

REMARQUES SUR LA CIRCULATION ET LES CARACTÉRISTIQUES HYDROLOGIQUES DE LA COUCHE SUPERFICIELLE ENTRE MADAGASCAR ET L'ÉQUATEUR

BERNARD PITON ET YVES MAGNIER

Océanographes de l'O.R.S.T.O.M., Nosy-Bé (Madagascar)

RÉSUMÉ

Entre le nord de Madagascar et la côte africaine, il existe, quelle que soit la saison, une veine de courant à vitesse renforcée, constituée par l'eau du courant sud-équatorial débordant le cap d'Amber; la vitesse y est supérieure à 1 noeud et peut atteindre 3-4 noeuds dans les parages du Cap d'Amber, du Cap Delgado et des îles; sa largeur est d'une centaine de milles. Dans la bande latitudinale 6° S-10° S, les courants géostrophiques de surface sont variables et faibles en cours d'année: on y trouve la limite entre le courant sud-équatorial et le contre-courant équatorial, à 6-7° S en hiver austral, à 9-10° S en été. Il n'existe pas de fronts thermiques; par contre, il a été mis en évidence des fronts de salinité entre l'eau salée de la Mer d'Arabie et l'eau dessalée du courant sud-équatorial.

La divergence sud-équatoriale est caractérisée par une remontée des isothermes, une augmentation des quantités de sels nutritifs et de celles de zooplancton mais sans augmentation appréciable des quantités de chlorophylle a dans les 100 premiers mètres.

ABSTRACT

Between Madagascar and the African coast, the South Equatorial Current strengthens when passing the Cape of Amber and the velocity can reach 3-4 knots near the Cape of Amber, the Cape Delgado and the islands of the Aldabra-Cosmoledo group. In the 6-10° S zone the surface current is weak and variable in direction. The boundary between the South Equatorial Current and the Equatorial Countercurrent lies at 6-7° S during the Southern Hemisphere winter and at 9-10° S in summer. In the 0-100 m layer it is marked by a doming of the isotherms, an increase of the quantities of nitrate and zooplankton but there is no enrichment in chlorophyll a. No thermal front has been put in evidence in this area but salinity fronts have been sometimes detected between the water coming from the Arabian Sea and the less saline water of the South Equatorial Current.

INTRODUCTION

De 1967 à 1973, le N.O. « VAUBAN » du Centre O.R.S.T.O.M. de Nosy-Bé a effectué plus de 300 stations hydrologiques dans l'ouest de l'océan Indien entre Madagascar, la côte Africaine, l'Équateur et les Seychelles (fig. 1). La taille insuffisante du bateau (24 mètres) ne permettait pas de faire des observations de juin à septembre, période des alizés forts.

Les stations ont été effectuées au cours de campagnes assez courtes (cf. tableau 1) ayant pour but d'apporter des précisions sur des zones d'intérêt particulier : la veine principale du courant sud-équatorial, ses bifurcations devant les côtes malgache et africaine, sa séparation d'avec le contre-courant équatorial.

Pour décrire les conditions physico-chimiques de surface nous ne grouperons pas entre elles les obser-

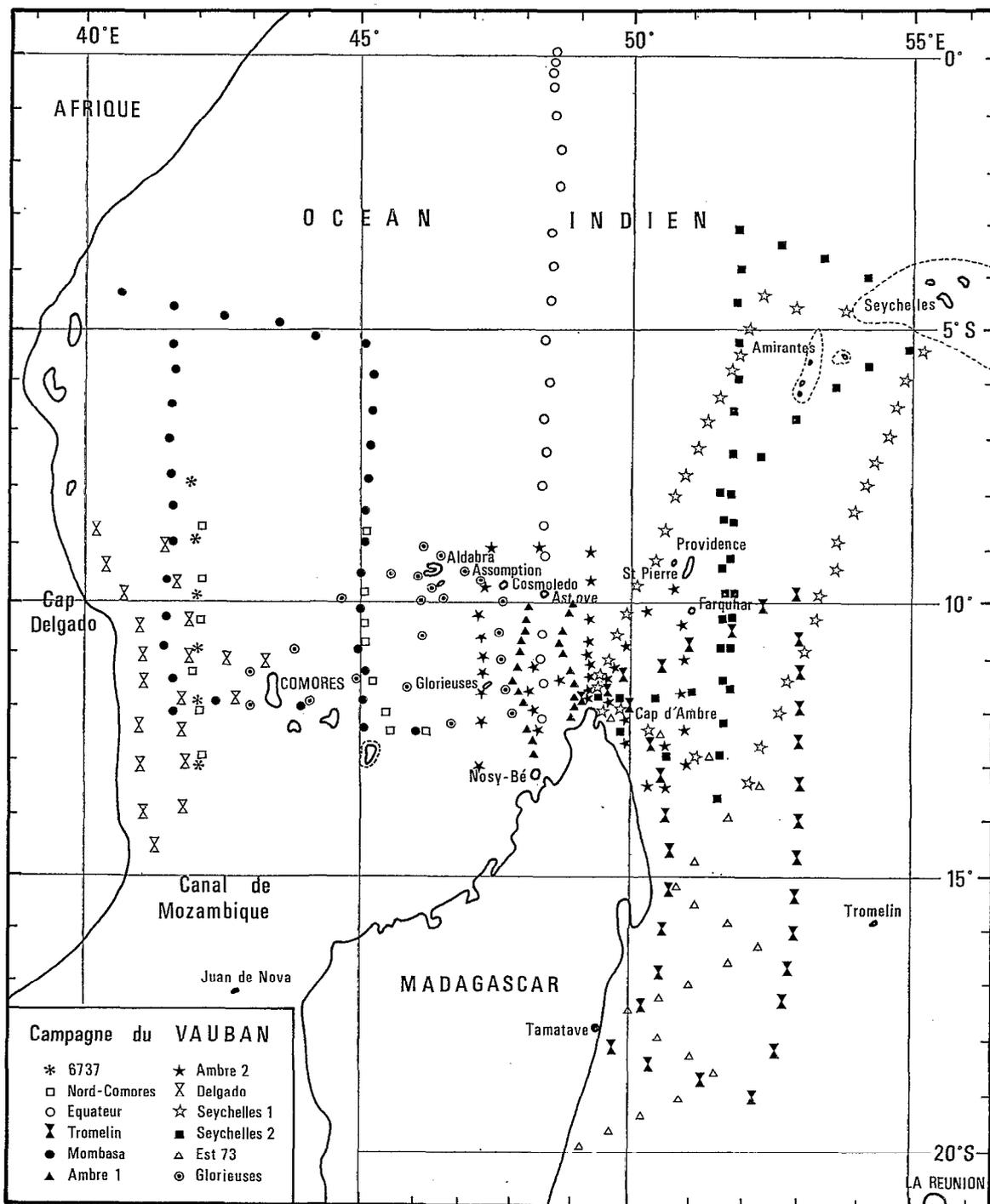


Fig. 1. — Positions des stations hydrologiques effectuées par le N.O. « VAUBAN » dans l'ouest de l'océan Indien entre Madagascar et l'équateur.

TABLEAU I

Campagnes océanographiques du N.O. « VAUBAN » effectuées de 1967 à 1973, dans le système des courants sud-équatoriaux à l'ouest de l'Océan Indien.

CAMPAGNES	DATE	NOMBRE DE STATIONS	RÉFÉRENCES
6737.....	12-17 sept. 67	6	NODC n° 55 0003.
6814 ou NORD-COMORES.....	5-16 mars 68	14	NODC n° 55 0004 et Centre O.R.S.T.O.M. de Nosy-Bé. Doc. n° 1.
Équateur (E. 70).....	10-21 déc. 70	22	NODC n° 55 0011 et Centre O.R.S.T.O.M. de Nosy-Bé. Doc. n° 26.
03-71 ou TROMELIN.....	10-23 fév. 71	32	NODC n° 55 0012 et Centre O.R.S.T.O.M. de Nosy-Bé. Doc. n° 26.
05-71 ou MOMBASA.....	10-27 mars 71	34	NODC n° 55 0013 et Centre O.R.S.T.O.M. de Nosy-Bé. Doc. n° 26.
12-71 (A. 71) AMBRE 1.....	18-29 mai 71	22	NODC n° 55 0014 et Centre O.R.S.T.O.M. de Nosy-Bé. Doc. n° 34.
24-71 (F. 71) AMBRE 2.....	23 nov.-11 déc. 71	39	NODC n° 55 0016 et Centre O.R.S.T.O.M. de Nosy-Bé. Doc. n° 34.
02-72 ou DELGADO.....	15-26 fév. 72	21	NODC n° 55 0017.
08-72 (S. 72) SEYCHELLES.....	5-18 avr. 72	41	NODC n° 55 0019.
32-72 (M. 72) SEYCHELLES.....	1-16 déc. 72	38	NODC n° 55 0020.
5-73 (E. 73)* ou EST 73.....	7-16 mars 73	21	NODC n° 55 0022.
7-73 (G. 73) GLORIEUSES.....	2-11 mai 73	23	NODC n° 55 0023 et Centre O.R.S.T.O.M. de Nosy-Bé. Doc. n° 40.

* Seules les stations situées au nord de 20° S sont utilisées.

vations faites durant des campagnes différentes, mais discuterons des distributions obtenues à chaque campagne, en les plaçant dans le contexte océanographique général fourni par l'atlas de WYRTKI (1971), établi à partir de toutes les données antérieures à 1966.

REMARQUES SUR LE CLIMAT

Le climat de la région sud-équatoriale de l'ouest de l'océan Indien est caractérisé par l'alternance de deux saisons :

— de novembre à mai (*été austral*), cette région est une zone de basse pression atmosphérique entre l'anticyclone de 30° S-40° S et celui du continent

asiatique (fig. 2 a); la position moyenne de la convergence intertropicale se trouve vers 10° S-12° S. Il s'ensuit qu'au nord de 5° S, le vent souffle du secteur nord nord-est (mousson de nord-est) et au sud de 15° S, du secteur est sud-est (fig. 2 b); entre 5° S-15° S les vents sont variables, dominants du secteur ouest dans le nord de Madagascar; c'est la zone des « calmes équatoriaux ».

— de juin à octobre (*hiver austral*), les basses pressions sont installées sur l'Asie et les hautes pressions se maintiennent vers 30° S (fig. 2 c); les alizés, atteignant fréquemment force 6, soufflent du secteur sud-est jusqu'à l'équateur et sont prolongés par la mousson de sud-ouest (fig. 2 d).

La symétrie dans le temps entre ces deux saisons

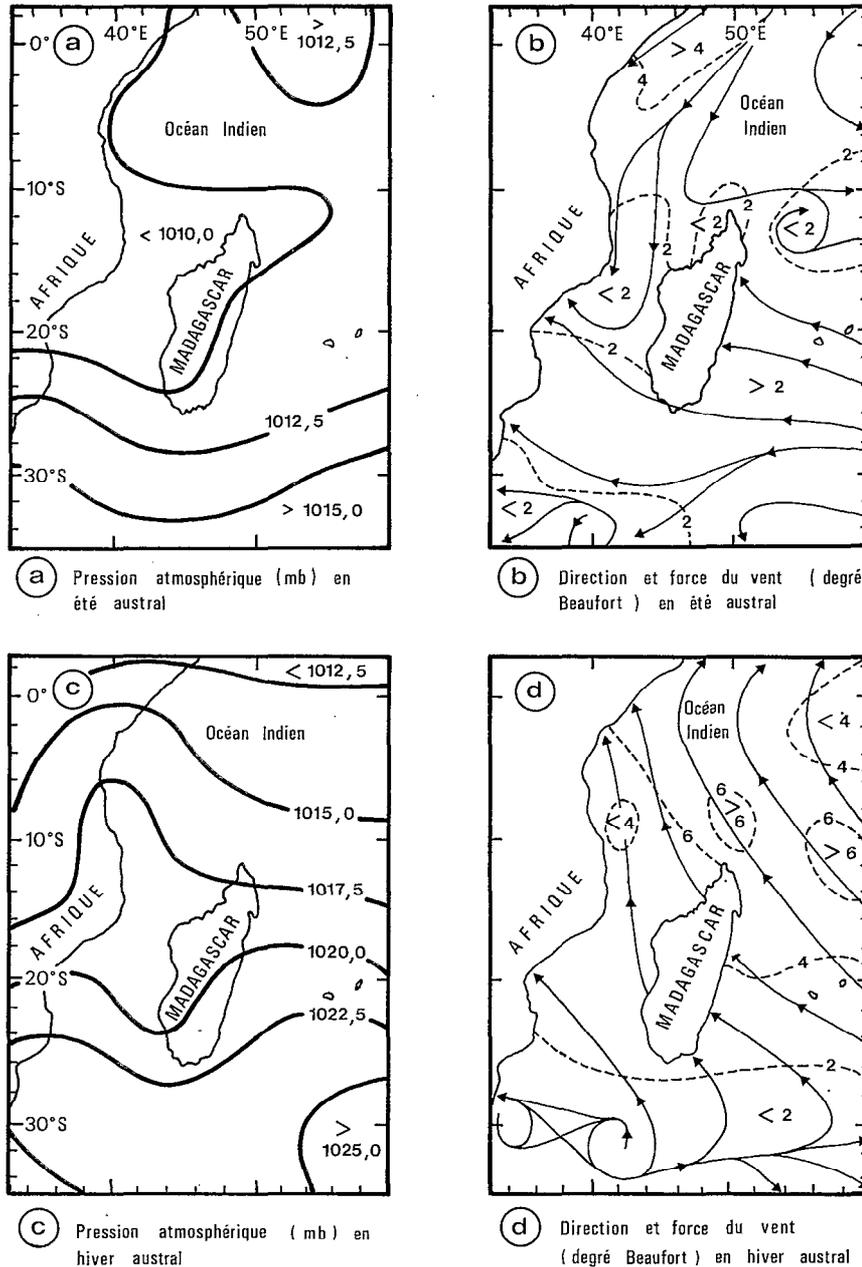


Fig. 2. — Éléments météorologiques sur le sud-ouest de l'océan Indien : pression atmosphérique, direction et force du vent.

n'est qu'apparente et en réalité (fig. 3 a, 3 b, 3 c) les vents de secteur est, sud-est et sud, qui sont les alizés au sens général, sont nettement plus fréquents à 2°30 S, 7°30 S et 11°33 S par 47-48° E, que les vents soufflant des autres secteurs, et ceci dès le mois d'avril à 2°30 S et 7°30 S et le mois de mars à 11°33 S, jusqu'au mois de novembre-décembre, soit 8 à 9 mois d'alizés contre 3 à 4 mois de vents varia-

bles. On peut donc penser que les alizés plus fréquents, beaucoup plus forts en plein hiver, et permanents au sud de 15° S, ont une influence prépondérante sur la circulation induite par le vent.

Les précipitations annuelles sur la mer semblent moins abondantes que ne l'indique la carte de SCHOTT (1935) qui fait état de 150 centimètres par an, alors que STODDART (1971) à partir des mesures

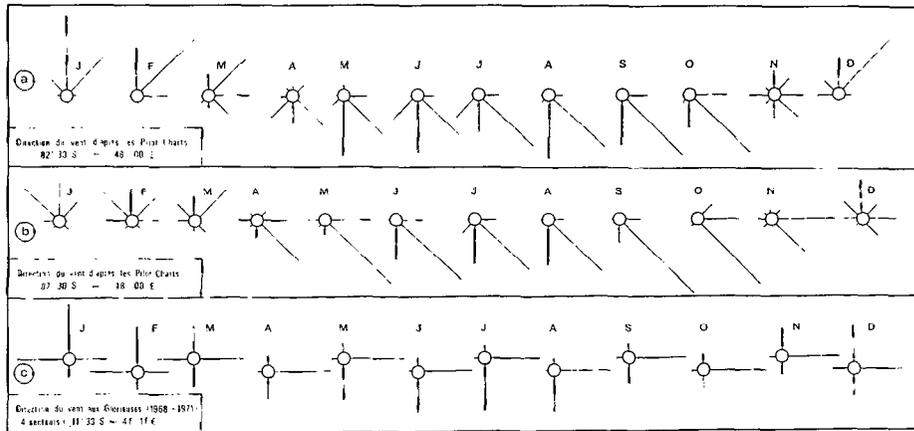


Fig. 3. — Direction du vent à trois latitudes différentes, à 48° E.

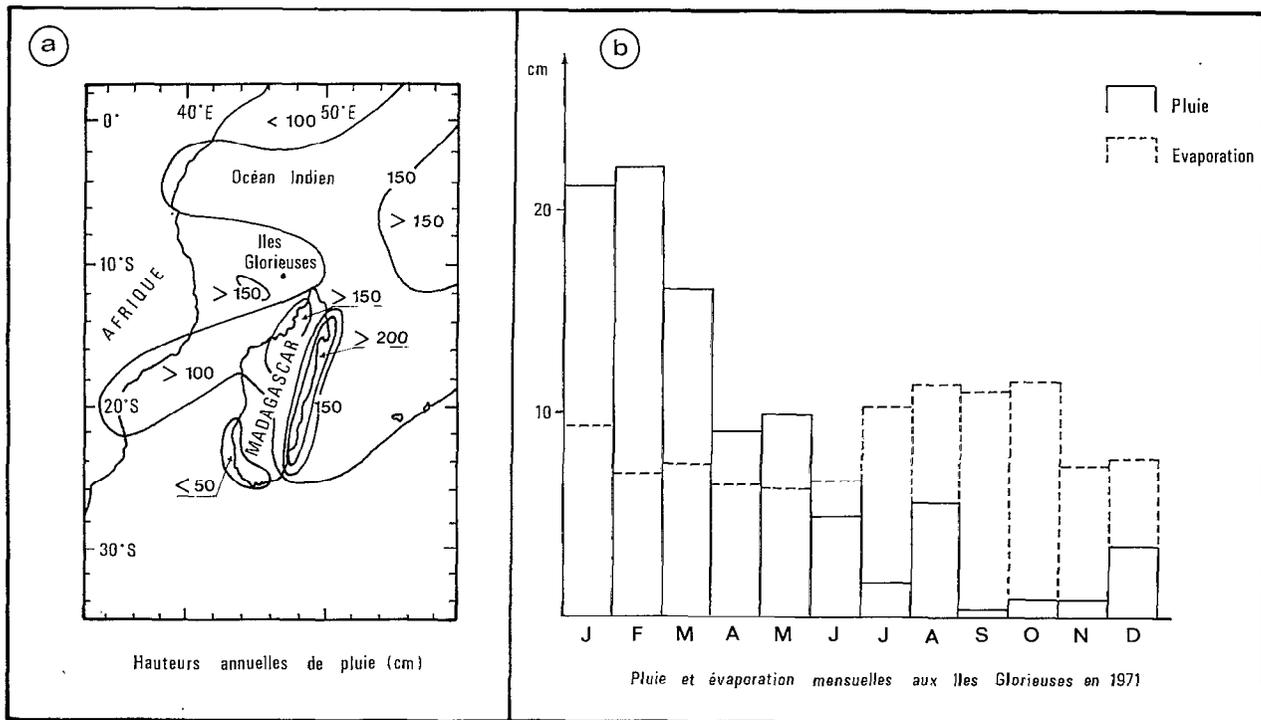


Fig. 4. — a) Carte des isohyètes annuelles sur le sud-ouest de l'océan Indien et sur Madagascar et la côte africaine, d'après SCHOTT (1935), l'Atlas de Madagascar (1969) et STODDART (1971); b) Relevés pluviométriques et évaporométriques mensuels à la station météorologique des îles Glorieuses en 1971.

effectuées sur les îles coralliennes, trouve une moyenne annuelle de l'ordre de 100 centimètres. Nous avons dressé une carte des isohyètes annuelles (fig. 4 a) à partir de la carte de SCHOTT pour l'Afrique orientale, de celle de STODDART pour l'ouest de l'océan Indien sud-équatorial, et de celle fournie par l'Atlas de Madagascar (1969). On voit l'importance

de Madagascar (côte est et nord-ouest) dans la répartition des quantités de pluie : il tombe par endroits plus de 300 centimètres de pluie sur la côte est malgache. On divise classiquement l'année en deux périodes : la saison des pluies abondantes, de décembre à avril, et la saison où les pluies sont rares, de mai à novembre (fig. 4 b).

QUELQUES PARTICULARITÉS DE LA CIRCULATION SUPERFICIELLE

D'après les cartes trimestrielles de la topographie dynamique de la surface par rapport à 1000 décibars présentées dans l'atlas de WYRTKI, l'allure générale de la circulation serait la même tout au long de l'année : on a en effet un « sommet » dynamique vers 20° S dans l'est de Madagascar et un « creux » dynamique à 6-8° S au nord de Madagascar; entre les deux, circule le courant sud-équatorial (C.S.E.). Le contre-courant équatorial (C.C.E.) se situe au nord de 6° S.

1. Les campagnes TROMELIN et EST ont donné deux représentations du courant géostrophique de surface devant la côte nord-est de Madagascar pendant l'été austral. En février 1971 (fig. 5 a), on trouvait deux branches du C.S.E. bien distinctes, l'une dans le nord-est du cap d'Ambre où le courant portait à l'ouest nord-ouest, l'autre, vers 18-19° S, où il portait au sud le long de la côte; entre ces deux branches, de 13° S à 16° S, le courant était faible.

Dans le voisinage du cap d'Ambre, le courant de densité était peu important, alors que le courant de dérive avait une vitesse supérieure à 4 nœuds, observée par le « VAUBAN » à 30 milles au large par fond de 2000 mètres. Au large de Tamatave, le courant de dérive était de 2 nœuds, du même ordre de grandeur que la vitesse du courant géostrophique.

En mars 1973 (fig. 5 b) une cellule tourbillonnaire bien marquée à 18° S séparait la veine de courant portant au nord nord-ouest (1-2 nœuds à 15° S) de la veine portant au sud sud-est (1 nœud à 20° S).

Ces deux « images » différentes indiquent que la bifurcation du courant sud-équatorial est accompagnée de mouvements tourbillonnaires. D'autre part l'accumulation d'eau à la côte par le courant général d'afflux et les eaux de pluie et de ruissellement, donne naissance à une veine de courant fort devant le cap d'Ambre.

2. En définitive les observations du « VAUBAN » conduisent à trois représentations géostrophiques du C.S.E. :

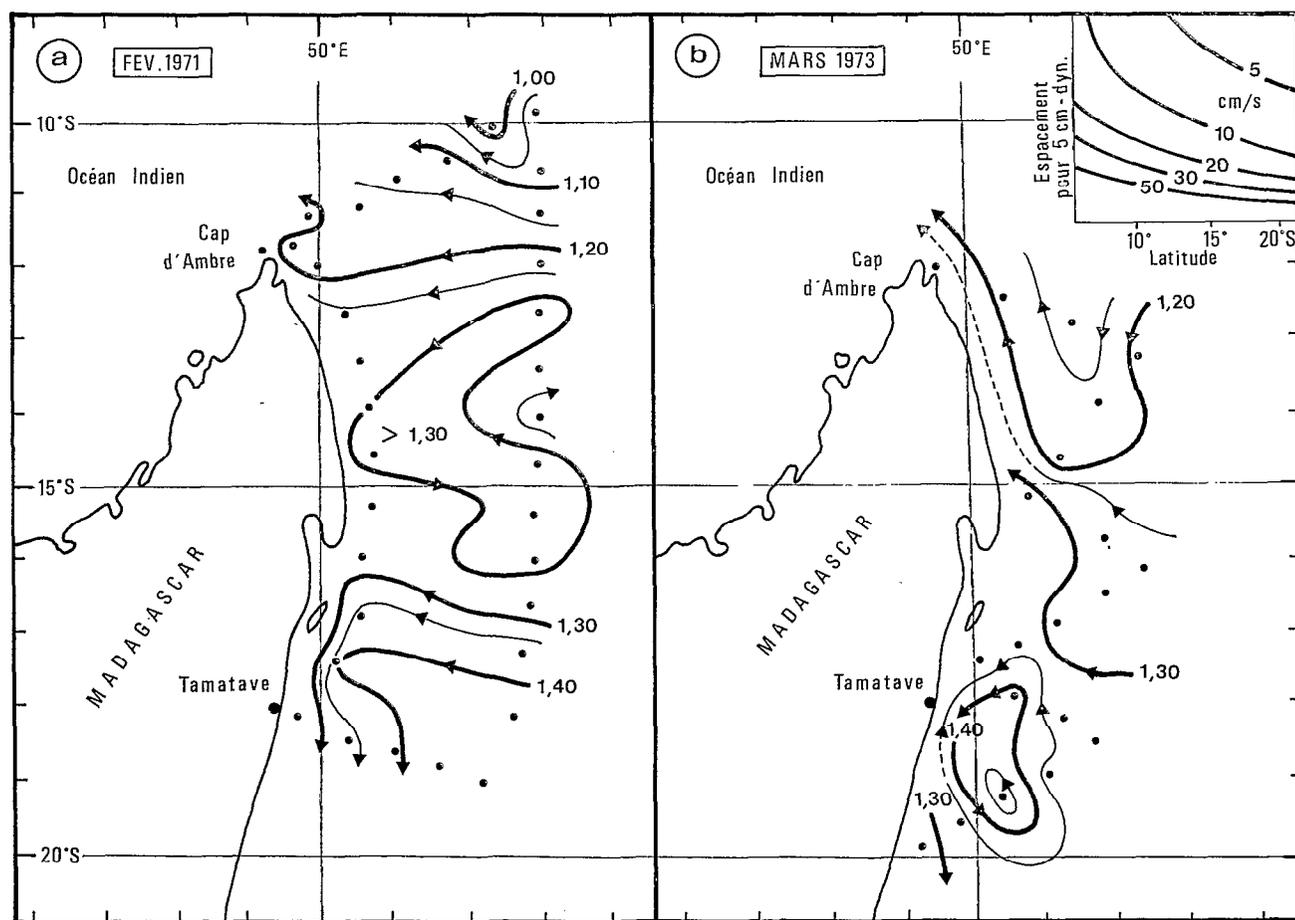


Fig. 5. — Courant géostrophique de la surface par rapport à 500 décibars dans le nord-est de Madagascar en février 1971 et mars 1973.

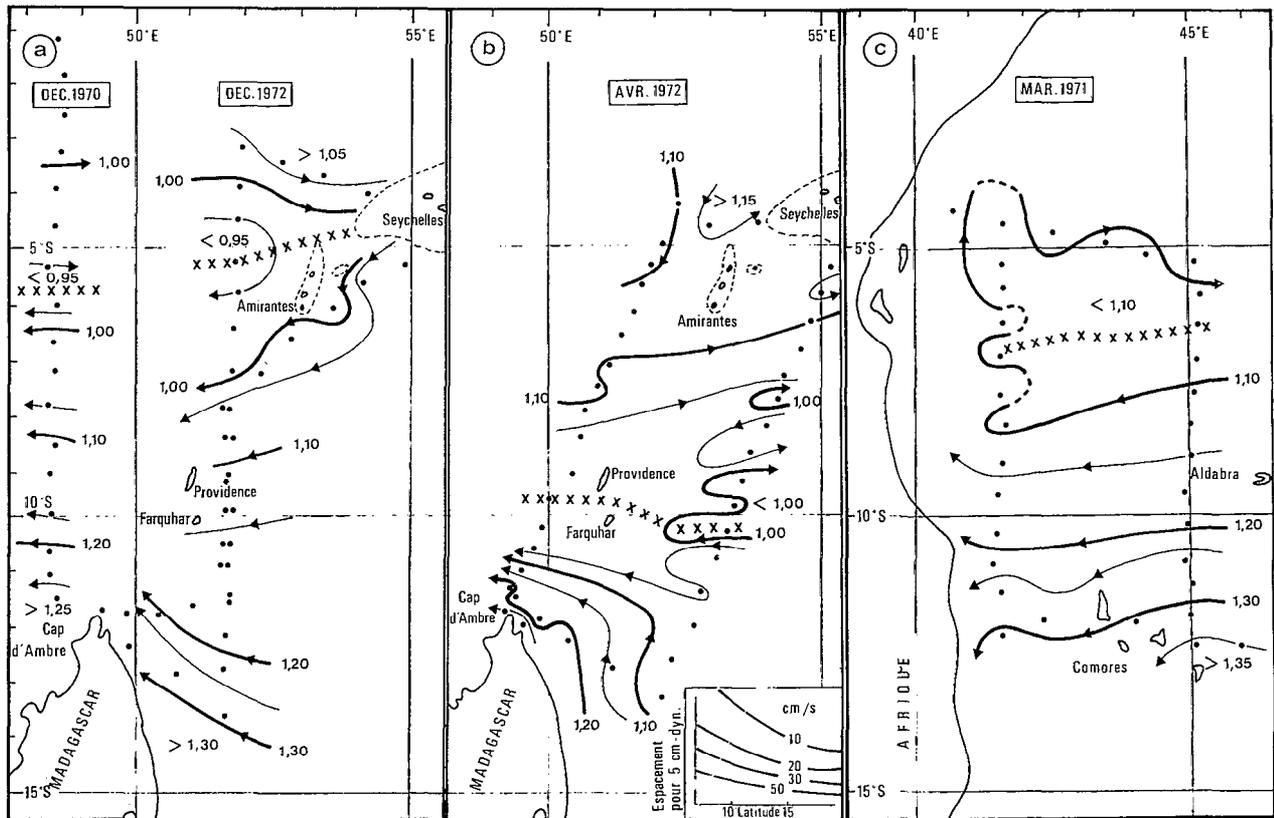


Fig. 6. — Courant géostrophique de la surface par rapport à 500 décibars entre 13° S et 3° S dans l'ouest de l'océan Indien, en décembre 1970 et 1972, avril 1972, et mars 1971.

— en décembre 1970 et 1972 (fig. 6 a) le C.S.E. s'étendait jusqu'à $5-6^{\circ}$ S; sa vitesse près du Cap d'Ambre était inférieure à 1 nœud.

— en avril 1972 (fig. 6 b) la limite nord du C.S.E. était à $9-10^{\circ}$ S; sa vitesse près du Cap d'Ambre dépassait 1,5 nœud.

— en mars 1971 (fig. 6 c) devant la côte africaine, la limite nord du C.S.E. était à $6-8^{\circ}$ S.

Cette limite nord varie donc en latitude entre 5° S et 10° S; elle est associée à une divergence marquée par une remontée des isothermes dans l'eau sub-superficielle et intermédiaire (MAGNIER et PITON, 1973). Nous ne pouvons pas retenir que cette remontée soit liée à une divergence créée par la division du C.S.E. en deux branches, le courant de Somalie et le courant des Aiguilles comme indiqué dans IVANENKOV et GUBIN (1960) (hypothèse reprise par RYTHER *et al.* (1966) et CUSHING (1971) en particulier).

En effet, si l'on considère les images partielles du courant sud-équatorial entre Madagascar et la côte africaine rassemblées figure 7, on constate qu'entre 10° S et 12° S, sa vitesse est assez élevée (1-2 nœuds)

à toutes les époques d'observation. Dans le nord-ouest de Madagascar, on voit (fig. 7 a, 7 b, 7 c) que le C.S.E. reçoit l'eau du vortex anticyclonique du nord du canal de Mozambique (DONGUY et PITON, 1969). A l'approche de la côte africaine, il se divise en deux branches (fig. 7 e); mais, du moins en été, cette bifurcation se fait très près de la côte (à moins de 30 milles) car elle n'a pas été décelée en mars 1968 (fig. 7 d), ni en septembre 1967 (fig. 7 f) où les stations étaient situées à plus de 60 milles de la côte africaine.

3. Quelques flux dans les 300 premiers mètres.

D'après OVCHINNIKOV (1961), on peut admettre que le courant sud-équatorial dans le nord de Madagascar, entraîne une couche d'au moins 300 mètres d'épaisseur. Quelques flux dans les 300 premiers mètres ont été calculés par la méthode des fonctions de transport présentée par WYRRKI (1971), dans le nord de Madagascar. En décembre, le C.S.E. transporte de 22 à $23 \cdot 10^6$ m^3/s entre 12° S et 6° S; en avril, la quantité d'eau transportée est de $17 \times$

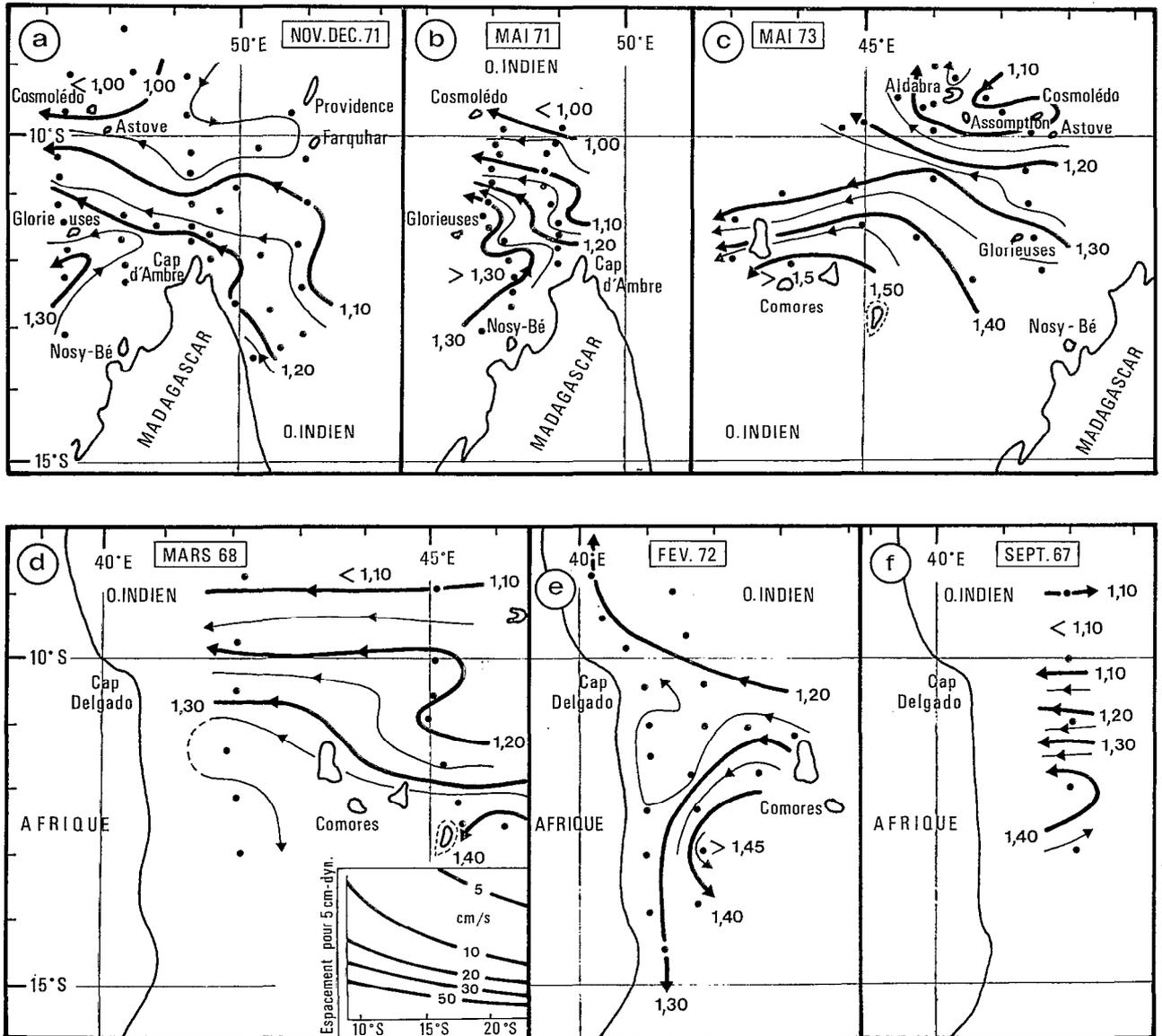


Fig. 7. — Courant géostrophique de la surface par rapport à 500 décibars entre 12° S et 9° S dans l'ouest de l'océan Indien de septembre à mars, entre 1968 et 1972.

10^6 m³/s, entre 12° S et 9° S. A l'ouest de 48° E on trouve des flux voisins de 24×10^6 m³/s, chiffre qui peut être retenu comme estimation du transport d'eau par le C.S.E. pendant toute l'année. Le flux du contre-courant équatorial est voisin de 1×10^6 m³/s à ces deux époques.

Dans la bifurcation devant Madagascar les veines des courants déviés avaient toutes deux un flux de 7 à 8×10^6 m³/s aussi bien en février 1971 qu'en mars 1973. Devant la côte africaine en février 1972 les flux d'eau déviée étaient de $7,7 \times 10^6$ m³/s vers le nord et de $10,5 \times 10^6$ m³/s vers le sud; cette inégalité provient certainement du vent de force 4 à 6

qui soufflait du nord au moment des observations; en l'absence d'autres mesures on ne peut pas conclure à la permanence de cette inégalité.

QUELQUES PROPRIÉTÉS PHYSIQUES, CHIMIQUES ET BIOLOGIQUES LIÉES A LA CIRCULATION SUPERFICIELLE

1. Propriétés de surface: température et salinité.

Dans cette partie de l'océan Indien, la répartition de la température de surface n'est pas liée à la circulation: il n'y a pas d'incursions d'eaux froides

créant des fronts thermiques, ni de refroidissement important par remontée d'eaux profondes jusqu'à la surface. On rencontre donc de grandes surfaces isothermes, à température maximale (28-29 °C) en mars-avril (fig. 8 a), minimale (25-26 °C) en juillet-août (fig. 8 b). On peut cependant noter que l'équateur thermique est situé entre l'équateur et 10° S en été, tandis qu'en hiver, la température de l'eau de surface au voisinage de 10° S est inférieure à 1 °C à celle de l'eau aux autres latitudes.

A l'inverse de la température, la salinité est une caractéristique des masses d'eau de surface. MAGNIER et PIRON (1973) distinguent trois types d'eau superficielle dans la zone étudiée :

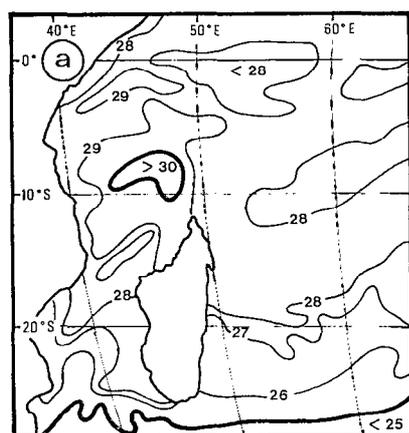
— l'eau équatoriale à salinité élevée (35,3 ‰ en décembre),

— l'eau du courant sud-équatorial à minimum de salinité (salinité inférieure à 34,7 ‰),

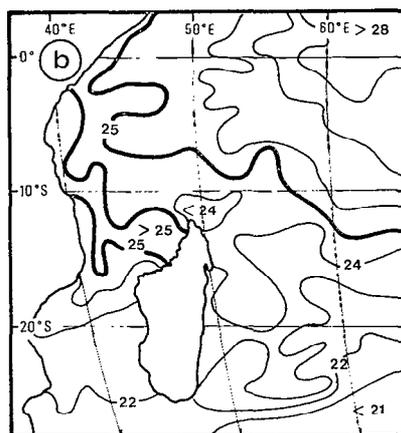
— l'eau du canal de Mozambique dont la salinité est grandement influencée par la proximité de Madagascar.

Le schéma général de la répartition de la salinité est donné par les figures 8 c et 8 d (WYRKKI, 1971) : le minimum de salinité du C.S.E. s'étend entre l'eau plus salée de la mer d'Arabie et celle de la convergence tropicale de 30° S. En fait, les différentes campagnes du « VAUBAN » ont fait apparaître des répartitions horizontales de salinité plus complexes et plus variables. Durant la période de dessalure maximale, février-mars-avril, on a trouvé de grandes différences d'une année à l'autre :

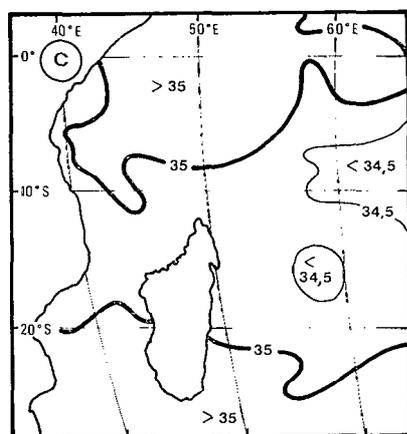
— Devant la côte nord-est de Madagascar, en



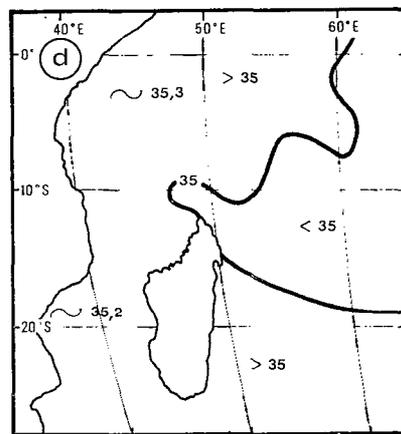
Mars 1963 - T° C



Août 1963 - T° C



Mars - Avril S ‰



Juillet - Août S ‰

Fig. 8. — Répartition horizontale de la température de surface aux mois de mars (a) et d'août (b) 1963, et de la salinité moyenne de surface en mars-avril (c) et juillet-août (d), d'après WYRKKI (1971).

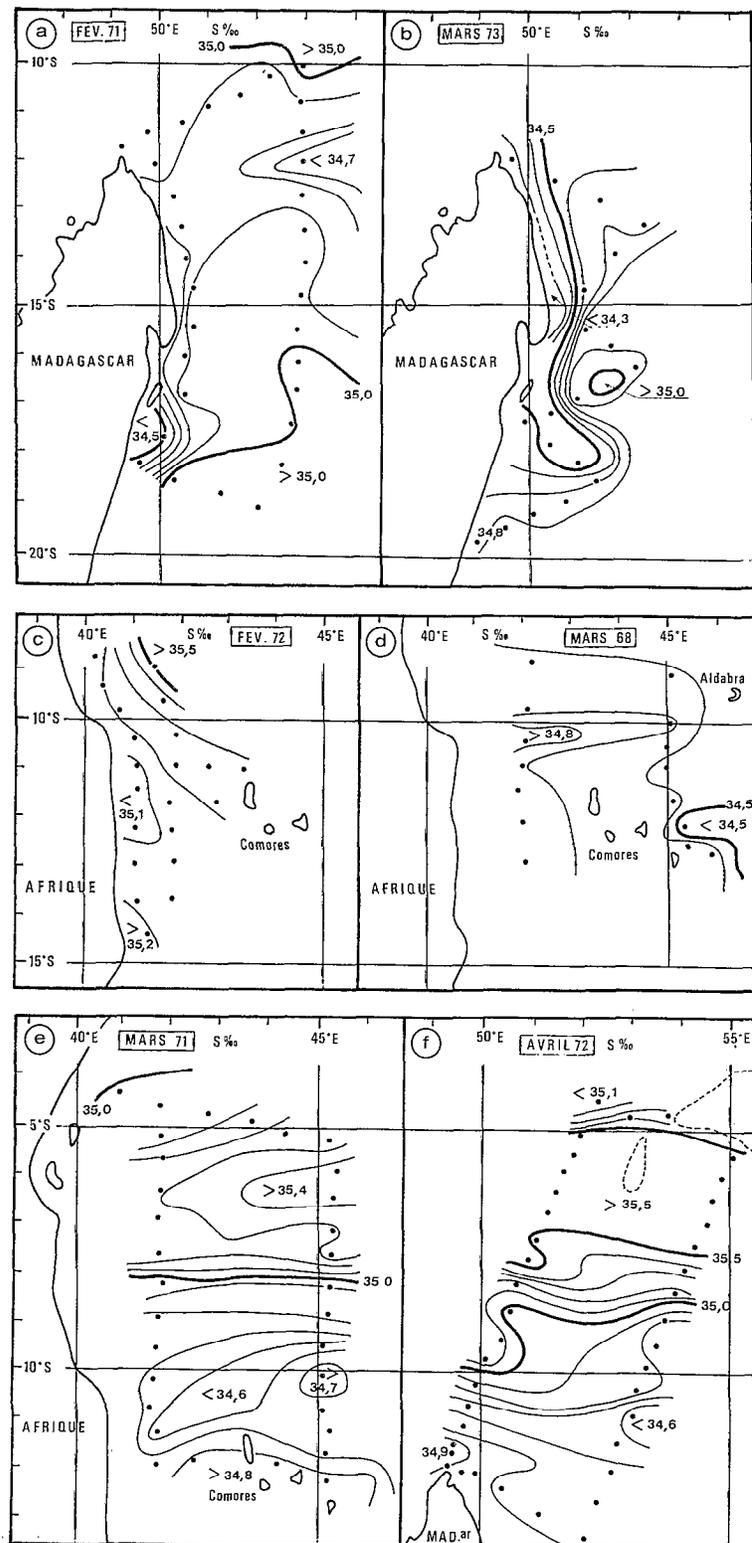


Fig. 9. — Répartition horizontale de la salinité de surface entre Madagascar et 5° S durant la période de la plus grande dilution (février, mars, avril).

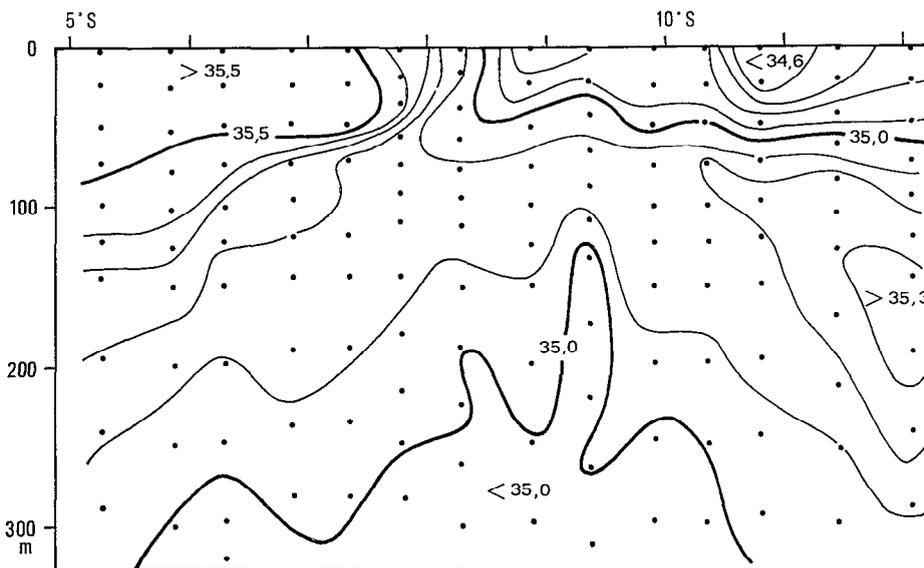


Fig. 10. — Répartition verticale de la salinité de la surface à 300 mètres de profondeur, entre 12° S et 5° S, vers 54° E (croisière SEYCHELLES 1, avril 1972).

février 1971, on retrouvait (fig. 9 a) l'allure générale de la répartition horizontale de la salinité de surface, à savoir l'eau dessalée du C.S.E. entre l'eau à salinité supérieure à 35 ‰ au nord de 10° S et au sud de 17-18° S; le long de la côte nord-est de Madagascar, à cette époque, l'eau n'était très dessalée que devant Tamatave tandis qu'en mars 1973 (fig. 9 b), elle l'était au large de toute la côte nord-est (salinité inférieure à 34,5 ‰) constituant un véritable front de salinité. Ceci était sans doute dû à l'influence du cyclone qui était passé entre Madagascar et la Réunion une semaine auparavant.

— Devant la côte africaine, à 10-12° S, la salinité variait de 35,0 à 35,5 ‰ en février 1972 (fig. 9 c), tandis qu'en mars 1968 (fig. 9 d) et mars 1971 (fig. 9 e) elle était voisine de 34,7 ‰. Il est probable que le vent du nord assez fort qui régnait en février 1972 sur cette région avait favorisé l'entraînement de l'eau salée de la mer d'Arabie vers le sud alors qu'aux autres époques l'eau dessalée du C.S.E. prédominait.

— Au nord de Madagascar, en avril 1972 (fig. 9 f) la distribution était semblable à celle observée plus à l'ouest en mars 1971 : l'eau du C.S.E., d'une salinité inférieure à 35 ‰, était séparée à 8-9° S de l'eau équatoriale plus salée ($S > 35,5$ ‰) par un front halin intéressant une couche de 100 mètres d'épaisseur (fig. 10). Un tel front n'existait ni en décembre 1970 ni en décembre 1972 (fig. 11 a). Par contre en novembre-décembre 1971 (fig. 11 b) on retrouvait un fort gradient méridien de salinité dès la latitude

du Cap d'Ambre, la dessalure du C.S.E. ayant disparu bien que le flux est-ouest fut très net (fig. 7 a). On peut rapprocher cette salinité anormalement élevée à 10° S ($S > 35,5$ ‰) du fait qu'en septembre et octobre 1971, aux Glorieuses, l'évaporation excédait de beaucoup les précipitations (fig. 4 b).

En conclusion, le C.S.E. peut transporter de l'eau d'une salinité inférieure à 35 ‰ jusqu'à la côte africaine; cette dessalure est parfois renforcée par les eaux de pluie et de ruissellement de Madagascar ou au contraire masquée par certaines conditions météorologiques comme un vent du nord ou un grand excédent d'évaporation. Il s'ensuit une assez grande variabilité dans la distribution horizontale de la salinité, et l'existence de fronts de salinité jamais mis en évidence auparavant.

2. La couche des 100 premiers mètres : sels nutritifs, phyto et zooplancton.

Entre 6° S et 9° S existe en permanence une structure en dôme des isoplèthes dans les couches subsuperficielles, induite par la divergence entre le C.S.E. et le C.C.E. Cette divergence a lieu dans la partie de l'océan Indien où prédominent les influences continentales (TCHERNIA *et al.*, 1958); elle fait donc remonter vers la surface des eaux d'origine nord-indienne riches en sels nutritifs (MAGNIER ET PIRON, 1974). On peut par suite penser que c'est une zone à haut potentiel productif. CUSHING (1971) la retient (sous le nom de « Madagascar wedge ») comme étant

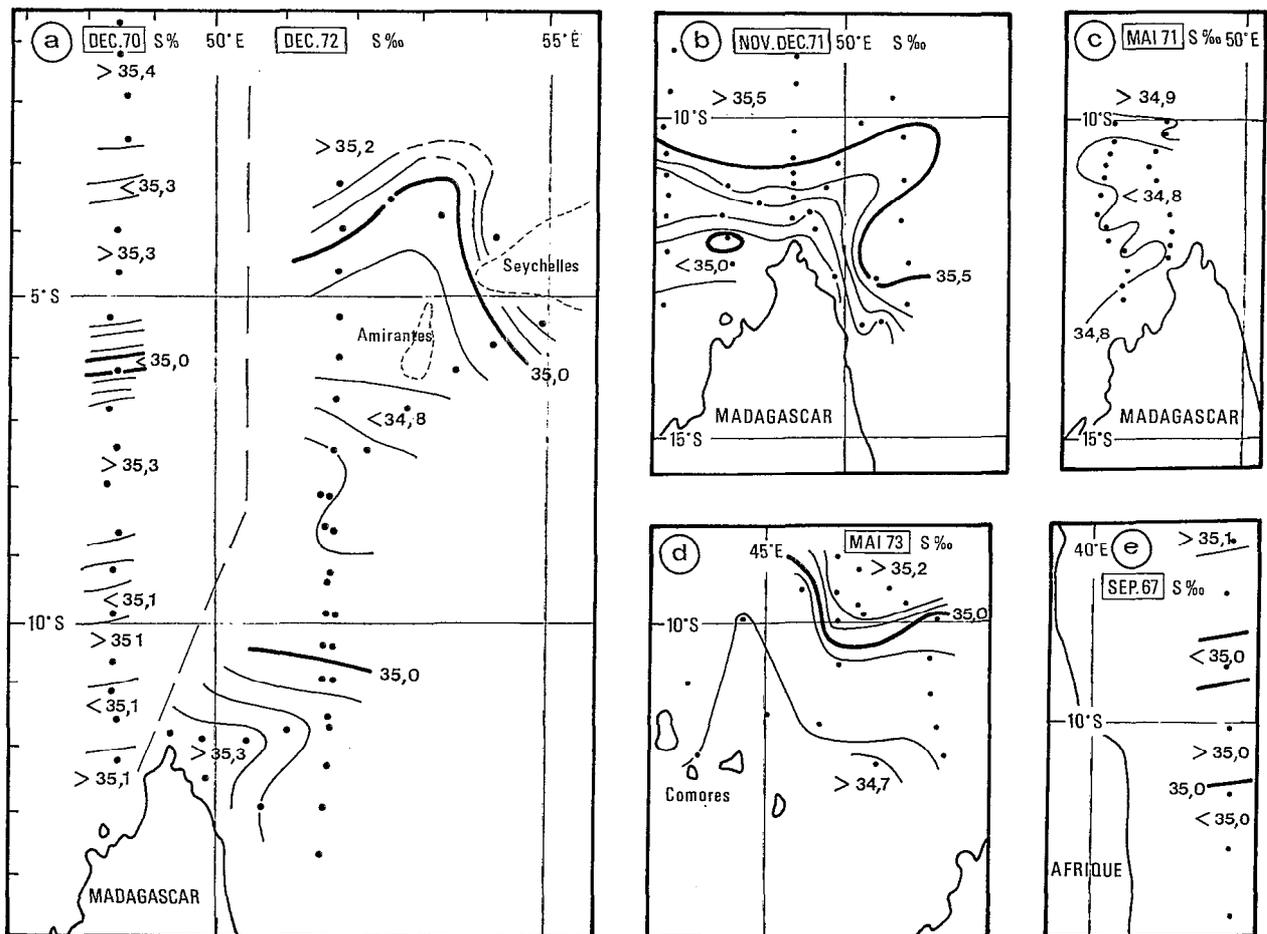


Fig. 11. — Répartition horizontale de la salinité de surface dans l'ouest de l'océan Indien entre Madagascar et l'équateur à différents mois entre septembre et mai.

la zone d'enrichissement la plus étendue (1 million de kilomètres carrés) de l'Océan Indien, à partir des cartes de productivité primaire dressées par KABANOVA (1968). Il signale en outre dans cette zone une relative abondance de prises de cachalots et d'îles à guano, indices d'enrichissement de l'eau superficielle.

Pour permettre une estimation grossière de la production végétale et animale de cette région, il a été déterminé, au cours de certaines campagnes, les teneurs en chlorophylle *a* totale par prélèvements ponctuels à 8 immersions, de la surface à 150 mètres, suivis d'une analyse spectrophotométrique des extraits acétoniques (mode opératoire décrit dans PITON et MAGNIER, 1971) ainsi que les poids secs de zooplancton recueilli par des filets, en traits obliques de la surface à 100 mètres de profondeur (mode opératoire décrit par BOUR *et al.*, 1971).

Dans la zone étudiée il y a deux types de répartition verticale de la chlorophylle *a* : au nord de 11-12° S, latitude du front physico-chimique caractéristique de l'océan Indien (MAGNIER et PITON, 1973), le maximum est situé entre 40 et 80 mètres de profondeur (fig. 12 a) dans la thermocline et dans la couche à gradient vertical maximum de nitrate, tandis qu'au sud de 11-12° S il est trouvé entre 70 et 120 mètres (fig. 12 b) juste au-dessus de la couche précédente; dans ce dernier cas, lorsque l'on ne considère que les teneurs dans les 100 premiers mètres, la sous-estimation de la quantité totale de chlorophylle *a* est donc plus importante que dans le premier cas.

Néanmoins, nous avons choisi de comparer l'évolution, en fonction de la latitude, de la température à 100 mètres d'immersion, de la quantité de nitrate

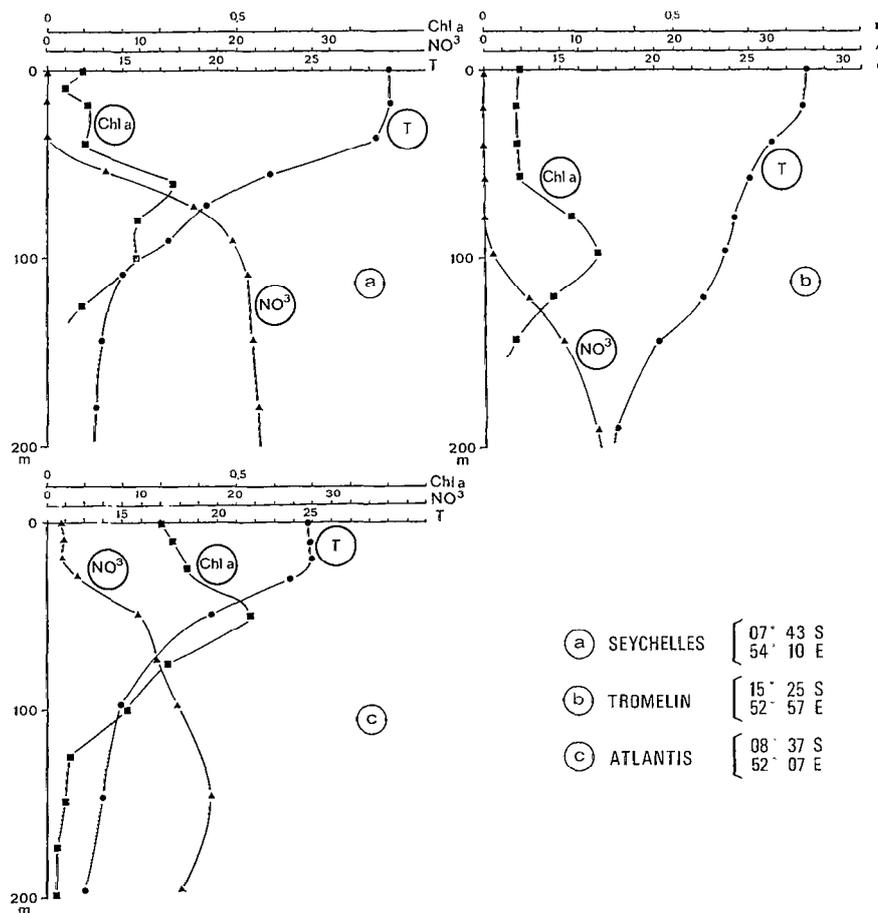


Fig. 12. — Profils verticaux de la température, du nitrate et de la chlorophylle *a*, de la surface à 200 mètres de profondeur à différentes stations dans l'ouest de l'océan Indien sud-équatorial.

(en milliatome-gramme), de chlorophylle *a* (en milligramme) et de zooplancton (en milligramme) par mètre carré dans les 100 premiers mètres.

Les résultats ont été groupés par périodes comme suit :

1) février-mars-avril : croisières TROMELIN, SEYCHELLES 1 et EST 73 (fig. 13 a), de 4° S à 20° S.

2) mai : croisières AMBRE 1 et GLORIEUSES (fig. 13 b) de 8° S et 13° S.

3) novembre-décembre : croisières AMBRE 2, SEYCHELLES 2 (fig. 13c) de 3° S à 13° S.

Durant la première période (fig. 13 a) la divergence de 9-10° S entre les courants équatoriaux est bien marquée : la température à 100 m s'abaisse jusqu'à 18° C alors que de part et d'autre elle atteint 24° C; on trouve à la même latitude un maximum de

nitrate (600 matg/m²) alors qu'à 4-5° S et au sud de 16° S les quantités de nitrate sont inférieures à 100 matg/m². On trouve également vers 10° S un léger maximum de zooplancton (1000 mg/m² contre 800 mg/m² de part et d'autre); les teneurs moyennes en chlorophylle *a* sont, par contre, peu différentes.

Au mois de mai, les variations en latitude des trois premières grandeurs considérées sont très rapides de 12° S à 9° S (fig. 13 b) : la température baisse de 24° C à 18° C, la quantité de nitrate passe de 50 matg/m² à plus de 500 matg/m² et celle de zooplancton de 300 mg/m² à plus de 2000 mg/m². Par contre la teneur en chlorophylle *a* est stationnaire (20 mg/m²).

Enfin, en novembre (fig. 13 c), le minimum de température à 4-6° S coïncide avec un net maximum de nitrate et un maximum moins marqué de chlorophylle *a*, sans augmentation de la quantité de zooplancton à cette latitude.

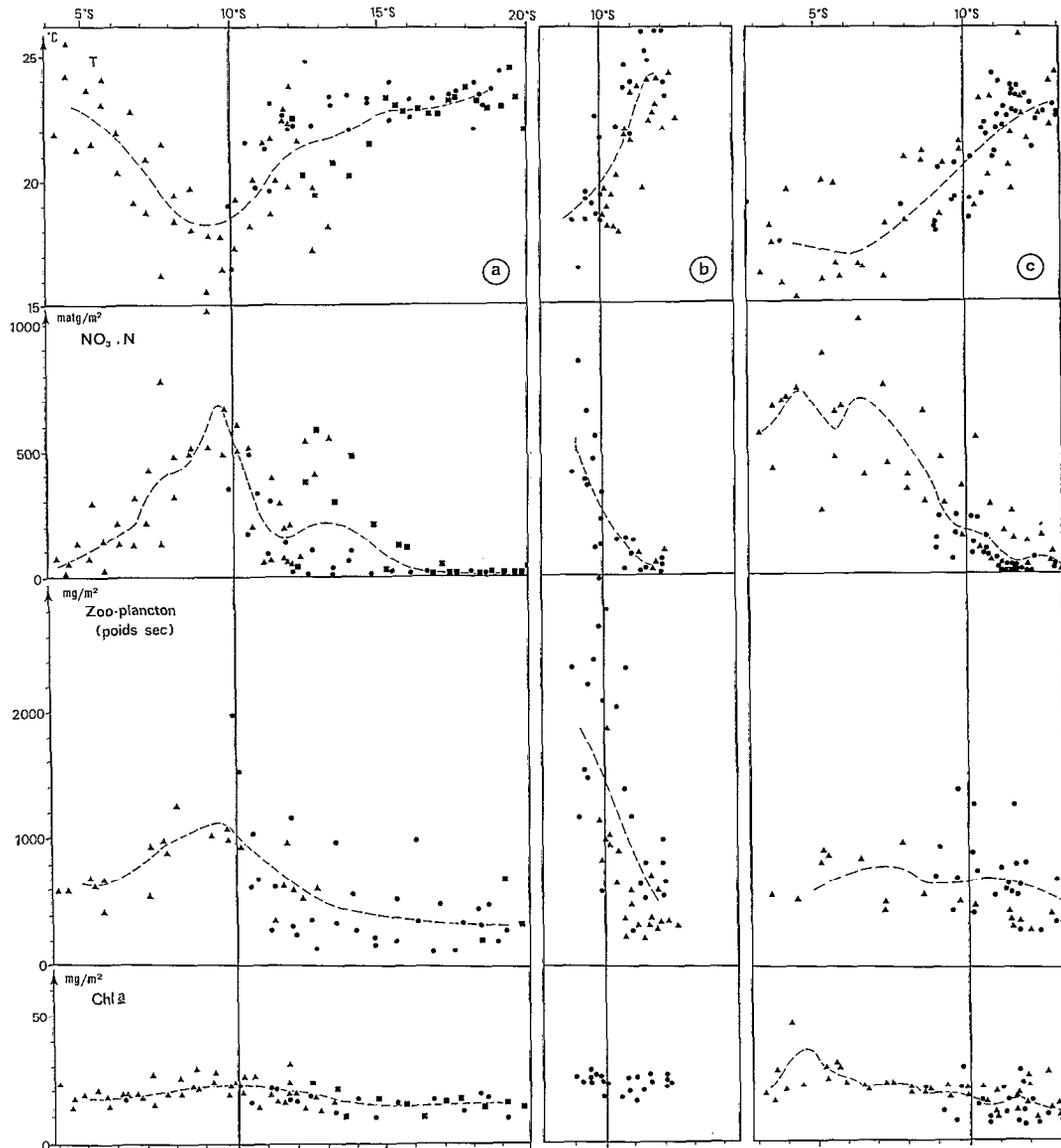


Fig. 13. — Répartition, en fonction de la latitude, de la température à 100 mètres de profondeur, des quantités de nitrate, de chlorophylle *a* et de zooplancton (en poids secs) dans les 100 premiers mètres durant les campagnes suivantes : a) TROMELIN, SEYCHELLES 1 et EST 73 ; b) AMBRE 1 et GLORIEUSES ; c) AMBRE 2 et SEYCHELLES 2.

DISCUSSION

1. Si l'on compare ces résultats à ceux de LE BOURHIS et WAUTHY (1969) dans le Pacifique, aux mêmes latitudes 5° S-20° S, à 170° E, où il y a aussi divergence vers 10-12° S, on voit que dans l'océan Indien les teneurs maximales en nitrate dans les 100 premiers mètres sont nettement supérieures à celles trouvées vers 10° S dans le Pacifique (entre 50 et 300 $\mu\text{atg}/\text{m}^2$), tandis que les quantités de chlorophylle *a* sont très proches; ces dernières sont aussi du

même ordre de grandeur que celles trouvées aux mêmes saisons par l'ATLANTIS dans la même région de l'océan Indien (Mc GILL et LAWSON, 1966). Elles semblent petites, eu égard aux quantités de sels nutritifs disponibles dans la couche euphotique, même lorsque l'eau de surface contient près de 2 $\mu\text{atg}/\text{l}$ de nitrate (fig. 12 c). Ceci est peut-être dû à un important broutage du phytoplancton par les herbivores.

Les quantités de poids sec de zooplancton trouvées

par d'autres auteurs avec d'autres méthodes de prélèvements et de mesures ne sont pas comparables aux nôtres. Par contre, nous pouvons comparer nos résultats à ceux obtenus par BOUR *et al.* (1971)* dans une baie eutrophique de la côte nord-ouest de Madagascar, la baie d'Ambaro. Dans cette baie, il a été trouvé des valeurs minimales de 15 à 40 mg/m³ du mois de mars au mois d'août, et des valeurs maximales supérieures à 70 mg/m³, tandis que les valeurs maximales dans la zone hauturière étudiée sont de 20 à 37 mg/m³; on peut donc dire d'après les résultats partiels obtenus que la zone de divergence sud-équatoriale dans l'ouest de l'océan Indien est riche en zooplancton, surtout au mois de mai.

2. Dans la zone de divergence, l'eau juste sub-superficielle est riche en sels nutritifs; mais, d'après les résultats du « VAUBAN », donc en dehors de la période de juin à octobre, l'eau de surface proprement dite n'est pas enrichie de façon mesurable. Cependant, des teneurs supérieures à 1 matg/m³ ont été parfois trouvées dans ces parages durant la période mai-octobre (WYRTKI, 1971).

Nous pouvons émettre l'hypothèse que cette « potentialité » d'enrichissement de l'eau de surface peut aboutir entre 5° S et 10° S à de vrais « upwelling » productifs dans certaines conditions favorables aux brassages verticaux comme par exemple le renforcement du vent ou les tourbillons qui se forment à proximité des accores ou dans le sillage des îles (UDA et ISHINO, 1958). Ces conditions favorables se trouvaient réunies en mai 1973, époque du renforcement des alizés, sous le courant des îles Cosmoledo

et Assumption (9°-10° S) où nous avons mesuré des teneurs en nitrate de l'ordre de 0,40 matg/m³ en surface au cours de la campagne « GLORIEUSES » (POULAIN *et al.*, à paraître).

CONCLUSION

Les parages de la zone de divergence entre le courant sud équatorial et le contre-courant équatorial présentent des indices de richesse potentielle qui laissent bien augurer de l'avenir de la pêcherie de thons de surface qui s'y développe actuellement.

Dans l'état actuel des possibilités matérielles et humaines du Centre O.R.S.T.O.M. de Nosy-Bé, il est difficile d'aller plus loin dans l'étude de la chaîne alimentaire. Nous ne pouvons que sélectionner les paramètres qui nous semblent indiquer le mieux l'évolution de la biomasse. Dans le cadre du programme « Thon » en cours, l'effort sera principalement porté sur la détermination des courants de surface par le G.E.K., des profils bathythermiques, des quantités de nitrate et de plancton dans la couche euphotique, en liaison avec des conditions météorologiques fournies par les stations installées sur les îles.

REMERCIEMENTS. — Les auteurs expriment leur reconnaissance à M. M. MALICK, Chef du Service Météorologique de la Réunion, qui a bien voulu leur fournir les données météorologiques et traiter rapidement les données d'océanographie physique.

Manuscrit reçu au S.C.D. de l'O.R.S.T.O.M. le 27 janvier 1975.

BIBLIOGRAPHIE

- ANONYME, 1957. — *Marine climatic atlas of the world*. Vol. III: Indian ocean U. S. Navy-Navaer 50-1C-530.
- ANONYME, 1966. — *Atlas of Pilot charts*. South Pacific and Indian Ocean. E. O. Pub. n° 107.
- ANONYME, 1969. — *Atlas de Madagascar*. B.D.P.A. (éd.), Tananarive.
- BOUR (W.), FRONTIER (S.), PETIT (D.), 1971. — Zooplancton d'une baie eutrophique tropicale (baie d'Ambaro, côte nord-ouest de Madagascar). *Documents scientifiques du Centre O.R.S.T.O.M. de Nosy-Bé*, 24 : 95 p.
- CUSHING (D. H.), 1971. — Upwelling and production of fish. Dans « *Advances in marine biology* », RUSSELL (F. S.) and YONGE (M.), éd., 9 : 255-334.
- DONGUY (J. R.), PITON (B.), 1969. — Aperçu des conditions hydrologiques de la partie nord du canal de Mozambique *Cah. O.R.S.T.O.M. sér. Océanogr.*, VII, 2 : 3-26.
- IVANENKOV (V. N.), GUBIN (P. A.), 1960. — Water masses and hydro-chemistry of the Western and Southern parts of the Indian ocean. *Trans. Inst. Okeanol.*, 64 : 22-42.
- KABANOVA (Y. G.), 1968. — Primary production of the northern part of the Indian ocean. *Okeanologiya*, 8, 2 : 270-278.
- LE BOURHIS (J.), WAUTHY (B.), 1969. — Quelques aspects de la distribution de la production primaire le long du méridien 170° E entre 20° S et 5° N. *Cah. O.R.S.T.O.M., sér. Océanogr.*, VII, 4 : 83-93.
- MAGNIER (Y.), PITON (B.), 1973. — Les masses d'eau de

* Dans la baie d'Ambaro, le filet employé était un filet Clark-Bumpus, sans le système de fermeture, et, au large, c'était un filet WP 2.

- l'océan Indien à l'ouest et au nord de Madagascar au début de l'été austral (novembre-décembre). *Cah. O.R.S.T.O.M., sér. Océanogr.*, XI, 1 : 97-113.
- MCGILL (D. A.), LAWSON (T. J.), 1966. — The distribution of chlorophyll in the western Indian ocean during the northeast mousson périod. Woods Hole Ocean. Inst., techn. rep., 66-12 (unpublished manuscript).
- NEUMANN (G.), 1968. — Ocean currents. Elsevier oceanography series, 4 : 352 p.
- OVCHINNIKOV (I. M.), 1961. — Circulation of waters in the northern part of the Indian ocean during the winter mousson. *Okeanol Issled*, 4 : 18-24.
- PITON (B.), MAGNIER (Y.), 1971. — Sur la détermination de la chlorophylle « a » dans l'eau de mer côtière tropicale. *Doc. scient. du Centre O.R.S.T.O.M. de Nosy-Bé*, 20 : 24 p.
- RAMAGE (C. S.), 1969. — Indian ocean surface meteorology. *Oceanogr. Mar. Biol. Ann. Rev.*, 7 : 11-30.
- RYTHER (J. H.), HALL (J. R.), PEACE (A. K.), BAKUN (A.), JONES (M. M.), 1966. — Primary organic production in relation to the chemistry and hydrography of the Western Indian ocean. *Limnol. and Oceanol.*, 11, 3 : 371-380.
- SCHOTT (G.), 1935. — Geographic des Indischen und Stillen Ozeans. Verlag Von G. Boysen, Hamburg, 413.
- STODDART (D. R.), 1971. — Rain fall on Indian ocean coral islands. *Atoll Res. Bull.* 147, 21 p.
- TCHERNIA (P.), LACOMBE (H.), GUIBOUT (P.), 1958. — Sur quelques nouvelles observations hydrologiques relatives à la région équatoriale de l'océan Indien. *Bull. Inf. COEC*, X, 3 : 115-143.
- UDA (M.), ISHINO (M.), 1958. — Enrichment pattern resulting from eddy systems in relation to fishing grounds. *Journ. Tokyo Univ. Fish.*, 44, 1-2 : 105-129.
- WYRTKI (K.), 1971. — Oceanographic Atlas of the International Indian Ocean Expedition. Nat. Sci. Foundation, Washington, 531 p.