est, les trois zones sont nettement distinctes, tant du point de vue quantitatif que qualitatif. La zone septentrionale est pauvre et dominée par les Copépodes. La zone frontale qui n'est pas plus riche apparemment que la partie froide à forte salinité, s'en distingue par des concentrations élevées en Thaliacés, *Leucifer* et Ostracodes. Les eaux du sud enfin, voient de nouveau la prédominance des Copépodes avec toutefois de fortes concentrations de Thaliacés et *Leucifer*. Ces observations confirment celles de BINET *et al.* (1967) dans la même zone et à

une époque voisine (10 au 22 juin 1967) : abondance de *Leucifer* dans les eaux frontales et recrudescence des Doliolés ; dans la partie nord, prédominance des Copépodes. Il est intéressant de remarquer trois points :

— Les Thaliacés sont souvent abondants dans les zones frontales (LONGHURST, 1967).

— L'abondance des *Leucifer* et des Thaliacés semble caractériser le front étudié. L'étude des variations saisonnières du zooplancton de Pointe-Noire (Congo) par BINET (1970), montre que chaque passage du front (mai-septembre) est marqué par un « pic » de Doliolés et de *Leucifer*.

— Les différences qualitatives que l'on note entre les parties orientale et occidentale de Sao Tomé pourraient provenir d'une influence néritique plus forte à l'est ; les stations 75 et 76 ne sont qu'à une trentaine de milles du Cap Lopez. Il s'ensuit un enrichissement en phytoplancton qui amène le développement d'herbivores tels que les Thaliacés, *Leucifer*, Ostracodes et peut-être de certains genres de Copépodes.

Quelles peuvent être les conséquences de la présence de telles populations dans la zone frontale où se trouvaient les thoniers ? On admet généralement que les Thaliacés sont un « cul de sac » dans la chaîne alimentaire, en ce sens qu'ils sont de très faible valeur nutritive et mangés par peu d'organismes ; de plus, ils sont responsables d'un « grazing » important du phytoplancton (FRASER, 1962). A côté de ces Thaliacés en grand nombre, les concentrations élevées en Ostracodes, *Leucifer* et Copépodes peuvent représenter le maillon reliant la production primaire et la nourriture des thons.

Enfin, le front est-il une zone d'enrichissement soit par accumulation du fait de la convergence, soit par eutrophisation (mélange vertical, apports des grands fleuves) ? Le peu de valeurs dont nous disposons ne permet pas de l'affirmer : les biovolumes ne sont pas systématiquement plus élevées dans la zone frontale que dans la zone froide à forte salinité. GRIFFITHS (1965) n'avait pu le démontrer non plus dans son étude sur le front du Cap San Lucas (Californie) bien qu'il remarquât l'enrichissement de certains taxons et l'appauvrissement d'autres. La figure 15 rend compte de ce déséquilibre des stations frontales par rapport aux stations nord et sud de la zone orientale : enrichissement significatif en Ostracodes,

importance accrue des Thaliacés et *Leucifer* par rapport à l'ensemble.

Ce déséquilibre pourrait être la conséquence :

— d'une mortalité élevée de certains groupes taxonomiques (Copépodes en particulier) du fait d'une prédation importante, ou des variations brutales du milieu. Dans cette hypothèse, l'enrichissement serait masqué par une forte mortalité.

— d'une compétition entre herbivores, les Thaliacés l'emportant sur les Crustacés herbivores qui subissent une forte prédation.

De toute façon, s'il y a enrichissement par eutrophisation, les répercussions sur le zooplancton ne sont pas immédiates. Nous n'avons d'ailleurs pas trouvé de corrélations significatives entre les concentrations des différents groupes taxonomiques ou les volumes sédimentés et les valeurs de biomasses phytoplanctoniques. Ce résultat peut d'ailleurs tout aussi bien signifier que l'on a affaire à des populations stables, à indice de diversité élevé.

Comme on le voit, l'hypothèse de l'enrichissement éventuel de la zone frontale mérite une étude plus poussée :

- de la productivité primaire
- de la production zooplanctonique, en particulier de la fraction récoltée au filet de maille 100-200 microns qui n'a pas fait l'objet de prélèvements lors de la campagne 7103
- des biomasses micronectoniques
- de l'indice de diversité spécifique. On sait qu'il augmente dans les zones de convergence.

*Manuscrit reçu au S.C.D. le 6 février 1973.*

## BIBLIOGRAPHIE

- BERRIT (G. R.), 1964. — Résultats d'Observations. Campagnes 12 et 13 de l'OMBANGO. *Cah. Océanogr.* XIV (1) : 151-155.
- BINET (D.) (1970). — Aperçu sur les variations saisonnières du zooplancton et plus particulièrement des Copépodes du plateau continental de Pointe Noire (Congo). — Doc. Sc. Centre O.R.S.T.O.M. Pointe Noire, Nouvelle série n° 8, 109 p.
- BINET (D.), DESSIER (A.), POINSARD (F.) & REBERT (J. P.), 1967. — OM 32. Campagne ANNOBON V. Rapport de Campagne. — Doc. n° 387. Centre O.R.S.T.O.M. Pointe Noire. 32 p.
- CROMWELL (T.) & REID (J. L.), 1956. — A study of Oceanic Fronts. — *TELLUS*, 8 (1) : 94-101.
- FRASER (J. H.), 1962. — The role of Ctenophores and Salps in Zooplankton production and standing crop. — *R.P.V. Réunion. Cons. Perm. Int. Explor. Mer*, 153 : 121-124.
- GALLARDO (Y.), 1972. — Caractères hydrologiques des régions frontales d'Angola, du Gabon et du Congo favorables aux concentrations d'albacore. — (sous presse). — Centre O.R.S.T.O.M. Pointe Noire.
- GRIFFITHS (R. C.), 1965. — A study of oceanic fronts off Cape San Lucas, Lower California. U. S. Fish and Wildlife Serv. Sc. Rep. n° 499.

- LE FLOCH (J.), 1970. — Sur quelques Observations de fluctuations de température et de vitesse de courant associées à des ondes internes à courte période ou à la turbulence. — *Cah. Océanogr.*, n° 7 : 687-699.
- LE GUEN (J. C.), POINSARD (F.), TROADEC (J. P.), 1965. — La pêche de l'albacore dans la zone orientale de l'Atlantique intertropical. Étude préliminaire. Doc. n° 263. Centre O.R.S.T.O.M. Pointe-Noire.
- LE GUEN (J. C.) & POINSARD (F.), 1966. — La pêche de l'albacore dans le sud du golfe de Guinée. — Résultats de la campagne 1965. Doc. n° 331. Centre O.R.S.T.O.M. Pointe-Noire.
- LONGHURST (A. R.), 1967. — Diversity and trophic structure of zooplankton communities in the California current. *Deep Sea Res.*, 14 : 393-408.
- LORENZEN (C. I.), 1967. — Determination of Chlorophyll and Phaeopigments. Spectrophotometric equations. *Limnol. & Oceanogr.* 12 (2) : 343-346.
- MENZEL (D. W.) & CORWIN (N.), 1965. — The measurement of total phosphorus in sea water based on the liberation of organically bound fractions by persulfate oxidation. *Limnol. & Oceanogr.*, 10 : 280-283.
- MONTGOMERY (R. B.), 1939. — Ein Versuch, den vertikalen und seitlichen Austausch in der Tiefe der Sprungschicht in äquatorialen Atlantischen Ozean zu bestimmen. *Ann. Hydrog. Marit. Meteorol.*, 67, p. 242.
- POINSARD (F.), 1967. — La pêche du yellowfin dans le sud du golfe de Guinée. Résultats de la campagne 1966. Doc. n° 375. Centre O.R.S.T.O.M. Pointe-Noire, 29 p.
- STRICKLAND (J. D. H.) & PARSONS (T. R.), 1968. — A practical handbook of sea water-analysis. *Fish. Res. Board of Canada*. Bulletin 167, 311 p.