

Chapitre 2

OCÉANOGRAPHIE PHYSIQUE

Yves GALLARDO (1)

RÉSUMÉ

Dans le cadre de ce document pluridisciplinaire sur l'océanographie du plateau continental congolais, le présent chapitre fait largement appel aux résultats de la météorologie et de la climatologie tropicales. Des discontinuités dans l'espace et de très amples fluctuations saisonnières et pluriannuelles caractérisent cette région frontale du Congo, soumise aux effets de cinq masses d'air, dont les principales viennent de l'Océan Indien, du sud de l'Afrique et de l'anticyclone de Sainte-Hélène.

Schématiquement, les mouvements de la zone intertropicale de convergence des alizés des deux hémisphères apparaissent comme la cause essentielle de la variabilité océanique équatoriale elle aussi très importante. La façade maritime congolaise et plus particulièrement la région de Pointe-Noire présentent des caractères frontaux, c'est-à-dire à fort gradient, et tourbillonnaires très accusés : très forte variabilité interannuelle des pluies et des températures de surface, records des précipitations journalières. Ces particularités propres aux régions côtières du golfe de Guinée sont en outre accentuées par la proximité de l'estuaire du fleuve Congo, deuxième fleuve du monde par son débit, introduisant des gradients élevés de température et surtout de salinité dans l'océan. Dans l'état actuel des connaissances, il semble difficile sinon vain de classer les eaux de surface en plusieurs catégories qui ne reflètent pas fidèlement les rythmes saisonniers d'une année à l'autre. Par contre, la description de la dynamique des eaux de subsurface et plus particulièrement de l'évolution saisonnière de la couche de discontinuité, du « maximum de salinité », des températures sur différents fonds et du cisaillement vertical dû aux courants souvent opposés en surface et en subsurface s'avère plus fructueuse. On observe par exemple que le découpage saisonnier, grande saison chaude, grande saison froide, petite saison chaude, petite saison froide est corroboré par les variations d'intensité du « maximum de salinité » en subsurface mais qu'il existe un « creux thermique » quasi-permanent sur le plateau continental. La transition rapide vers la saison froide est régulièrement marquée en mai-juin par un « maximum de salinité » (maximum voisin de $35,9 \text{ ‰}_{100}$) de forte épaisseur, accompagné d'un maximum de vitesses (horizontale et verticale) et suivi d'un minimum d'oxygène dissous. Pour l'étude des courants, il a été adopté un découpage de l'année en cinq parties, car outre les quatre saisons définies précédemment la période de transition mai-juin est remarquable par ses vitesses maximums et son « manque de géostrophie » dû probablement à l'importance des termes d'accélération, de vitesse verticale et de frottement. Les remontées d'eaux froides donnant lieu aux saisons froides correspondent à une augmentation de la circulation Sud de subsurface sur le plateau et au contraire à une accélération des courants NW au niveau du talus. Un paragraphe est consacré aux structures tourbillonnaires cycloniques caractérisant l'installation rapide de la saison froide et leur concomitance avec les grands « maximums de salinité » et les « doigts ou langues de densité » est soulignée. Les conditions atmosphériques rencontrées en mai-juin et en octobre-novembre semblent décisives pour les caractéristiques des saisons froides et saisons chaudes suivantes.

Enfin, la variabilité au wharf de Pointe-Noire montre le rôle essentiel des eaux estuariennes du Congo dans la dynamique des eaux de surface côtières.

(1) Océanographe physicien de l'O.R.S.T.O.M.

ABSTRACT

In the frame of this pluridisciplinary document describing the oceanography of the congolese marine shelf, the present chapter uses tropical meteorological and climatological results. Spatial discontinuities and very great seasonal and interannual fluctuations characterize that frontal region of Congo, which is influenced by five air-mass, the principal arising from Indian Ocean, South-Africa and Santa-Helena anticyclone.

Schematically, motions of the intertropical convergence area between the trades of both hemispheres are the essential factor of the equatorial oceanic variability which is very important too. The congolese coastal region and especially the « Pointe-Noire » area present marked frontal and vertical features: very strong pluri-annual rainy and thermal (sea-surface) variability, maxima of daily precipitations. Moreover, those peculiar properties of coastal regions of Guinea Gulf are stressed by the proximity of the second world estuary (with respect to its flow) advecting high temperature and especially salinity gradients in the ocean. At the present stage of knowledge, it seems difficult unless vain to classify the surface waters in several categories which do not reflect the seasonal year to year rythms faithfully. However, descriptions of the dynamics driving the subsurface waters and more peculiarly of the seasonal changes affecting the discontinuity layer, the « maximum salinity » layer, temperatures on different bottoms, the vertical shear arising from opposite surface and subsurface currents are revealed more fructuous. For example, we observe that the seasonal partition, great warm season, great cold season, small warm season, small cold season, is corroborated by seasonal changes in the value of the « salinity maximum » (subsurface) but that a quasi-permanent « thermal hollow » exists above the continental shelf. The rapid transition to the Cold season is punctually marked with a maximum of « salinity maximum » (about 35.9 ‰) in may-june; that maximum is very thick, matched to a maximum of velocities (horizontal and vertical) and followed by a minimum of dissolved oxygen. In order to study the currents, we have singled out five parts in the year, the complementary part arising from the may-june transition period which is remarkable by its highest velocities and its « non geostrophy » caused by the importance of accelerations, vertical velocity and friction terms. Upwelled waters give rise to cold seasons which correspond to an increasing southward (poleward) shelf circulation and, at the contrary, to an acceleration of NW (equatorward) current at the shelf-edge. A paragraph is devoted to the eddy-like structures (cyclonic) which characterize the onset of the cold season and their simultaneity with the highest « salinity maximums » and « the fingers and tongues of density » is stressed. Atmospheric conditions encountered in may-june and in october-november seem to determine the characters of next cold and warm seasons. At last, the variability studied at the Pointe-Noire wharf shows essential effects of Congo estuarine waters upon the dynamics of coastal surface waters.

Introduction

Bien que depuis une vingtaine d'années des observations océanographiques soient régulièrement effectuées sur le plateau continental congolais, aucune synthèse descriptive de son environnement n'a encore été rédigée jusqu'ici. Les principaux travaux réalisés à ce jour ont porté sur l'analyse des données de surface (Berrit, 1961-62) ou côtières (Berrit, 1962; Merle, 1972) et ont consisté à définir l'hydroclimat congolais et ses variations saisonnières : c'est ainsi qu'à partir de l'étude de diagrammes T-S (température salinité) Berrit a pu donner une classification des catégories d'eaux de part et d'autre des frontières $T = 24^\circ$, $S = 35 \text{ ‰}$ (g/kg), classification reprise ultérieurement avec des modifications plus ou moins profondes (Gallardo et Leguen, 1972 ; Wauthy, 1977).

Ce manque de synthèse descriptive n'est pas rare dans le domaine de l'océanographie physique, où la fréquence et la durée des observations matériellement réalisables sont loin de couvrir le spectre énergétique de l'océan.

Entre les moyens expérimentaux à la mer et

l'ensemble des fluctuations spatiotemporelles auxquelles sont soumises les eaux océaniques, surtout au voisinage des côtes, il existe toujours une disproportion importante : un des objectifs essentiels de l'océanographie physique consistera à mettre en relief des conditions hydrologiques éloignées de « l'équilibre » (situations d'anomalie) après avoir défini cet état par la moyenne des conditions observées durant plusieurs années.

La production de l'océan, et de façon plus générale les caractéristiques des écosystèmes, sont liées en grande partie à :

— des fluctuations de température et de salinité allant de l'échelle du jour à celle de l'année et elles-mêmes tributaires des fluctuations météorologiques et climatiques,

— des phénomènes thermodynamiques et mécaniques affectant l'épaisseur de la couche de mélange de surface par des mouvements verticaux (diffusion turbulente et upwelling),

— certaines structures à caractère frontal définies par des gradients de densité élevés,

— des courants dans la couche de surface et leur gradient vertical (cisaillement) dans la couche de discontinuité (thermocline) (1),

— des teneurs en oxygène dissous et en sels nutritifs contrôlées par le mouvement et le mélange vertical au sein des eaux océaniques et aussi par des apports fluviatiles fertilisants.

Pour étudier ces facteurs physico-chimiques jugés essentiels dans le cadre écologique des espèces exploitables du plateau continental congolais, nous avons choisi comme échelle spatiale d'observation des relevés sur les fonds de 20 m, 30 m, 50 m, 100 m et 500 m, c'est-à-dire avec un espacement maximum d'une vingtaine de kilomètres seulement. Par ce fait, des campagnes d'hydrologie et de courantométrie appelées carrés dynamiques, ont mis en évidence, avec le même espacement, des structures dynamiques permettant une interprétation, à notre avis cohérente, des perturbations apportées par les eaux de l'estuaire du Congo, à la faveur de certaines conditions de courants.

Bien que des observations hydrologiques aient eu lieu à des immersions de plusieurs centaines de mètres, nous décrirons essentiellement les cinquante premiers mètres de la couche océanique, c'est-à-dire la couche homogène et la thermocline.

1. Météorologie

1.1. SITUATION GÉNÉRALE : FRONTS, ZONES FRONTALES ET MASSES D'AIR

Dans l'ensemble du Golfe de Guinée, et *a fortiori* dans la région congolaise située au sud du Golfe, des alizés austraux déviés à la côte dans le sens des aiguilles d'une montre prédominent toute l'année. En hiver austral (fig. 1) un front de mousson sépare l'air atlantique humide et stable de la masse d'air indien humide et instable ; une partie de l'air atlantique qui se déplace vers le nord-est rencontre l'air sec saharien et devient instable dans cette zone intertropicale de convergence située vers 15-20° N de latitude au mois d'août. Le front de mousson reste situé au milieu de l'Afrique et se raccorde vers 10° S au front intertropical sud séparant les alizés de sud-est de la mousson de sud-ouest : c'est la saison sèche au Congo de juin à septembre.

En été austral (fig. 2), le front de la zone intertropicale de convergence et le front de mousson se raccordent à la frontière du Cameroun et du Gabon en suivant assez fidèlement les côtes du Golfe de Guinée ; au-dessus des eaux très chaudes du golfe, à l'est, l'air atlantique est humide et instable et une

saison des pluies s'installe alors au Congo de la mi-janvier à la mi-mai.

Comme le fait bien remarquer Samba-Kimbata (1978), « l'anti-cyclone de l'Océan Indien a un rôle décisif sur le climat du Bas-Congo. Ce rôle tient à son caractère quasi-permanent, à la forte épaisseur de la couche atmosphérique qu'il contrôle, et surtout à son courant d'est équatorial ». C'est ce courant d'est qui provoque les pluies les plus abondantes sur le Bas-Congo.

La position du F.I.T. (Front Inter-Tropical) en latitude et son orientation dépendent essentiellement de la répartition saisonnière des centres d'action régionaux et notamment du dynamisme de l'anti-cyclone de Sainte-Hélène.

Samba-Kimbata distingue cinq masses d'air principales au-dessus du Bas-Congo :

1) L'Air équatorial élaboré à partir d'air tropical maritime atlantique des basses couches et d'air tropical maritime indien des couches moyennes et supérieures.

2) L'Air tropical maritime atlantique issu de l'anticyclone de Sainte-Hélène.

3) L'Air indien qui arrive sur le Congo après un long parcours continental et surmonte l'air atlantique d'été avec fort développement de cumulus et cumulo-nimbus.

4) L'Air saharien très chaud, sec et stable qui, en janvier-février, lors des extensions maximales de l'anticyclone égypto-libyen, joue un rôle d'inhibiteur pluviométrique.

5) L'Air sud-africain, formé entre les latitudes 20° et 30° Sud soufflant du sud-est et puissant facteur d'inhibition pluviométrique lié à la dorsale de l'anti-cyclone sud-africain.

« Le climat du Congo dépend en grande partie de facteurs aérologiques lointains ».

1.2. CARACTÈRES CLIMATIQUES DE LA STATION CÔTIÈRE DE POINTE-NOIRE

Des vents de secteur S à SW, aux vitesses très modérées (2 à 4 m/s) soufflent régulièrement toute l'année sur les côtes du Congo orientées NW-SE. Dans les températures de l'air à Pointe-Noire se dégage une évolution saisonnière (fig. 3) avec un minimum de 21° en juillet-août et un maximum de 27° en mars-avril. Le ciel est généralement couvert, ce que confirment les estimations de nébulosité voisines de 6 octas et aussi la relative faiblesse de l'insolation exprimée en heures : 60 heures seulement en août-septembre et un maximum de 180 heures en

(1) Thermocline : couche à abaissement rapide de température.

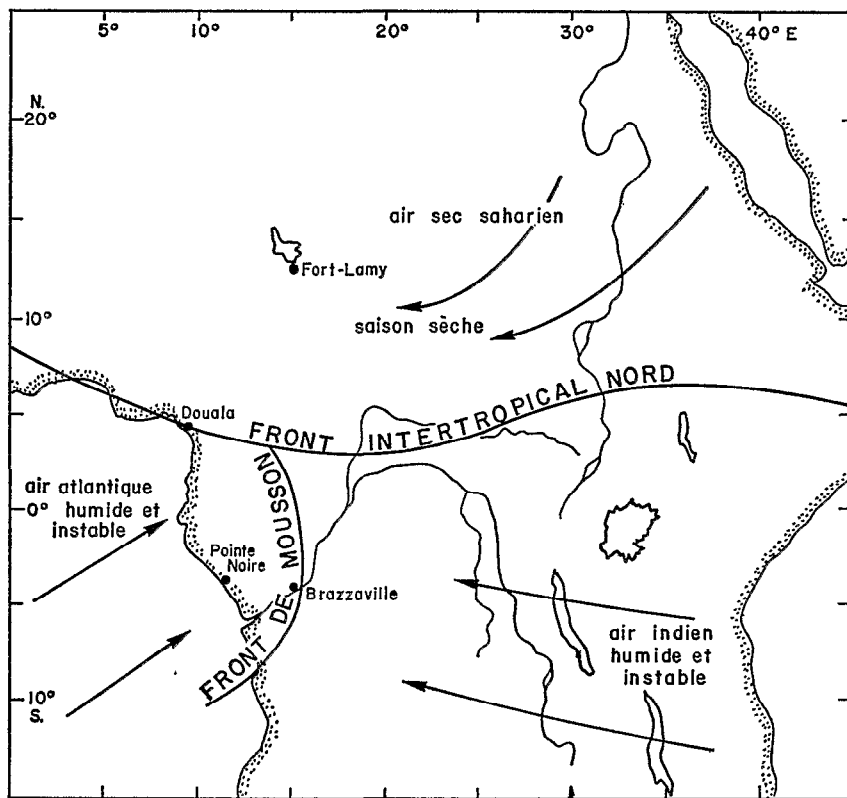


Fig. 1. — Situation des masses d'air et des fronts sur l'Afrique Centrale en hiver austral. Extrait A.S.E.C.N.A., 1964.

Position of air-mass and fronts above central Africa during southern winter. After A.S.E.C.N.A., 1964.

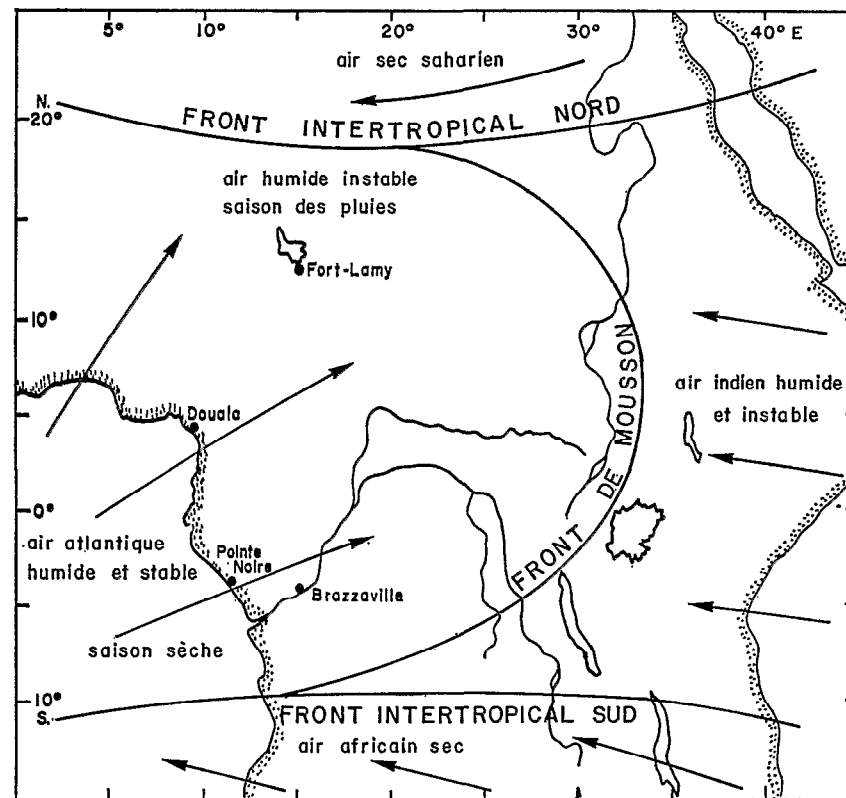


Fig. 2. — Situation des masses d'air et des fronts sur l'Afrique Centrale en été austral. Extrait de l'A.S.E.C.N.A., 1964.

Position of air-mass and fronts above central Africa during southern summer. After A.S.E.C.N.A., 1964.

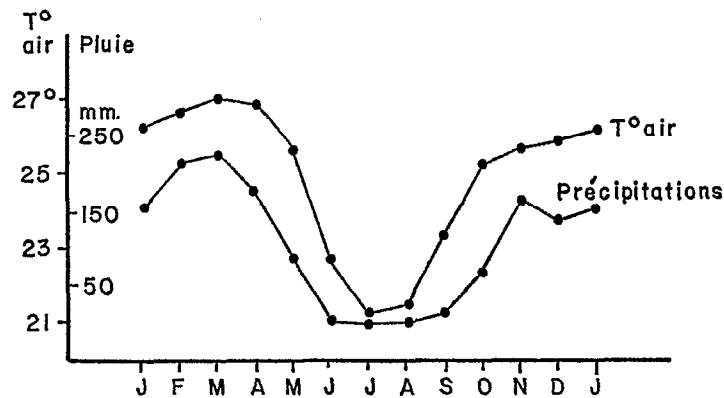


Fig. 3. — Évolution des températures de l'air et des précipitations à la station météo de Pointe-Noire. Moyenne 1951-60 d'après A.S.E.C.N.A.

Evolution of air temperatures and rainfalls at the meteorological station of Pointe-Noire. Average 1951-60 from A.S.E.C.N.A.

avril et décembre, ce qui signifie que deux semaines de beau temps ensoleillé consécutives sont très rares sur les côtes du Congo. Les pressions atmosphériques étant elles-mêmes quasi-constantes d'un bout à l'autre de l'année, ce sont finalement les précipitations qui caractérisent le mieux les saisons de ce pays, éloigné seulement de quelques centaines de kilomètres de l'équateur ; schématiquement il apparaît à Pointe-Noire une saison sèche de la mi-mai à la mi-octobre et une saison des pluies totalisant 120 cm de précipitations le reste de l'année. L'humidité

relative, élevée toute l'année, décroît de 95 % au lever du soleil à 70 % en début d'après-midi.

1.2.1. Les grandes fluctuations des pluies à Pointe-Noire

La pluviométrie est plus abondante à l'intérieur du pays, où se maintient une forêt dense, que sur la façade maritime. Le littoral se distingue par l'irrégularité et la violence de ses pluies : c'est Pointe-Noire qui détient le record absolu des précipitations sur

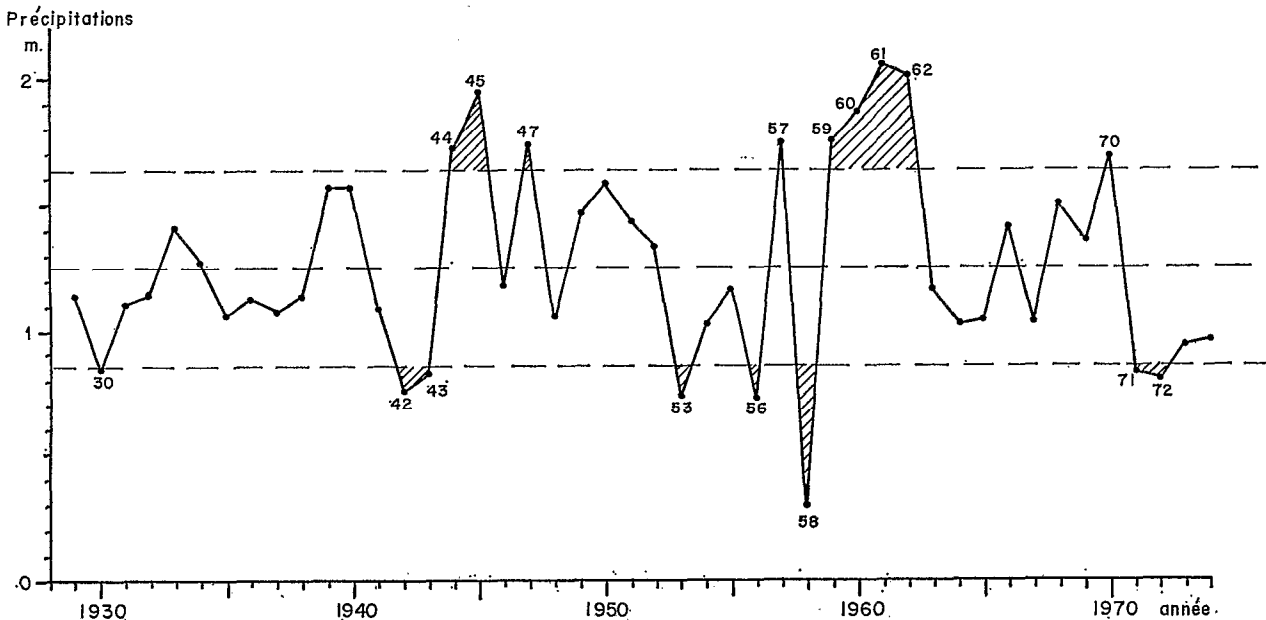


Fig. 4. — Fluctuations pluriannuelles des précipitations à Pointe-Noire.

Fluctuations of the interannual rainfalls at Pointe-Noire.

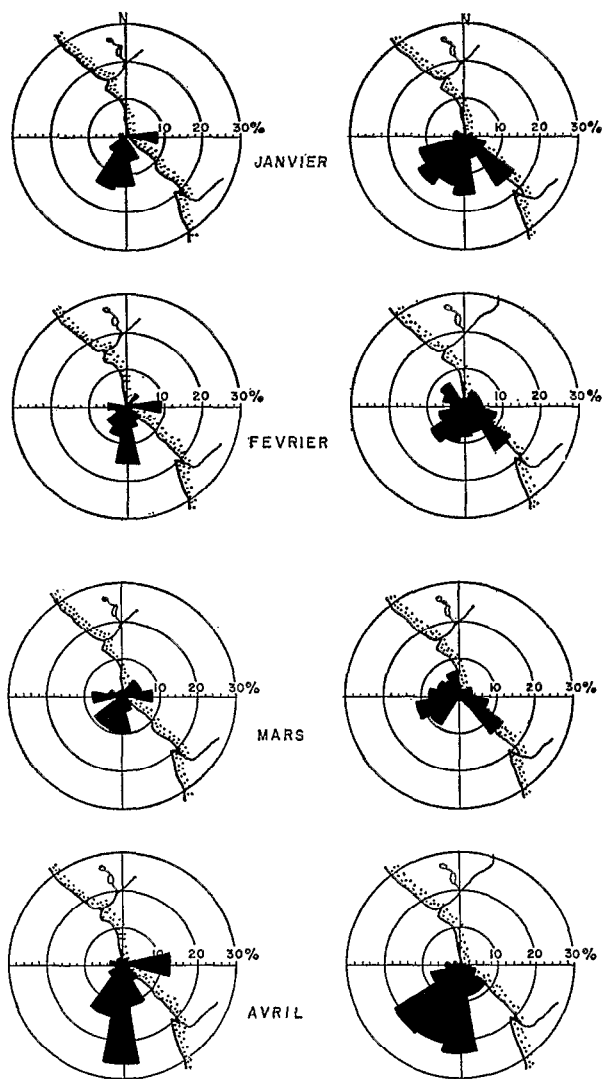


Fig. 5. — Évolution des vents au sol au port et à l'aéroport de Pointe-Noire en saison des pluies. Année 1967.

Evolution of surface winds at the harbour and the air-port of Pointe-Noire during the rainy season. Year 1967.

24 h avec 240 mm le 27 mars 1959. Entre 1953 et 1968, nous avons relevé 17 cas avec plus de 100 mm en 24 h, dont 2 cas aux mois de janvier et février, 5 cas en mars et avril, 1 cas en mai, octobre et novembre ; dans la pratique, il ne se passe pas de saison des pluies sur le littoral qui ne connaisse au moins une journée de déluge. Au contraire, l'intérieur du pays quoique plus arrosé l'est de façon beaucoup moins irrégulière. Corrélativement à la violence des pluies littorales, il ne pleut qu'un jour sur deux au cœur de la saison humide à Pointe-Noire ; les heures de soleil y sont bien plus nombreuses qu'en saison

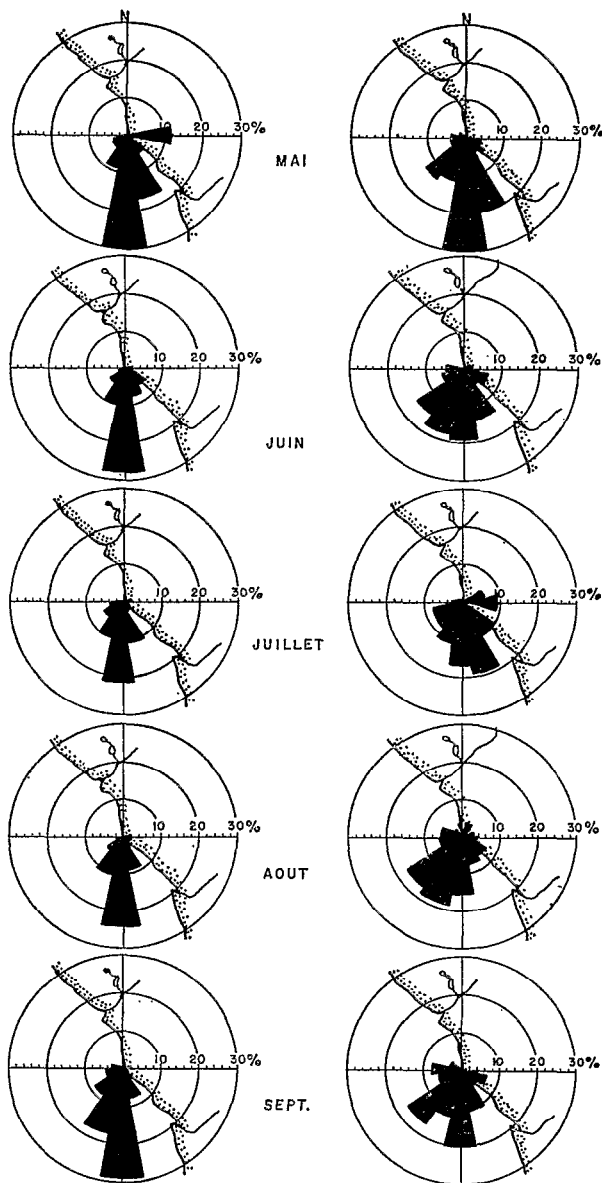


Fig. 6. — Évolution des vents au sol au port et à l'aéroport de Pointe-Noire en saison sèche.

Evolution of surface winds at the harbour and the air-port of Pointe-Noire during the dry season.

sèche du fait que les masses nuageuses sont rapidement transformées en précipitations.

Un résultat d'importance caractérisant la façade maritime congolaise est aussi « une irrégularité inter-annuelle très marquée, comme il ne s'en produit nulle part ailleurs au Congo »... (Vennetier, 1968). L'examen de la courbe des précipitations annuelles de 1929 à 1974 (fig. 4) révèle les larges limites à

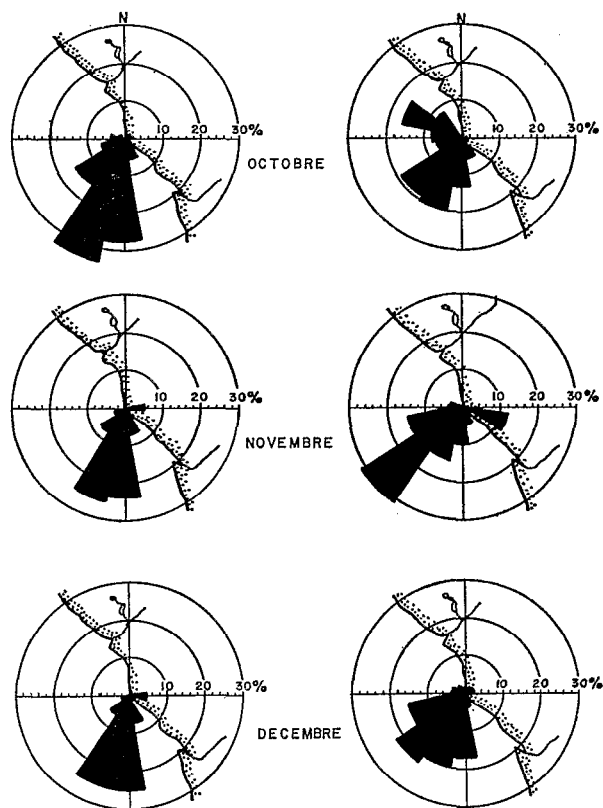


Fig. 7. — Évolution des vents au sol au port et à l'aéroport de Pointe-Noire en période de transition.

Evolution of surface winds at the harbour and the air-port of Pointe-Noire during the transient period.

l'intérieur desquelles évoluent les précipitations à Pointe-Noire : 30 cm en 1958, seulement, et plus de 2 m, trois ans après, en 1961. Pour une moyenne de 125 cm et un écart-type de 38 cm, cette série temporelle de 45 années contient 8 années avec moins de 86 cm (1930, 42, 43, 53, 56, 58, 71, 72) et 9 années avec plus de 163 cm (1944, 45, 47, 57, 59, 60, 61, 62, 70). Il y a alternance de séquences stables à précipitations normales et de séquences très variables, ces dernières étant bien définies par les intervalles 1942-47, 1956-62 et 1970-72.

Les dates d'installation des saisons des pluies constituent une donnée essentielle en biologie marine et en agriculture. Les années à pluviosité précoce ne coïncident pas toujours avec les plus pluvieuses : 1930, 35, 44, 45, 46, 49, 54, 55, 60, 61, 62, 70, 71 ; il arrive même qu'elles correspondent à des années peu arrosées comme en 1930 et en 1971. Cette dernière remarque suggère le degré de complexité des phénomènes — interactions, mécanismes de rétroaction — contrôlant les fluctuations inter-

annuelles au sud du golfe de Guinée. Quant aux années à saison des pluies tardive, aussi nombreuses que les précédentes, elles ne coïncident pas parfaitement avec les années « sèches » : 1933, 36, 39, 40, 41, 42, 53, 56, 58, 64, 65. C'est qu'en dehors des conditions initiales imprimées par l'Anticyclone de Sainte-Hélène, dans l'Atlantique sud, sur la mousson, d'autres facteurs peuvent agir sur son évolution au cours de son trajet maritime, et en particulier les températures de surface. Des courants chauds peuvent augmenter le transfert de la vapeur d'eau puisée dans l'océan ; au contraire, des remontées d'eau froide à la côte contribuent à freiner ce processus en créant une stratification stable de la température de l'air au voisinage de la surface. Il serait donc essentiel de montrer les effets des fluctuations de températures de surface et des courants marins sur cette variabilité excessive des pluies le long des côtes du Congo.

1.2.2. Les vents au sol et en surface

Bien que très modérés tout au long de l'année, les vents par leurs rotations saisonnières, leur divergence et leur tourbillon statistique se présentent souvent comme des indicateurs sensibles des fluctuations hydroclimatiques. En premier lieu, des discontinuités importantes du vent ont été observées chaque année entre la côte et quelques kilomètres à l'intérieur

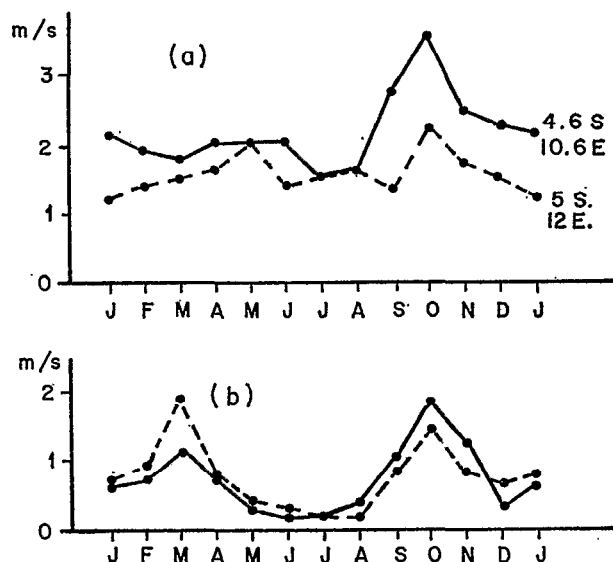


Fig. 8. — Évolution des composantes moyennes du vent à la côte (---) et au large (-). a) composante sud-nord ; b) composante ouest-est.

Evolution of averaged components of the wind at the coast (---) and offshore (-), a) south-north component ; b) west-east component.

(fig. 5 à 7) sur une aire quasi-plane ! Elles apparaissent de façon significative en saison des pluies, résultat logique, puisqu'une structure tourbillonnaire des vents va de pair avec des mouvements verticaux et une augmentation de la turbulence atmosphérique. D'une façon générale, lorsque les vents sont du SSW à la côte, leur secteur dominant est S, à la station météo de « l'Aviation » à l'intérieur des terres. Du mois d'octobre au mois de mai les vents tournent du secteur SSW au secteur SSE, ces derniers apparaissent très concomitants à une réduction des précipitations. Enfin, l'évolution annuelle des composantes méridiennes du vent (fig. 8) prises sous forme de moyennes mensuelles à la côte et à une distance de 100 nautiques en mer, montre des différences importantes de septembre à mars ; des discontinuités spatiales du champ de vents apparaissent par conséquent en mer de façon statistique à moyenne échelle (100-200 km) et particulièrement aux mois de septembre et d'octobre pour lesquels le pourcentage d'accalmies à la côte est effectivement le moins élevé (5 à 20 %).

1.3. CONCLUSION

La façade maritime congolaise présente des aspects très caractéristiques dans l'évolution spatio-temporelle des précipitations et des vents. En particulier, les grandes fluctuations interannuelles souvent observées suggèrent qu'elle est située aux confins de structures tourbillonnaires, probablement d'échelles petite et moyenne dont la position varie sensiblement d'une année à l'autre. C'est en *octobre* que les vents sont les plus intenses et les calmes les plus rares ; de plus une étude statistique (1) des distributions des pluies mensuelles a montré que seules celles du mois d'octobre ne s'accordent pas à l'hypothèse d'une distribution quasi-normale. Les influences des masses d'air indien instable des couches supérieures et d'air austral des couches inférieures seront déterminantes pour l'océanographie du plateau congolais par le biais des courants de dérive, de la circulation thermohaline et des mouvements verticaux.

2. Hydrologie

2.1. MASSES D'EAUX, CATÉGORIES D'EAUX, COURANTS DE SURFACE : GÉNÉRALITÉS

Dans l'océan intertropical, les océanographes distinguent deux masses d'eau principales au niveau de la couche de surface :

— des eaux tropicales à température comprise

entre 18° et 25° et à salinité relativement élevée, puisque ces eaux se forment dans des régions à faibles précipitations et à fortes évaporations,

— des eaux équatoriales plus chaudes et moins salées que les premières pour les raisons opposées : précipitations importantes, évaporation minime.

Aussi, dans la bande équatoriale, en se plaçant loin des côtes pour éviter l'influence d'effets fluviaux trop marqués, rencontre-t-on le long de la verticale, au fur et à mesure que les densités augmentent, trois couches d'eau superposées :

— les eaux équatoriales dans les 30 à 50 premiers mètres,

— la couche du maximum de salinité d'origine tropicale, généralement peu épaisse,

— l'eau centrale sud-atlantique bien caractérisée par le segment de droite joignant les points (17°-35,70 ‰) et (6°-34,50 ‰) sur les diagrammes Température-Salinité (fig. 9). La limite inférieure de cette masse d'eau se situe à environ 600 m de profondeur.

Au fond du golfe de Guinée, en baie de Biafra, de nombreux fleuves et cours d'eau contribuent à la diminution des salinités de surface : des atlas comme celui du « Deutsches Hydrographische Institut » indiquent, pour la période juin-août, que l'isohaline 34 ‰ joint le sud du Congo à l'ouest du Nigéria en passant dans les parages de l'île Annobon à plus de 200 nautiques de la côte gabonaise, pouvant délimiter schématiquement une zone « dessalée » de 500 000 km² environ.

Étant donné ces conditions particulières, Berrit (1958) a proposé la classification suivante mettant en évidence quatre catégories d'eaux de surface entrant dans chacun des quatre quadrants formés par l'intersection des droites $S = 35 ‰$ et $T = 24°$ sur le diagramme TS de la figure 10. Avec cette classification les eaux issues de l'estuaire du Congo, à une centaine de kilomètres au sud de Pointe-Noire, sont assimilées aux deux quadrants de gauche. D'autre part, si l'on conçoit assez bien la formation d'eaux froides dessalées en saison marine froide au niveau du canyon sous-marin, dénommé fosse du Congo, par l'action conjuguée des remontées d'eau profonde et d'une turbulence importante, l'apparition des eaux benguéléennes dans cette partie du golfe est à notre avis moins évidente : le courant du Benguélé décolle de la côte d'Afrique, très au sud, vers 17° S avec une direction NW dans la couche des dix premiers mètres et seule une branche côtière de ce courant, quasi-permanente, est en mesure de prouver la présence d'eaux benguéléennes froides et

(1) « Analyse statistique des pluies de Pointe-Noire », *Service technique régional de la Météorologie en Afrique Centrale* (l'année n'est pas indiquée).

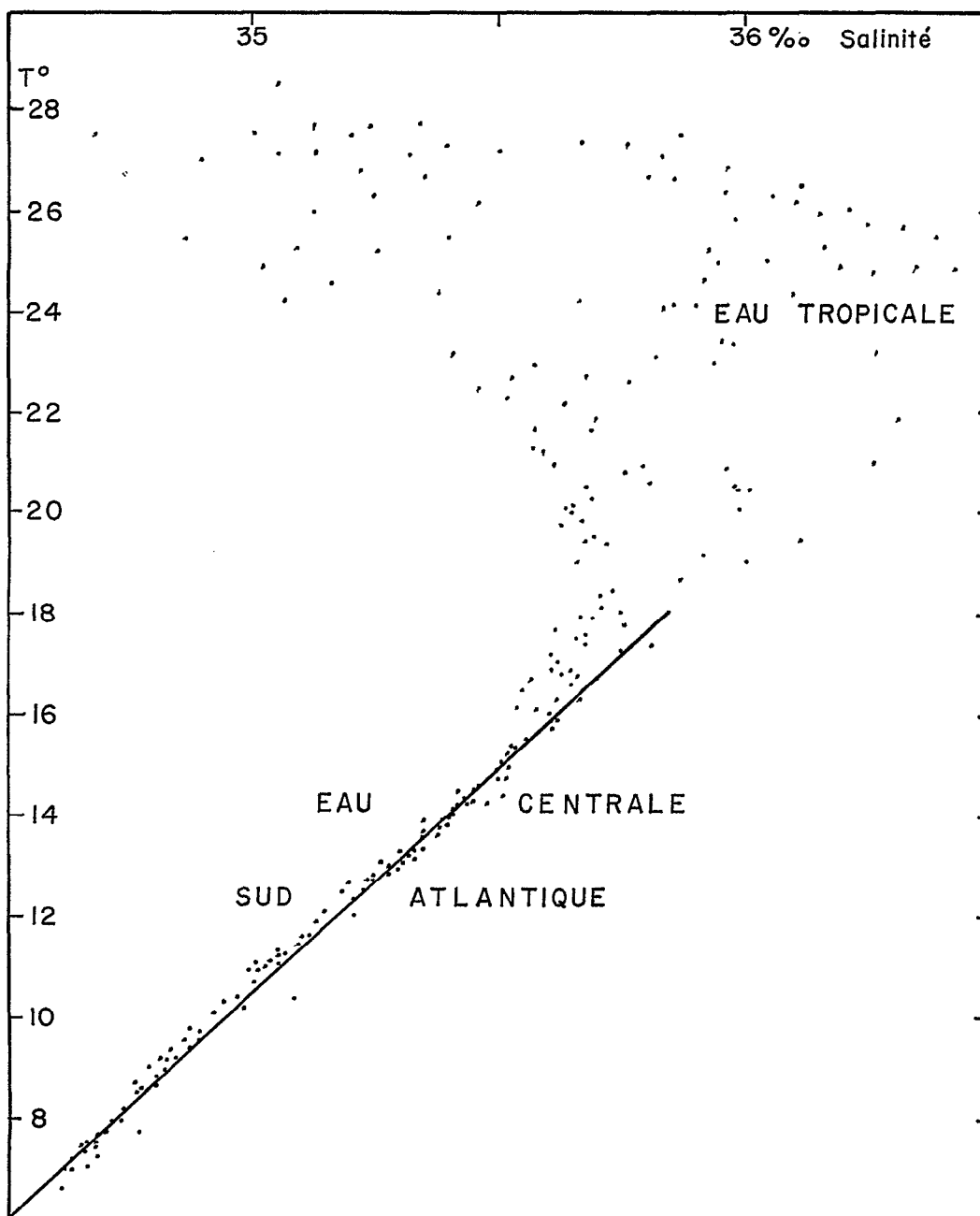


Fig. 9. — Diagramme cumulatif T-S entre 9°S et 15°S de latitude. Février-avril 1961.
T.S. cumulative diagram between latitudes 9°S and 15°S. February-April 1961.

relativement salées à l'est du golfe de Guinée. Par conséquent, il est difficile de caractériser les eaux de surface dans une région où les apports sont divers, variables et encore mal connus : d'après les cartes de courants usuelles, il semblerait que la période de février à avril soit la plus favorable à la quasi-permanence d'un courant côtier nord, du sud de l'Angola jusqu'au Gabon. Dans ces conditions, la quantité d'eaux benguéléennes entrant à l'est du golfe de Guinée devrait être corrélée à l'intensité de la divergence des courants qui les transportent et, d'une façon plus générale, à des mécanismes d'instabilité dynamique (1) très complexes et encore mal éclaircis, au niveau du branchement du courant de Benguélé vers 18° S.

Cependant, l'étude des tensions de vent et de leur rotationnel à l'est de l'Atlantique tropical sud (Gallardo, non publié) suggère que des appels d'eau importants puissent être déclenchés au Congo à partir de deux maximums : l'un au large du Gabon (front du Cap Lopez), l'autre au large du sud-Angola (front de Mossamedes). Pour cette raison il est difficile d'affirmer avec Wauthy (1977) que les eaux benguéléennes sont inexistantes sur le plateau congolais, cela d'autant plus que l'existence du dôme d'Angola (Gallardo et al., 1974), avec sa circulation orientée vers l'est en subsurface, paraît favorable à l'intrusion de ces eaux à la côte congolaise.

Globalement, les différentes catégories d'eaux de surface précitées peuvent servir à définir des saisons marines sur le plateau maritime congolais : une

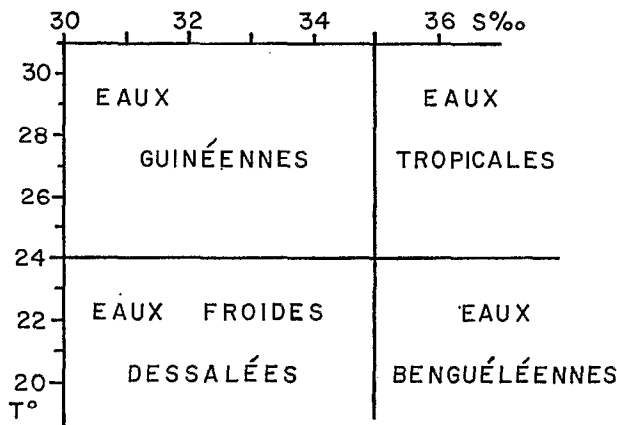


Fig. 10. — Classification des eaux superficielles du golfe de Guinée selon Berrit.

Berrit's classification of surface waters in the gulf of Guinea.

« grande saison chaude » (G.S.C.) s'installant entre la mi-janvier et la mi-mai (T supérieure à 26°, S inférieure à 35 ‰); ensuite une « grande saison froide » (G.S.F.) marquée par une brève apparition d'eaux très salées suivie d'un upwelling permanent ou quasi-permanent jusqu'à la mi-octobre (T inférieure à 24°, S supérieure à 35 ‰); enfin la succession d'une « petite saison chaude » (P.S.C.) et d'une « petite saison froide » (P.S.F.) se réduisant souvent à une simple période de transition du fait du caractère fugace de la « petite saison froide », apparaissant généralement entre le 15 décembre et le 15 janvier.

2.2. LES EAUX DE LA COUCHE DE « DISCONTINUITÉ » (PYCNOCLINE) ET LES MAXIMUMS DE SALINITÉ

La couche de discontinuité (fig. 11) s'étend immédiatement en dessous de la couche homogène de surface, quand celle-ci existe (saison marine chaude) sinon elle intercepte la surface généralement au cours de la saison marine froide. Cette couche de discontinuité est presque toujours définie par une chute rapide de la température avec la profondeur, d'au moins 0,1 degré par m, d'où l'appellation courante de thermocline; cependant il est des cas où les couches de discontinuité sont plutôt le résultat de différences de salinité comme en saison froide où les eaux tropicales salées viennent au contact des eaux équatoriales dessalées à proximité de l'équateur géographique : il y a alors formation en surface de fronts thermohalins fugaces (front du cap Lopez au Gabon). Un maximum de salinité accompagne la thermocline; les limites inférieure et supérieure de ce maximum correspondent dans la pratique à l'isohaline 35,5 ‰. Nous verrons, dans l'étude de la « radiale hydrologique » (2) de Pointe-Noire, qu'il apparaît fréquemment sur la verticale un second maximum de salinité probablement en relation avec l'existence de gradients horizontaux marqués de la salinité. Par ailleurs la grande diversité des maximums de salinité rencontrée sur une même radiale est un indice de l'hétérogénéité et de la variabilité des courants dans cette région. Sur une radiale longue de 200 nautiques à partir de Pointe-Noire les maximums de salinité observés au cours d'une année (1967) ont varié entre 35,6 et 26,0 ‰; les profondeurs des maximums sont très dispersées allant du voisinage de la surface, vers 10 m, jusqu'à 100 m. Quant à l'épaisseur de la couche isotherme, c'est-à-dire l'immersion du sommet de la thermocline, elle varie entre 0 et 50 m tandis que le point bas peut dépasser l'immersion 100 m.

(1) Les phénomènes d'instabilité dynamique sont étudiés de façon intensive ces dernières années et une théorie y afférent pourrait éclaircir de nombreux problèmes d'océanographie physique et biologique dans un proche avenir.

(2) Radiale hydrologique : trajet perpendiculaire à la côte.

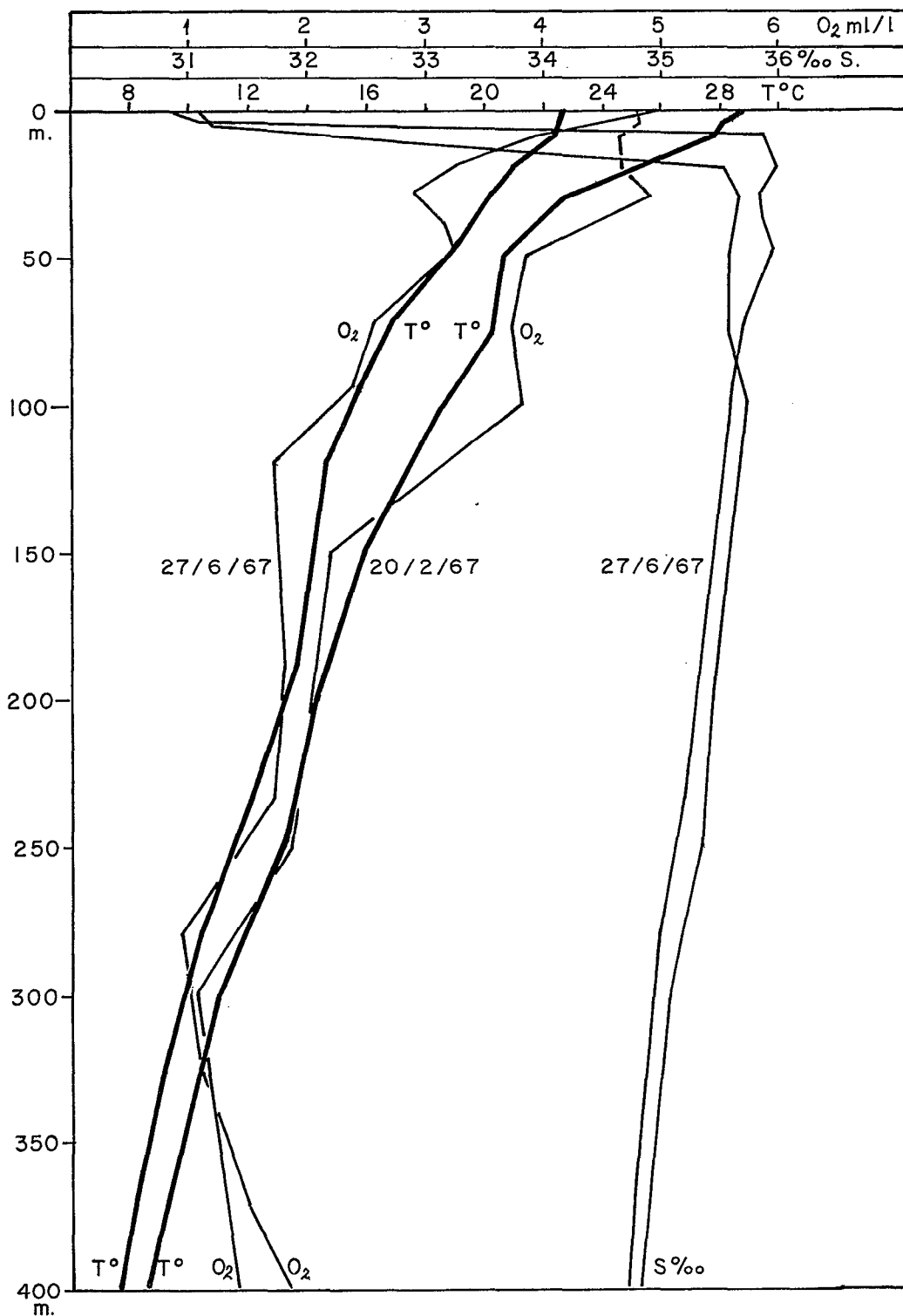


Fig. 11. — Exemples de distributions verticales des températures, salinités et oxygènes dissous en saison chaude (trait gras) et en saison froide (trait fin). Thermoclines, haloclines et oxyclines.

Examples of vertical profiles of temperatures, salinities and dissolved oxygen during the hot season (thick lines) and cold season (small lines). Discontinuities of temperature, salinity and oxygen.

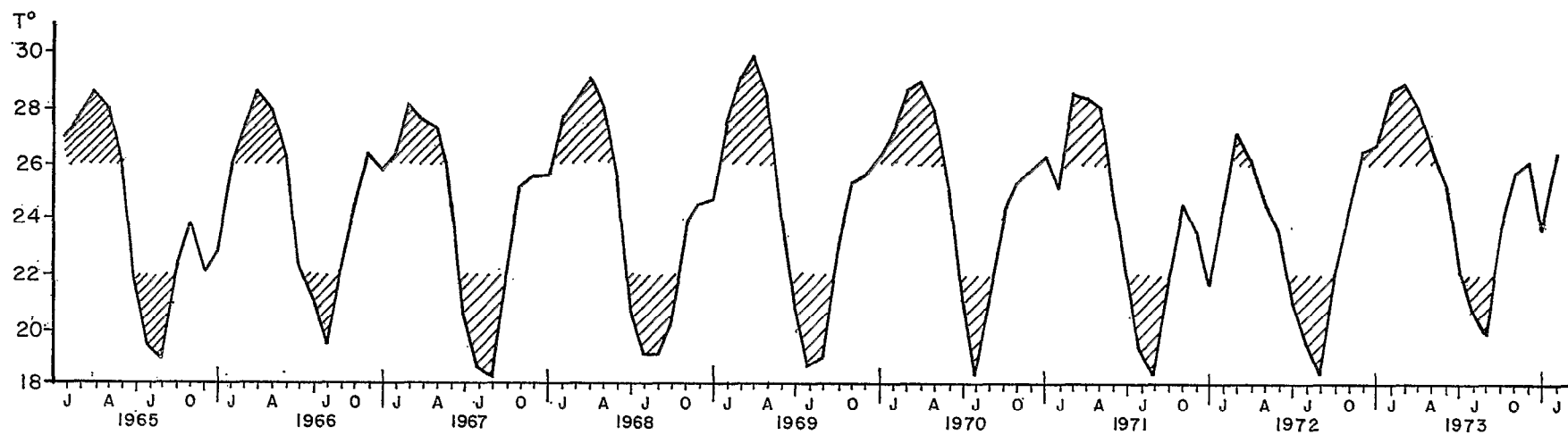


Fig. 12. — Évolutions annuelles des températures de surface de 1965 à 1973. Les régions hachurées correspondent aux saisons bien établies délimitées par T plus grand que 26° et T inférieur à 22° .

Yearly evolutions of surface temperatures from 1965 to 1973. The hatched areas correspond to well installed seasons which are delimited with T greater than 26 and T smaller than 22 .

En productivité primaire, la thermocline joue un rôle essentiel parce qu'elle se situe dans le domaine de la couche euphotique (cf. *infra*, chap. 3, phyto-plancton), mais aussi parce qu'elle fait écran aux flux verticaux d'éléments nutritifs profonds tout en favorisant une production dite de régénération dans la couche supérieure. En règle générale, la thermocline est plus marquée au large qu'à la côte où les termes de frottement latéraux et verticaux croissent très rapidement. Les valeurs moyennes du gradient thermique vertical sont de 0,3 à 0,4 degré par mètre mais il n'est pas rare d'observer sur les bathythermogrammes des couches à deux ou plusieurs thermoclines atteignant un degré par mètre et séparées par des « strates » d'eau quasi-isothermes. Guillerm (1975) décrit en détail cet « éclatement » de la thermocline vers la côte, probablement lié aux ondes de plateau dont nous reparlerons plus loin.

Sur la figure sont représentées des distributions verticales en saison chaude et en saison froide, pour les températures, les salinités et les oxygènes dissous, en des points légèrement en dehors du plateau continental sur la « radiale longue » de Pointe-Noire. Les remarques suivantes en découlent :

— une thermocline existe encore en saison froide avec une variation thermique en profondeur (gradient vertical thermique) d'environ 0,1 degré par mètre,

— la couche quasi-isohaline du maximum de salinité coïncide bien avec cette thermocline de même que la couche quasi-isotherme des dix premiers mètres est aussi celle où augmente très rapidement la salinité (la halocline),

— les oxygènes dissous montrent une distribution verticale assez semblable à celle des températures ; de plus les singularités des oxygènes et des salinités, c'est-à-dire les maximums et les minimums, sont souvent concomitantes suggérant l'existence d'une liaison forte entre les anomalies d'oxygène dissous et les particularités de la circulation dans cette région.

Ainsi un examen de la « thermocline » révèle sa structure *multiforme* probablement en liaison avec une stratification en plusieurs couches de la circulation et de la diffusion. Cette conception d'un océan subdivisé en plusieurs feuillets de circulation généralement bien isolés se confirmera dans les descriptions de la circulation et de la variabilité.

2.3. LES SAISONS MARINES VUES A TRAVERS L'HYDROLOGIE CÔTIÈRE ; CRITÈRES DE TRANSITIONS SAISONNIÈRES

D'après l'étude des caractères climatiques à la station de Pointe-Noire les précipitations et les températures de l'air (fig. 3) montrent l'existence de deux saisons : l'une pluvieuse et chaude culminant

au mois de mars, l'autre sèche et relativement fraîche centrée sur la fin du mois de juillet. Quant aux vents statistiques en surface, ils présentent (fig. 8) un maximum significatif au mois d'octobre, leur composante zonale, c'est-à-dire ouest-est, devenant négligeable (inférieure à 1 m par seconde) d'avril à août et de décembre à février.

Les évolutions annuelles des températures de surface mensuelles à Pointe-Noire (fig. 12) montrent un maximum, vers le mois de mars, et un minimum en juillet-août. Sur la série des années 1965 à 1973, une température maximale de 29,9° a été observée sur plusieurs années différentes. Pour mieux faire apparaître le fait que les saisons marines chaudes et froides se succèdent régulièrement, les régions de la figure 12 correspondant aux températures supérieures à 26° et à celles inférieures à 22° ont été hachurées. Cette figure fait également apparaître l'importance très réduite de certaines saisons, les saisons froides 1966 et 1973 et surtout la saison chaude 1972. Or, en examinant la période 1971-72, nous remarquons une oscillation très nette des températures de septembre à janvier ; cette singularité qui apparaît encore assez nettement en 1965 et 1973 est inexistante de 1967 à 1969 et en 1972. A cause de cette oscillation ont été introduites dans la classification saisonnière de Berriat la petite saison chaude et la petite saison froide, d'octobre à janvier, qui trouvent en fait leur justification dans les évolutions des isothermes sub-superficielles (fig. 13 et 14), comme par exemple en 1967 où, bien qu'inexistante en surface, l'oscillation est bien développée en subsurface. Les croissances et décroissances rapides des températures de surface ont toujours lieu, respectivement en septembre-octobre et en mai-juin et seuls des courants marins peuvent provoquer d'aussi rapides variations thermiques.

Au plan de la dynamique océanique, le rôle de la salinité peut être essentiel dans les eaux côtières ; aussi avons-nous représenté les diagrammes Température-Salinité des périodes de transition décroissante d'avril à juin (fig. 15) et d'août à décembre (fig. 16). La figure 15 rend compte :

— des dessalures importantes en fin de saison chaude (31 à 34,5 ‰),

— du bon choix $T = 24^{\circ}$, $S = 35$ ‰ pour le critère de transition saisonnière vers la saison froide,

— d'une convergence du faisceau de courbes vers un pôle défini approximativement par $T = 20,5^{\circ}$ et $S = 35,75$ ‰.

Par contre, le passage (fig. 16) de la saison froide à la saison chaude est éloignée du point $T = 24^{\circ}$ $S = 35$ ‰ : une salinité de 34,5 ‰ conviendrait mieux pour délimiter l'apparition de la petite saison chaude sans que ce soit une règle absolue, à cause des années 1965 et 1968. Finalement, il nous paraît

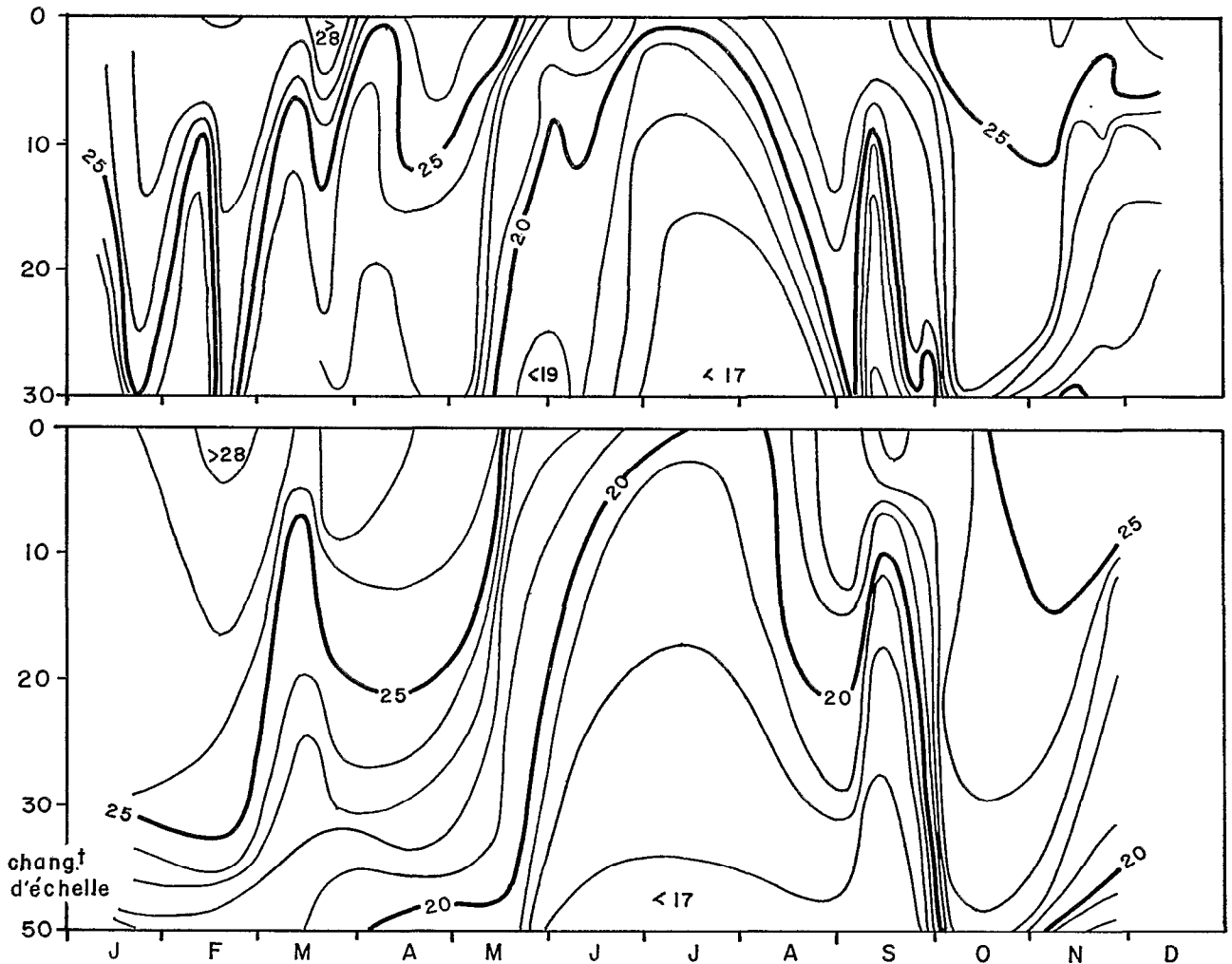


Fig. 13. — Évolution des températures sur les fonds de 30 m en 1967.
Evolution of temperatures above the 30 m isobath during 1967.

Fig. 14. — Évolution des températures sur les fonds de 50 m en 1967.
Evolution of temperatures above the 50 m isobath, during 1967.

raisonnable de considérer deux cas lors de la transition saison froide - saison chaude :

1^{er} cas : le plus fréquent, la petite saison froide n'existe pas en surface ; les conditions moyennes de température sont supérieures à 25° , celles de salinité sont inférieures à $34,5 \text{ ‰}$;

2^e cas : cas plus rare, où la transition vers la saison chaude contient une petite saison froide, les températures sont inférieures à 25° et les salinités sont supérieures à $34,5 \text{ ‰}$ en surface.

2.4. SCHÉMAS STATISTIQUES D'ÉVOLUTIONS SAISONNIÈRES SUR LE PLATEAU CONTINENTAL CONGOLAIS

Les régions marines du Gabon à l'Angola présentent des anomalies négatives de température de surface qui peuvent être reliées à des variations du niveau moyen de la surface de la mer et de la circulation tridimensionnelle. En décrivant les évolutions saisonnières statistiques sur le plateau congolais large d'une cinquantaine de milles, nous avons voulu contrôler que les saisons s'y installent d'une façon

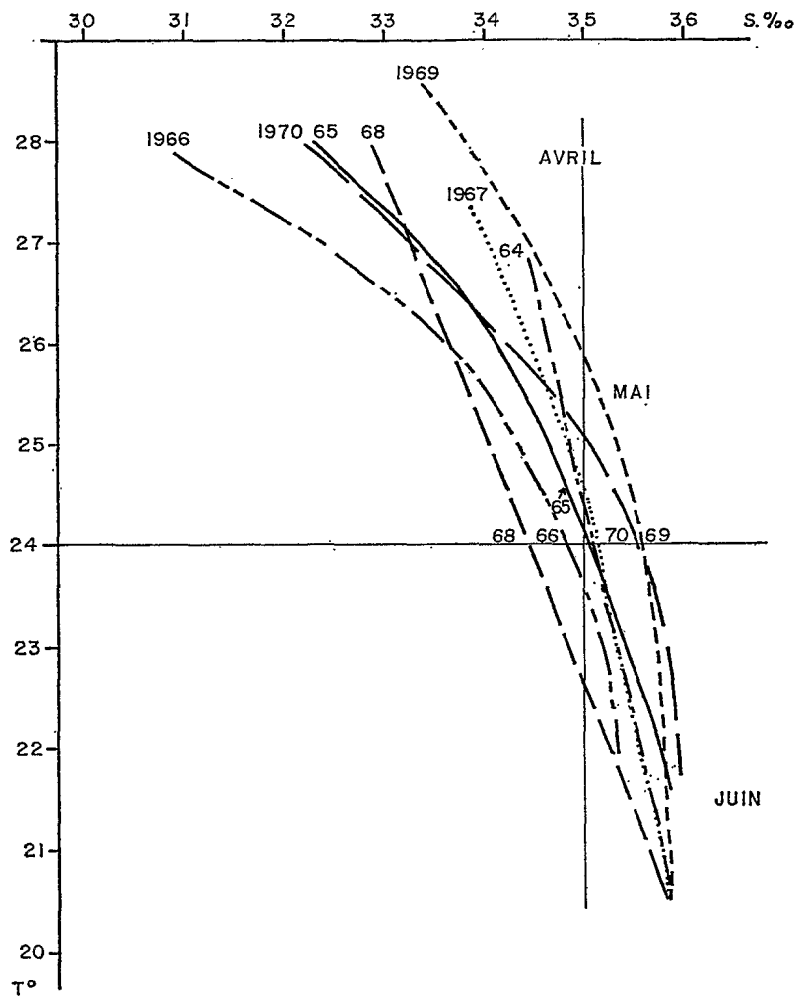


Fig. 15. — Les conditions $T = 24^{\circ}$, $S = 35 \text{ ‰}$ et l'apparition des saisons marines froides de 1964 à 1970 à la station côtière de Pointe-Noire.

$T = 24^{\circ}$, $S = 35 \text{ ‰}$ and the beginning of cold marine seasons from 1964 to 1970 at the coastal station of Pointe-Noire.

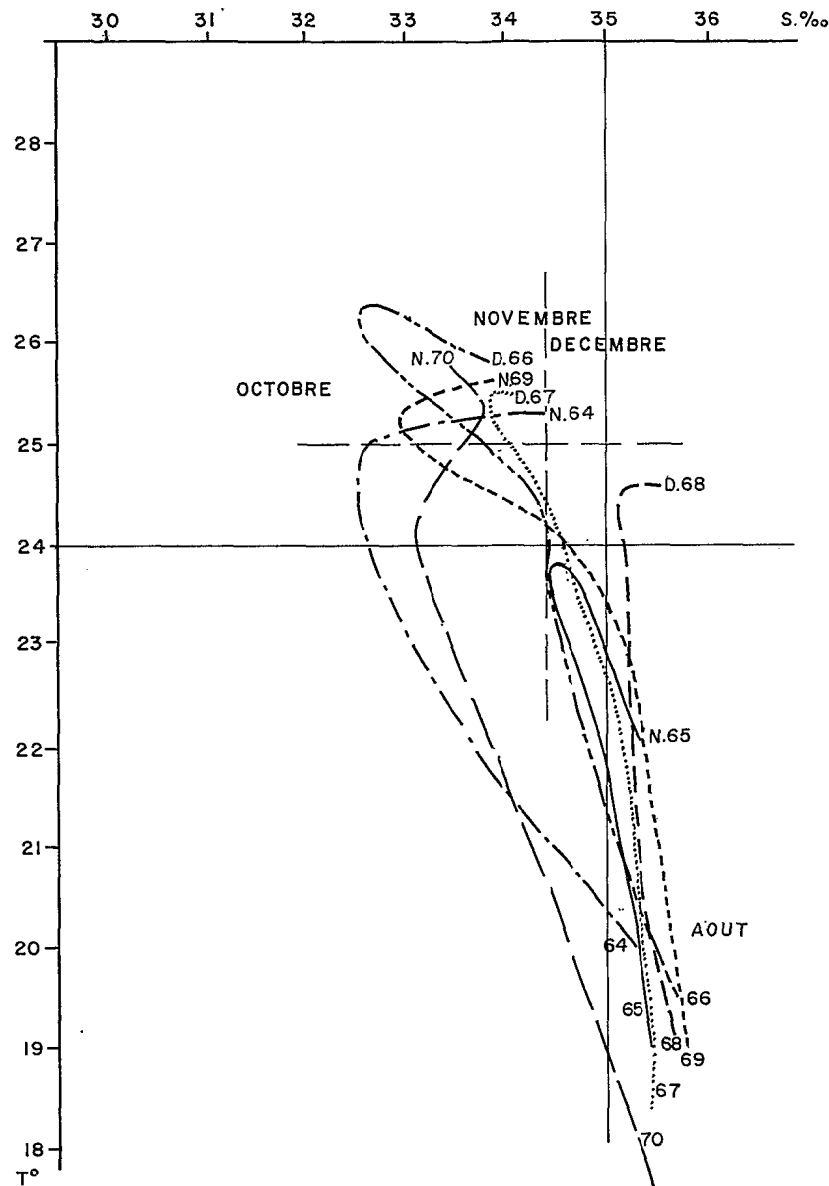


Fig. 16. — Les conditions $T = 24^{\circ}$, $S = 35 \text{ ‰}$ et l'apparition des saisons marines chaudes de 1964 à 1970 à la station côtière de Pointe-Noire.

$T = 24^{\circ}$, $S = 35 \text{ ‰}$ and the beginning of hot marine seasons from 1964 to 1970 at the coastal station of Pointe-Noire.

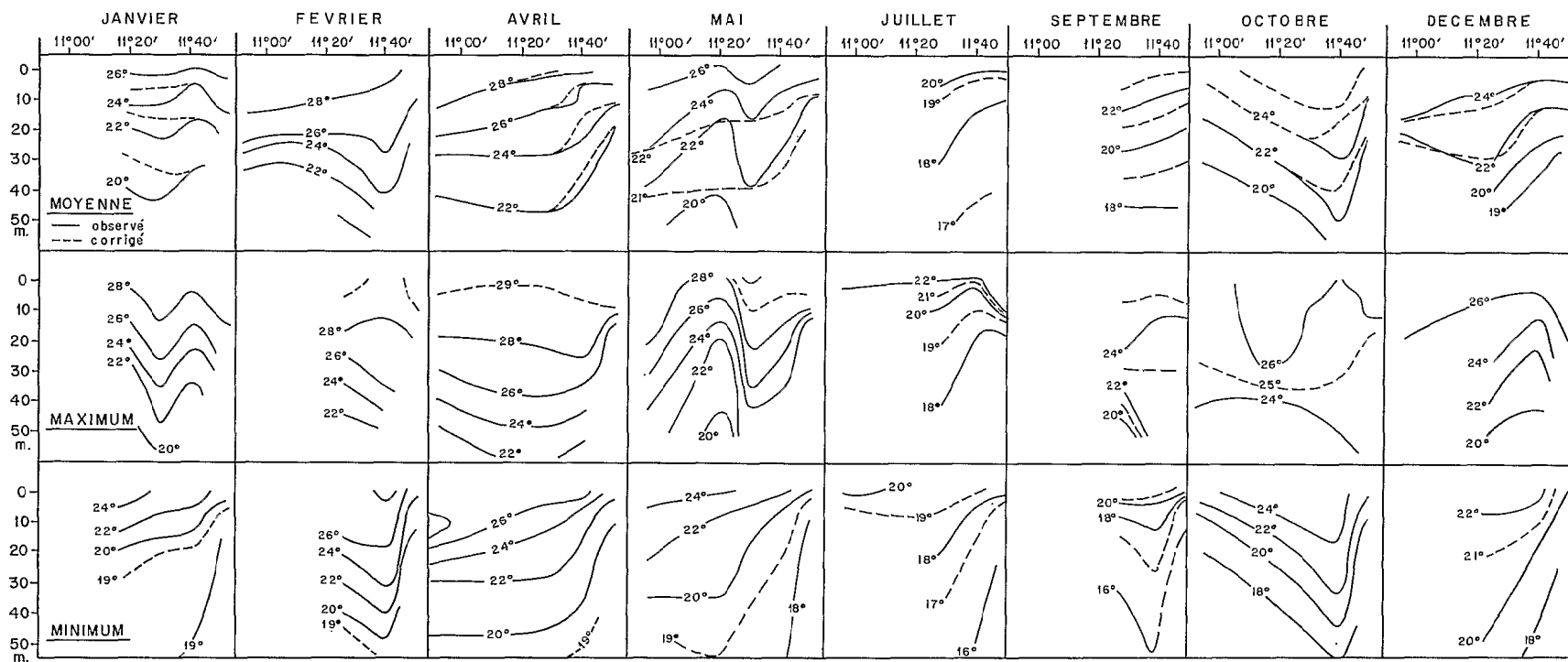


Fig. 17. — Coupes de températures mensuelles statistiques sur la « radiale » de Pointe-Noire (Situations moyennes, maximums et minimums).

Profiles of statistical monthly temperatures above the « radiale de Pointe-Noire » mean, maximum and minimum conditions.

tout à fait concomitante et semblable à celle de la zone strictement côtière ; autrement dit que les saisons marines sont le produit de variations dans la circulation océanique à grande échelle (dans lesquelles il faut inclure des ondes de plateau génératrices d'instabilités dynamiques).

Les coupes de températures (fig. 17) le long de trajets perpendiculaires à la côte indiquent, en conditions thermiques moyennes sur plusieurs années, des remontées d'eaux profondes côtières, surtout pendant les mois de saison chaude. D'autre part, les températures de surface relativement élevées et l'allure semblable des coupes permettent de considérer le mois de mai comme la fin de la saison chaude.

La comparaison des coupes en conditions thermiques moyennes, maximums et minimums (fig. 17) appelle quelques remarques :

— analogie des coupes thermiques en situation moyenne et minimum, les structures doivent être identiques et différer seulement par l'intensité des gradients et des courants qui les accompagnent,

— il existe un creux thermique quasi-permanent sur le plateau continental,

— les mois où les coupes (structures) sont les plus différentes sont ceux où les écarts thermiques sont les plus grands : quatre degrés en mai, septembre, décembre et janvier entre les situations minimum et maximum,

— aux mois d'avril, de juillet et d'octobre des structures semblables se retrouvent d'une année à l'autre : remontées d'eau froide à la côte en avril, vers les fonds de 50 m en juillet, mais creux thermique sur les fonds de 50 m en octobre suggérant une courbure anticyclonique (en sens inverse des aiguilles d'une montre) de la circulation horizontale,

— en fin de saison chaude (mai) il y a apparence d'un double méandre de la circulation sur le plateau continental : cyclonique vers le large, anticyclonique vers la côte.

Sur les coupes de salinité (fig. 18) les salinités minimums correspondent aux températures maximums (fig. 17) et inversement. L'évolution saisonnière des salinités de surface n'est pas nette. En moyenne, les salinités de subsurface, au niveau de leur maximum, passent par deux minimums en février-mars et octobre-novembre et par un maximum principal en mai-juin et un maximum secondaire en janvier. En résumé, les saisons chaudes sont signalées par des minimums de salinité à 50 m, tandis que des maximums de salinité annoncent les saisons froides ; les remarques suivantes se dégagent :

— des structures halines cohérentes aux « creux thermiques » apparaissent pour les conditions de salinité maximum,

— les coupes suggérant l'existence des doubles

méandres dans la circulation horizontale sont visibles lors des dessalures superficielles,

— il existe souvent une crête des isohalines vers les fonds de 100 m lorsque les dessalures sont très importantes en surface à la côte et vers le large ; ceci implique une divergence des courants provoquée par deux cellules à faible salinité dues aux apports du fleuve Congo.

2.5. SCHÉMA D'ÉVOLUTION « RÉELLE » SAISONNIÈRE SUR UNE RADIALE LONGUE ÉCHANTILLONNÉE EN 1967

L'intérêt de ce paragraphe est de :

— contrôler que l'évolution d'une situation réelle est cohérente avec celles données par les statistiques,

— décrire les conditions hydrologiques en dehors du plateau (océaniques) et jusqu'à 100 m de profondeur, ce que le faible nombre des données statistiques ne permettait pas de faire,

— présenter simultanément aux coupes des températures et des salinités celles des oxygènes dissous (fig. 19 à 21).

Les coupes thermiques et leur évolution annuelle sont globalement identiques à celles de la figure 17. Les eaux les plus chaudes sont rencontrées en février-mars (il n'y a pas de mesures en avril) avec 28° dans la couche de surface et 18° à un peu moins de 100 m. Le cœur de la saison froide ne figure pas mais il est probable que la couche de surface s'est refroidie à 20° et que l'isotherme 15° est apparue à la profondeur de 100 m. Les variations de profondeur des isothermes ont été les plus grandes entre la mi-mai et la fin juin : 50 m de remontée en moyenne pour l'isotherme 18°. Alors que les maximums de vitesse ascensionnelle apparaissent au-dessous de la thermocline vers 50-100 m, le début de la saison chaude est signalé par une « plongée » importante du sommet de la thermocline au-dessus des fonds de 100 m avec des eaux à salinité comprise entre 34 et 35 ‰. Quant à la transition rapide vers la saison froide, elle est toujours marquée par l'intrusion d'un maximum de salinité épais et voisin de 35,9 ‰. Les mois de mai et de novembre diffèrent largement par leurs salinités subsuperficielles : les salinités minimums de l'un sont les maximums de l'autre : 35,7 ‰.

L'examen chronologique des coupes des figures 19 à 21 tend à montrer qu'il existe en subsurface une évolution d'ensemble des caractéristiques hydrologiques très régulière avec un rythme annuel non seulement dans leurs immersions mais aussi dans leurs singularités (maximums et minimums) : maximums de salinité nouveaux en mai-juin, accompagnés d'un maximum de vitesse ascensionnelle et suivi de minimums d'oxygène dissous. L'hétérogénéité spatiale des teneurs en oxygène dissous à l'image de celle des salinités confirme l'existence de singularités

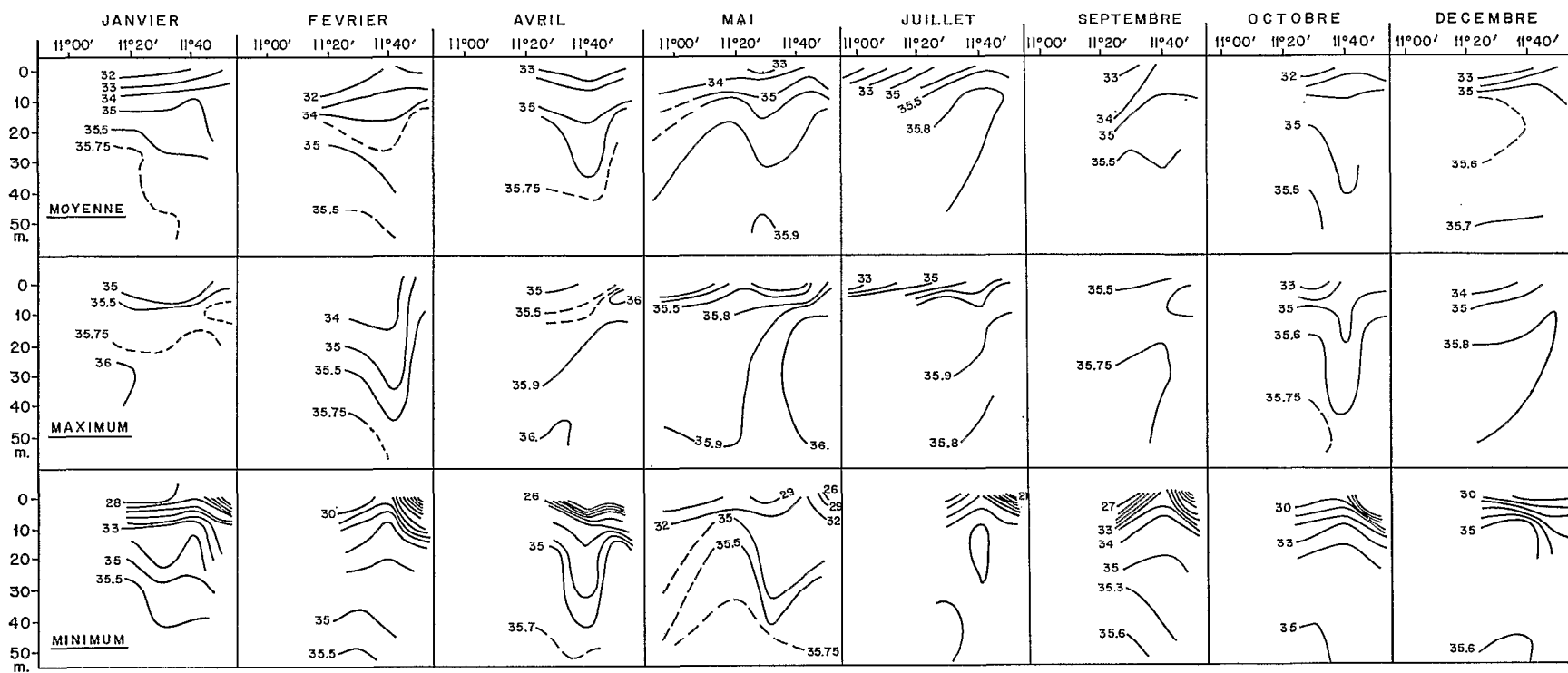
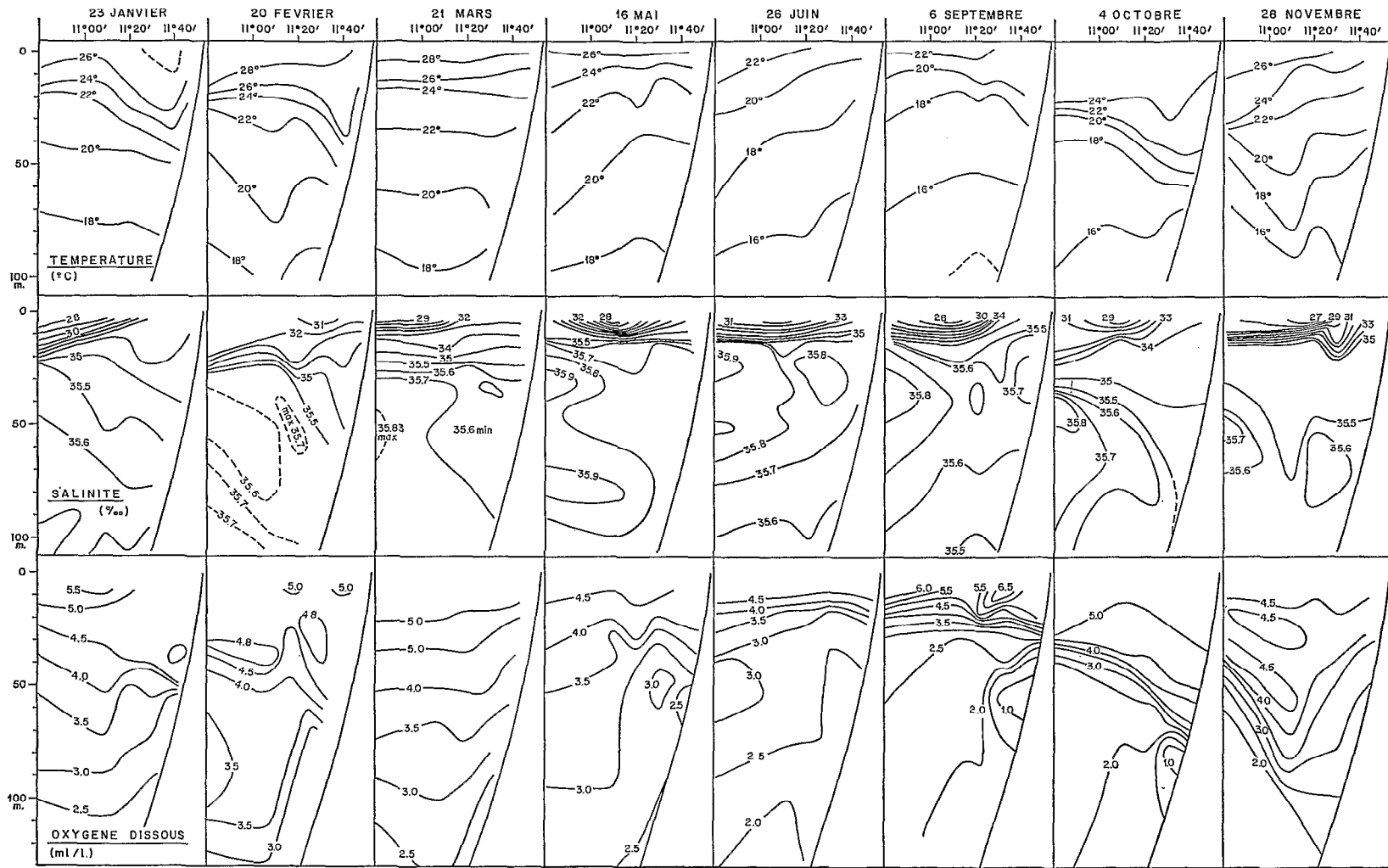


Fig. 18. — Coupes de salinités mensuelles statistiques sur la « radiale de Pointe-Noire » (situations moyennes, maximums et minimums).

Profiles of statistical monthly salinities above the « radiale de Pointe-Noire » (mean, maximum and minimum conditions).



Océanographie Physique

Fig. 19. — Coupes de températures sur la « radiale de Pointe-Noire » en 1967.
Profiles of temperatures above the « radiale de Pointe-Noire » in 1967.

Fig. 20. — Coupes de salinités sur la « radiale de Pointe-Noire » en 1967.
Profiles of salinities above the « radiale de Pointe-Noire » in 1967.

Fig. 21. — Coupes d'oxygènes dissous sur la « radiale de Pointe-Noire » en 1967.
Profiles of dissolved oxygen above the « radiale de Pointe-Noire » in 1967.

du champ des courants avec une convergence très accentuée lorsque les salinités de subsurface sont minimums, c'est-à-dire voisines de 35,6 ‰.

3. Étude des courants

3.1. COURANTS SUPERFICIELS ET COURANTS DANS LA COUCHE DE SURFACE

Les cartes de courants superficiels déduits en grande partie des observations des navigateurs indiquent que les régions maritimes du Congo et de l'Angola sont parcourues par des courants variables ; il faut s'éloigner à plus de 300 milles des côtes pour trouver la dérive NW quasi-permanente due aux alizés de SE, sauf pendant la saison chaude où un courant côtier continu circule du cap Frio (20° Sud) au cap Lopez (1° Sud) avec une vitesse de 0,5 nœud. Cependant il faut remarquer qu'au nord de l'embouchure du fleuve Congo, c'est-à-dire au niveau de la radiale de Pointe-Noire, au-delà des accores du plateau, règne une dérive rapide ouest à nord-ouest d'eaux légères qui « glissent » sur les eaux de subsurface. Dans la zone côtière, il est indispensable de faire la distinction :

— entre la couche superficielle des deux ou trois premiers mètres très dessalée et généralement animée d'un mouvement nord-ouest d'entraînement par le

débit du fleuve Congo (40 000 m³ par seconde en moyenne) et aussi par les vents dominants de secteur sud,

— et la couche homogène de surface sous-jacente se déplaçant aussi fréquemment vers le sud-ouest ou vers le sud que vers le nord-ouest.

Des observations simultanées des courants côtiers superficiels, mesurés à l'aide d'un courantomètre à électrodes remorquées (G.E.K.), et des courants de surface mesurés avec un courantomètre mécanique Ekman ont confirmé cette rotation des courants vers la gauche et leur ralentissement rapide avec la profondeur (dix à quinze degrés de déviation et une dizaine de centimètres par seconde sur quelques mètres verticaux). Ces constatations confirment la faible épaisseur de la couche de frottement du vent déjà suggérée par les faibles vitesses de vent et par la grande stabilité verticale des eaux (thermocline).

Afin de déterminer une éventuelle évolution saisonnière des courants de la couche de surface, des résultats de courantométrie effectuée de septembre 1967 à novembre 1969 sur les fonds de 50, 100 et 500 m de la radiale de Pointe-Noire ont été analysés de la façon suivante : l'année a été découpée en cinq périodes :

— décembre-janvier correspondant à la petite saison froide,

— février à avril correspondant à la saison chaude,

TABLEAU I

Évolution saisonnière des vitesses moyennes en surface, en centimètres par seconde, par secteurs de 45 degrés, sur les fonds de 50 et 100 mètres (le nombre d'observations figure en dessous de la vitesse)

TABLE I

Seasonal evolution of mean surface velocities (cm/s) in the 8 classes directions above 50 and 100 metre depths (number of observations noted below velocity)

| Secteurs Périodes | Secteurs | | | | | | | | Nombre d'observa- tions | Vitesse moyenne pondérée |
|----------------------|----------|----------|-----------|----------|---------|---------|---------|---------|-------------------------------|--------------------------------|
| | NW | W | SW | S | SE | E | NE | N | | |
| Déc.-janv... | 37 5 | 40 4 | 19 10 | 26 2 | 32 4 | — 0 | — 0 | — 0 | 25 | 28,6 |
| Fév.-avril... | 35 15 | 28 3 | 28 11W | 33 7 | 36 2 | 21 1 | 21 2 | 36 2 | 43 | 31,5 |
| Mai-juin.... | 42 5 | 27 3 | 28 1 | 7 2 | 41 1 | 36 4 | — 0 | 33 2 | 18 | 32,4 |
| Juil.-sept... | 34 32 | 22 18 | 10 6 | 27 11 | 23 9 | 15 3 | — 0 | 19 6 | 85 | 26,0 |
| Oct.-nov.... | 42 37 | 24 3 | — 0 | 18 2 | — 0 | — 0 | — 0 | 41 6 | 48 | 39,7 |

TABLEAU II

Évolution saisonnière des vitesses moyennes en surface en centimètres par seconde, par secteurs de 45 degrés, sur les fonds de 500 mètres (le nombre d'observations figure en dessous de la vitesse).

TABLE II

Seasonal evolution of mean surface velocities (cm/s) in the 8 classe directions above 500 metre depths (number of observations noted below velocity)

| Secteurs Périodes | Secteurs | | | | | | | | Nombre d'observa- tions | Vitesse moyenne pondérée |
|----------------------|----------|----------|----------|---------|---------|---------|---------|---------|-------------------------------|--------------------------------|
| | NW | W | SW | S | SE | E | NE | N | | |
| Déc.-janv... | 13 0 | 21 9 | 21 13 | 24 6 | — 0 | 56 1 | 5 1 | — 0 | 31 | 21,9 |
| Fév.-avril... | 38 12 | 37 4 | 20 1 | — 0 | 33 4 | 32 1 | — 0 | 43 2 | 24 | 36,4 |
| Mai-juin.... | 80 5 | 37 2 | — 0 | — 0 | — 0 | — 0 | — 0 | — 0 | 7 | (68) |
| Juil.-sept... | 30 16 | 33 13 | 21 5 | 30 7 | — 0 | 37 1 | 33 2 | 28 5 | 49 | 30,0 |
| Oct.-nov.... | 43 6 | 31 10 | 20 2 | 16 3 | 44 1 | 27 4 | — 0 | — 0 | 26 | 31,1 |

— mai-juin correspondant à la transition vers la saison froide,

— juillet à septembre correspondant à la saison froide,

— octobre-novembre correspondant à la petite saison chaude.

Les vitesses moyennes observées à l'immersion 4 m dans chacun des huit secteurs directionnels, avec les nombres d'observations y afférant, ont été réunies dans les tableaux produits, le tableau I concernant les fonds de 50 et 100 m, le tableau II ceux de 500 m sur la pente (talus) du plateau continental.

Les vitesses moyennes à l'immersion 4 m pondérées du nombre d'observations figurent dans la dernière colonne de chaque tableau : elles sont minimums en décembre-janvier et de juillet à septembre, c'est-à-dire pendant les saisons froides. La petite saison chaude est marquée par un maximum de vitesse et une concentration des courants au secteur NW, sur les fonds de 50-100 m. La grande saison chaude est caractérisée par une dispersion maximum des courants mais sans que leur vitesse moyenne en soit relativement diminuée. Enfin la transition vers la saison froide, en mai-juin, semble se traduire par des courants de surface très élevés dans le secteur NW, mais le nombre d'observations est insuffisant pour l'affirmer.

A partir de ces résultats statistiques, nous pouvons confirmer qu'il existe des variations saisonnières dans

la circulation de la couche de surface et avancer les hypothèses constructives suivantes :

— les remontées d'eaux froides donnant lieu à des saisons froides correspondent à une décélération très nette des courants dominants dans la couche de surface avec simultanément une fréquence d'apparition plus élevée des courants de secteurs S, SE et S, respectivement en grande et en petite saisons froides. Par conséquent, l'établissement des saisons froides doit être concomitant à un renforcement de la circulation en subsurface vers le sud.

— au contraire les accélérations observées en octobre-novembre et en mai-juin sont à rapprocher des variations dans les conditions météorologiques, en particulier dans la distribution des pressions atmosphériques et des vents de surface : celles-ci peuvent provoquer la formation rapide de zones frontales (gradients horizontaux de densité élevés) et par suite de courants géostrophiques élevés.

3.2. LES COURANTS GÉOSTROPHIQUES SUR LA RADIALE LONGUE (1967)

Le calcul des courants géostrophiques représente une méthode indirecte de mesure des courants. Lorsqu'un courant sans frottement s'écoule sans changer de vitesse et que la seule force externe est la pesanteur, il y a équilibre entre la force de Coriolis (force centrifuge due à la rotation terrestre) et la force du gradient de pression (hydrostatique). Le

vecteur courant horizontal est parallèle aux isobares avec les pressions les plus élevées sur sa gauche dans l'hémisphère sud. Pour obtenir des vitesses absolues, la surface de référence de mouvement nul a été choisie à l'immersion 500 m, où les courants réels peuvent être considérés comme négligeables.

Les résultats des calculs de courants indirects, au niveau du talus, ont montré une incohérence telle, qu'il a fallu admettre que les hypothèses nécessaires à leur calcul étaient loin d'être remplies ; les vitesses obtenues dans la couche de surface sont très élevées, souvent supérieures à 100 cm par seconde, et, assurément, les termes d'accélération, de frottements latéral et vertical ainsi que les mouvements verticaux contribuent largement à la dynamique des eaux du talus continental ; par conséquent, le fait de les négliger dans les hypothèses doit être la source des écarts avec les courants réels. Les radiales échantillonnées aux mois de mai et de novembre ont donné des valeurs particulièrement excessives dans le transport NW des cent premiers mètres. Doit-on toutefois retenir de ces résultats que l'apparition des saisons froides, c'est-à-dire des vitesses ascensionnelles importantes sont provoquées par des accélérations NW dans la couche de subsurface ? Cela n'est incompatible ni avec la théorie ni avec les vitesses statistiques dans la première colonne du tableau 2, sur les fonds de 500 m, non loin du talus.

3.3. COURANTS MESURÉS DANS LA COUCHE DE DISCONTINUITÉ

Les courants sous la couche de surface ont une direction prédominante SE avec une évolution saisonnière bien marquée dans leur vitesse et dans leur épaisseur. Les minimums de courants SE se rencontrent vraisemblablement de février à avril dans la couche de discontinuité des cent premiers mètres : là, ils alternent avec des courants de secteur N, NW généralement ; les maximums de vitesse sont de l'ordre de 30 cm/s seulement en cette saison. A plus grande profondeur, vers 150-200 m, réapparaissent des maximums de vitesse analogues et plus fréquents (S à SE).

A partir du mois de mai les vitesses maximums augmentent jusqu'à 50, 60 cm/s pour rediminuer au cours des mois de juillet et d'août vers la même limite inférieure des 30 cm/s. De septembre à novembre les transports SE prennent de plus en plus d'importance, les moyennes des vitesses maximums égalant 50 cm/s en septembre et plus de 60 cm/s en octobre. En octobre et novembre la couche des deux cents premiers mètres est souvent animée d'un mouvement d'ensemble SE supérieur à 40 cm/s. Enfin, en décembre-janvier, réapparaissent des maximums de vitesse dirigés vers le nord-ouest et l'ouest en dessous de 50 mètres de profondeur. La partie supérieure de la couche de discontinuité continue de se déplacer vers

le sud-est à une moyenne de 40 cm/s, au niveau des vitesses maximums vers 20-30 m de profondeur.

En résumé, les advections horizontales diminuent lors des saisons bien établies, c'est-à-dire aux extrêmes de températures, ce qui est logique, puisque la variation temporelle de la température en un point donné est minimum : il y a alternance de courants de secteurs opposés conduisant à une circulation résultante négligeable. La période de transition mai-juin vers la saison froide se trouve bien nommée puisque la circulation reprend de la vigueur ; par contre, la nature et l'ampleur des transports SE observés en octobre-novembre sont, à notre avis, mal répercutées par la très faible évolution des températures de surface côtières au dernier trimestre : cela peut être expliqué par un équilibre entre les flux de chaleur apportés par les courants horizontaux dans la couche homogène de surface et des pulsations d'eaux froides profondes remontées sur le plateau et trouvant des conditions de mélange favorables en cette période de l'année connue pour ses concentrations en thons.

3.4. STRUCTURES PHYSIQUES OBSERVÉES EN SAISON FROIDE ET EN DÉBUT DE SAISON CHAUDE

De juillet à octobre 1969, trois radiales d'hydrologie avec mesures de courants, répétées chaque mois, montrent l'impact des eaux dessalées de l'estuaire du Congo sur la dynamique du plateau continental. Les isopycnes de surface (fig. 22), c'est-à-dire les courbes d'égale densité, sont très denses au point de former une zone frontale. Leur allure évoque, par application de la méthode géostrophique laissant les eaux les moins denses sur la gauche dans le sens du courant, une composante W prépondérante dans les courants de surface. Sur les fonds de 150 m, la courbure cyclonique (sens des aiguilles d'une montre) de la circulation en juillet disparaît ensuite ; en effet, à partir de septembre la circulation devient anti-cyclonique en surface. En subsurface, vers 50 m (fig. 23), la circulation a une nette prédominance vers le sud ; un « doigt » de maximum de densité présent en saison froide disparaît vers le large en saison chaude. Des structures en « doigt » ou en « langue » semblables pourraient par conséquent caractériser la saison froide sur le plateau congolais. On remarque alors une concomitance entre l'importance de ces langues et l'intensité des maximums de salinité : 35,88 (en moyenne) en juillet, 35,75 en août, 35,77 en septembre et 35,74 en octobre. Il semble bien que ces langues d'eau froide sur le plateau continental résultent de l'intrusion d'un maximum de salinité, voisin de 35,9 ‰, transporté par un courant SE subissant des oscillations latérales. A ce propos, il est utile de représenter les composantes moyennes spatio-temporelles de la vitesse, dans des directions parallèle (fig. 24) et perpendiculaire (fig. 25) à la côte,

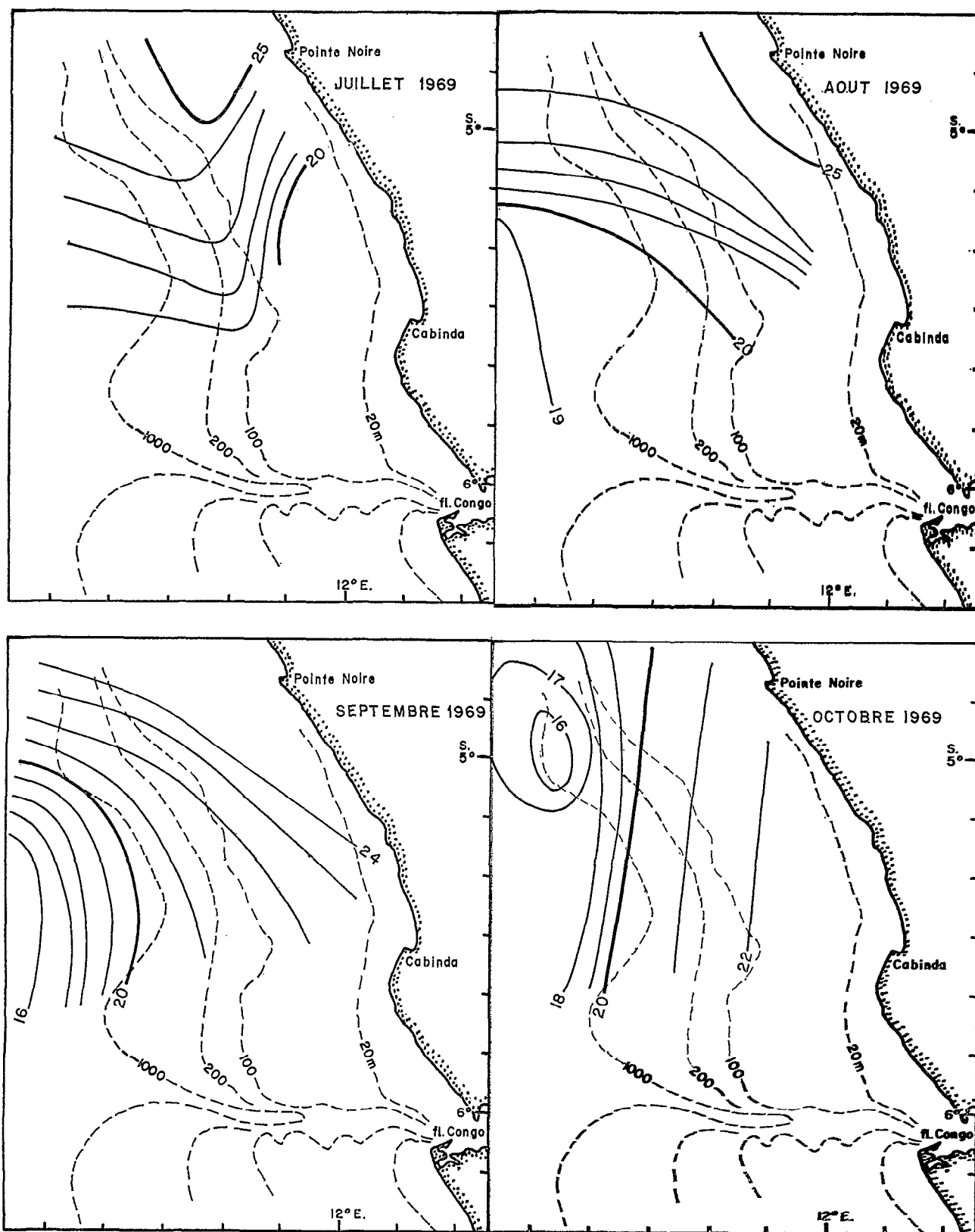


Fig. 22. — Isopycnes de surface en saison froide (a, b, c) et en début de saison chaude (d).
 Surface isodensities during the cold season (a, b, c) and at the beginning of the hot (season (d)).

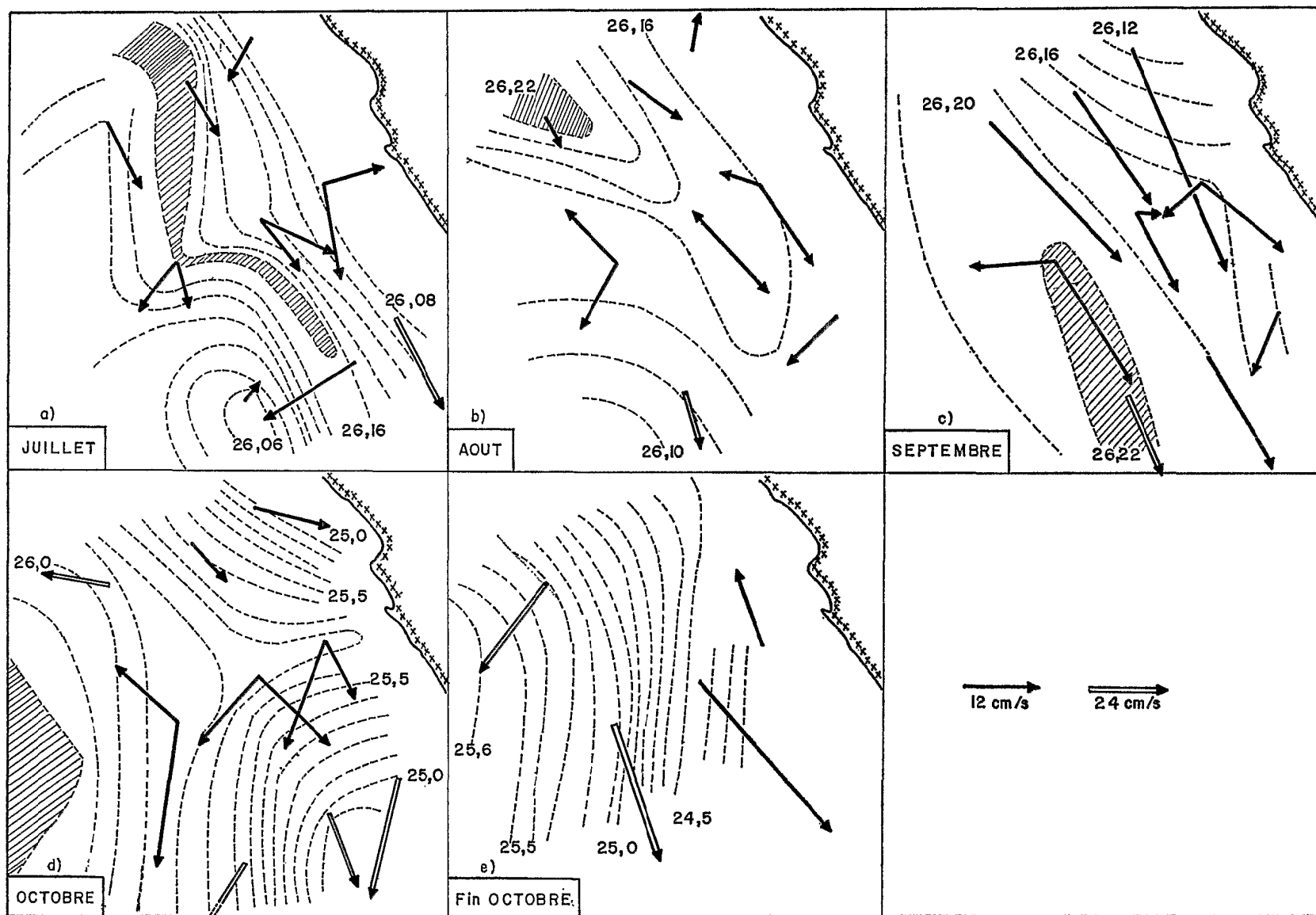


Fig. 23. — Isopycnés et courants observés à l'immersion 50 m.
Isodensities and currents observed at 50 m depth.

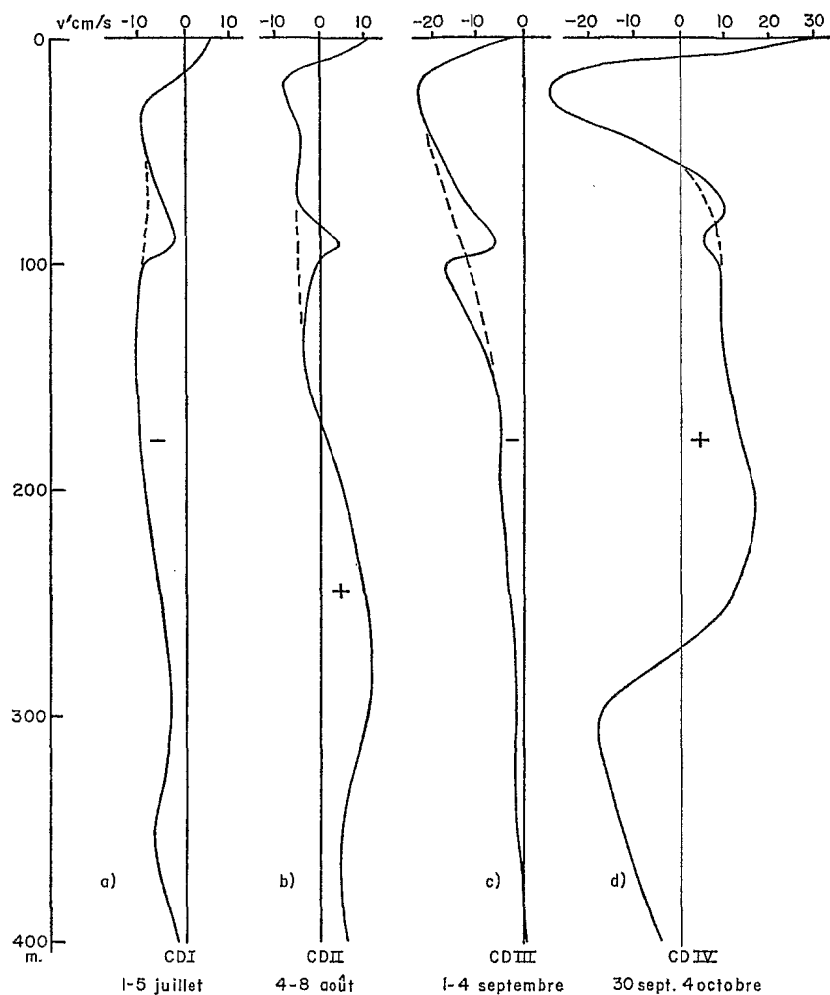


Fig. 24. — Distribution verticale de la composante du courant parallèle à la côte.
Vertical distribution of the alongshore component of the current velocity.

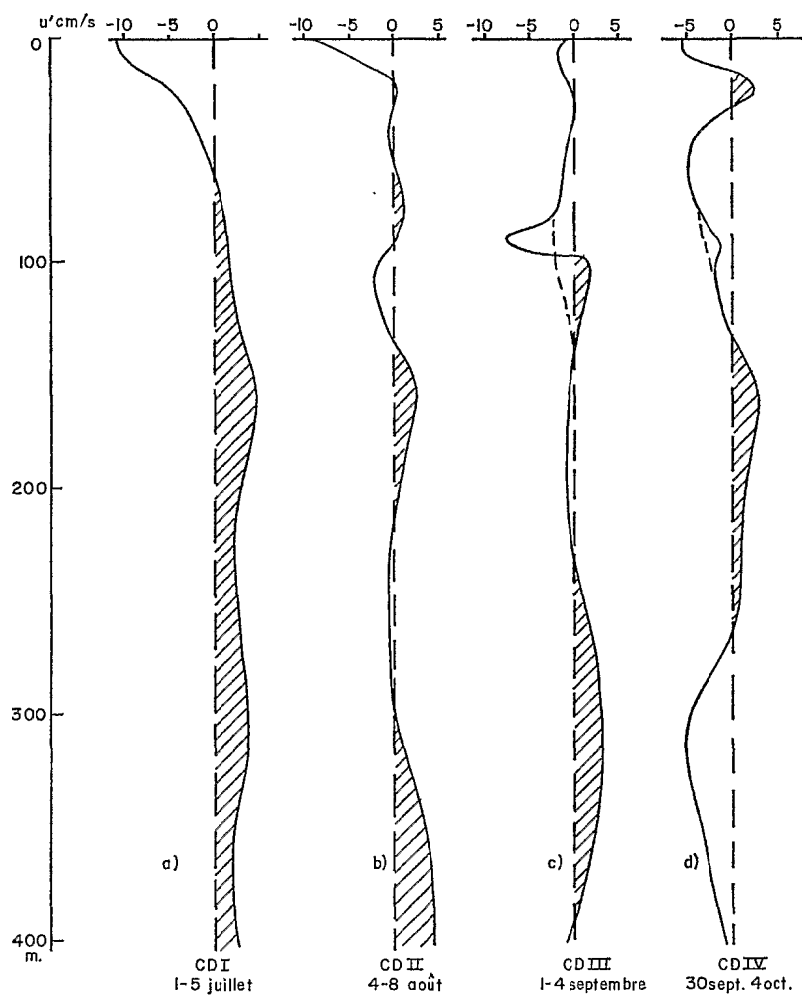


Fig. 25. — Distribution verticale de la composante du courant vers la côte.
Vertical distribution of the onshore component of the current velocity.

en fonction de la profondeur. Outre l'accélération SE de la couche de discontinuité déjà constatée au fur et à mesure que la saison chaude s'installe, les eaux du plateau congolais évoluent schématiquement d'un système à deux couches vers un système à plusieurs couches. Les conditions de juillet présentent une structure verticale analogue à celle de l'upwelling classique de la théorie d'Ekman, avec des eaux froides remontant de profondeurs supérieures à 60 m.

4. Variabilité au wharf de Pointe-Noire

La variabilité est étudiée dans son évolution saisonnière et en profondeur dans une couche d'eau épaisse de 17 m à quatre niveaux : 0, 5, 10 et 15 m. La cadence des observations est plus élevée pour les températures et salinités, deux fois par semaine, que pour les oxygènes dissous.

4.1. ÉVOLUTION SAISONNIÈRE DE LA VARIABILITÉ

Au niveau des températures, décembre et janvier sont les mois les plus variables (écart-type de 2,3 degrés Celsius) ; les salinités sont les plus instables en janvier-février (1,4 ‰) et les oxygènes dissous en septembre (1,1 ml/l).

Les stabilités en température et salinité sont les plus grandes en juillet (1,0 degré et 0,6 ‰) ; celle en oxygène dissous est au contraire meilleure en saison chaude : 0,4 ml/l en février et en octobre.

4.2. ÉVOLUTION DE LA VARIABILITÉ AVEC LA PROFONDEUR

Il n'est pas surprenant de constater que la variabilité des salinités décroît avec la profondeur, ni que le niveau du maximum de variabilité thermique est situé à mi-profondeur de mai à juillet et près du fond de septembre à janvier. En janvier et juillet, les oxygènes dissous sont très stables près du fond.

L'ensemble de ces résultats, grande variabilité thermohaline, maximum en période de crue, suggère une influence permanente et prépondérante des eaux de l'estuaire du Congo sur la dynamique des eaux de surface.

5. Conclusion

Une description de l'hydrologie côtière d'une région, à anomalie négative de température et de salinité dans le contexte océanique, vient d'être donnée. Les côtes du Gabon à l'Angola connaissent des remontées d'eau froide dont les mécanismes restent obscurs. Les vents locaux ne peuvent les expliquer. Cependant il y a chaque année une intrusion des alizés de SE dans le golfe de Guinée,

au large du Gabon, dont l'effet est d'accentuer la divergence équatoriale et par suite les remontées d'eau froide apportées par le courant de Lomonossov (contre-courant équatorial subsuperficiel dirigé vers l'est) dans la bande équatoriale. Hisard (1973) décrit une relation directe entre la valeur du maximum de vitesse et celle du maximum de salinité : il semble que dans certaines conditions, l'énergie cinétique du courant Est soit en partie utilisée pour augmenter le mélange vertical qui dégrade la thermocline et refroidit ainsi les eaux de surface. Il est logique de supposer un mécanisme analogue le long du talus continental, que corroborent peut-être :

- les minimums de vitesse sud pendant les saisons froides,

- le maximum de salinité équivalent à celui de Lomonossov et sa dégradation rapide dans le sens du mouvement,

- les valeurs excessives des courants géostrophiques mentionnées en 2.2.

L'hétérogénéité spatiale et la variabilité constatées peuvent découler de modifications dans les turbulences verticale et horizontale.

- soit par des apports d'eaux de densité différente,

- soit par perturbation directe dans le champ de vitesse.

L'intensification des vents observée en mai et en octobre peut provoquer cette perturbation des vitesses océaniques : elle correspond aux deux grandes migrations annuelles de la zone intertropicale de convergence vers le nord et vers le sud.

A l'est des océans, à des latitudes plus élevées, existent des contre-courants, c'est-à-dire des écoulements vers les pôles liés au talus continental, et aussi des upwellings : contre-courants du Pérou-Chili, du Benguela, des Canaries ; courant de Davidson au large des côtes de Californie et de l'Orégon. Neumann (1968), dans un chapitre consacré aux « systèmes de courants spéciaux et aux branches de courants », conclut que la nature dynamique exacte de la liaison entre l'upwelling et le contre-courant n'est pas encore bien comprise. Wooster et Reid (1963) ont comparé les courants à l'est des océans et décrit leurs caractères communs. A ces latitudes relativement élevées, ils retiennent l'explication de Munk selon laquelle le changement de signe du rotationnel des tensions de vent, dû à la présence d'un maximum des vents non loin de la côte, induit un contre-courant côtier (transport méridien de Sverdrup).

Les petites latitudes, où se trouve la région côtière du Congo étudiée ici, connaissent des phénomènes très analogues à ceux présentés ci-dessus. L'étude saisonnière des champs de vents statistiques au large

des côtes du golfe de Guinée doit représenter une contribution importante à l'hydrologie et aux effets de l'upwelling sur la biologie.

Enfin, il paraît indispensable de signaler l'existence d'ondes de plateau piégées (par la topographie) et le rôle important qui leur est attribué actuellement dans les phénomènes d'upwelling côtier et d'instabilité hydrodynamique, pouvant induire des méandres dans les circulations (Leblond et Mysak, 1977). Les ondes de plateau et les ondes internes de Kelvin se propagent parallèlement à la côte avec des célérités de 5-10 km par jour et des longueurs d'onde de 200-400 km, c'est-à-dire des périodes de l'ordre du mois ; la modélisation montre qu'elles sont excitées par l'application d'une tension de vent dirigée vers l'équateur et parallèle à la côte, c'est-à-dire les vents de SE dans notre cas. Picaut et Verstraete (1976)

remarquent un pic d'énergie spectrale à 38,5 jours dans les séries temporelles des températures de surface côtière à Pointe-Noire. Ils suggèrent que ces ondes, à très basse fréquence, jouent un rôle dans la variabilité hydrologique importante constatée.

Il convient enfin de noter que des études de courantométrie et d'hydrologie dans la région congolaise ont connu un grand essor ces dernières années, grâce à un équipement modernisé du centre O.R.S.T.O.M. de Pointe-Noire. Il est raisonnable de penser que les processus des ondes « très basse fréquence » seront mis en évidence et qu'en même temps sera améliorée la connaissance de l'upwelling, et de sa relation avec le contre-courant SE, des processus concomitants de mélange vertical et latéral induisant une productivité élevée des eaux congolaises.

BIBLIOGRAPHIE

- BERRIT (G. R.), 1958. — Les saisons marines à Pointe-Noire. *Bull. C.O.E.C.*, 10 (6) : 335-362.
- BERRIT (G.-R.), 1961. — Contribution à la connaissance des variations saisonnières dans le golfe de Guinée. 1^{re} partie. *Cah. Océanogr. C.O.E.C.*, 13 (10) : 715-727. 2^e partie. *Cah. Océanogr. C.O.E.C.*, 14 (9) : 543-633.
- BERRIT (G.-R.), DONGUY (J.-R.), 1964. — La petite saison chaude en 1959 dans la région orientale du golfe de Guinée. *Cah. Océanogr. C.O.E.C.*, 16 (8) : 657-672.
- DONGUY (J.-R.), HARDIVILLE (J.), LE GUEN (J. C.), 1964. — Essai de représentation du bilan d'eau douce dans une région marine. Applications à la baie de Biafra. *Doc. Centre O.R.S.T.O.M. Pointe-Noire*, 213, 13 p.
- GALLARDO (Y.), 1966. — Contribution à l'hydrologie du bassin d'Angola. *Doc. Centre O.R.S.T.O.M. Pointe-Noire*, n° 343, 31 p.
- GALLARDO (Y.), 1970. — Contribution à l'étude du golfe de Guinée. Hydrologie et courants dans la région de l'île Annobon. *Cah. O.R.S.T.O.M., sér. Océanogr.*, 22 (3) : 277-288.
- GALLARDO (Y.), DANDONNEAU (Y.), VOITURIEZ (B.), 1974. — Variabilité, circulation et chlorophylle dans la région du dôme d'Angola en février-mars 1971. *Doc. Scient. Centre Rech. Océanogr. Abidjan*, 5 (1-2) : 1-51.
- GALLARDO (Y.), LE GUEN (J. C.), 1972. — Caractères hydrologiques des régions frontales d'Angola, du Gabon et du Congo favorables aux concentrations d'albacores. *Doc. Centre O.R.S.T.O.M. Pointe-Noire*, N.S., 23, 18 p.
- GUILLERM (J. M.), 1975. — Variations saisonnières des transports côtiers dans le Sud-Est du golfe de Guinée (région de Pointe-Noire). *Bull. U.O.F.*, 7 (1-2).
- HART (T. J.), CURRIER (R. J.), 1960. — The Benguela current. *Discovery Rep.*, 31 : 123-298.
- HISARD (P.), 1973. — Variations saisonnières à l'équateur dans le golfe de Guinée, *Cah. O.R.S.T.O.M., sér. Océanogr.*, 11 (3) : 349-358.
- LEBLOND (P.-H.), MYSAK (L. A.), 1977. — Trapped coastal waves and their role in shelf dynamics. *The Sea*, vol. 6, Marine Modeling, pp. 459-495.
- MERLE (J.), 1972. — Conditions hydrologiques saisonnières de la marge continentale du Gabon et du Congo (1° N à 6° S). *Doc. Centre O.R.S.T.O.M. Pointe-Noire*, N.S., 27, 20 p.
- NEUMANN (G.), 1968. — Ocean currents. *Elsevier, Amsterdam*, 352 p.
- PICAUT (J.), VERSTRAETE (J. M.), 1976. — Mise en évidence d'une onde de 40-50 jours de période sur les côtes du golfe de Guinée. *Cah. O.R.S.T.O.M., sér. Océanogr.*, 14 (1) : 3-14.
- REBERT (J.-P.), 1966. — Conditions hydrologiques au sud de Pointe-Noire en début de saison froide. Aperçu sur la transition. *Doc. Centre O.R.S.T.O.M. Pointe-Noire*, 333, 20 p.
- SAMBA-KIMBATA (M. J.), 1978. — Le climat du Bas-Congo. *Thèse 3^e cycle, Fac. Sciences Dijon*, 280 p.
- VENNETIER (P.), 1968. — Pointe-Noire et la façade maritime du Congo-Brazzaville. *Mém. O.R.S.T.O.M.*, 26, 458 p.
- WAUTHY (B.), 1977. — Révision de la classification des eaux de surface du golfe de Guinée. *Cah. O.R.S.T.O.M., sér. Océanogr.*, 15 (3) : 279-295.
- WOOSTER (W. S.), REID (J. L.), 1963. — Eastern boundary currents. *The sea*, vol. 2 : 253-280.