LES MASSES D'EAU DE L'OCÉAN INDIEN A L'OUEST ET AU NORD DE MADAGASCAR AU DÉBUT DE L'ÉTÉ AUSTRAL

(novembre-décembre)

Y. MAGNIER et B. PITON

Océanographes de l'O.R.S.T.O.M. Nosy-Bé (Rép. Malgache)

Résumé

Soixante-trois stations hydrologiques effectuées par le N.O. « VAUBAN » du Centre O.R.S.T.O.M. de Nosy-Bé en novembre et décembre 1970 de 27° S à 12° S à l'est du canal de Mozambique, et le long de 48°30' E de 12° S à l'équateur dans l'océan Indien, ont permis de décrire la structure des masses d'eau des 600 premiers mètres pendant la saison d'établissement de la mousson de nord-est. Les principaux traits hydrologiques rencontrés sont : les limites entre le contre-courant équatorial et le courant nord-équatorial à 2° S, d'une part et le courant sud-équatorial à 6° S d'autre part, la zone frontale perturbée, à 10-12° S, entre les systèmes équatorial et tropical, une remontée d'eau profonde à 17° S près de Juan de Nova, un front physico-chimique vers 23° S et un front dynamique vers 26° S.

Abstract

The water masses are described down to 600 meters, after the results of sixty three hydrographic stations of the O.V. VAUBAN (centre O.R.S.T.O.M. de Nosy-Bé), from 27° S to 12° S on the east side of the Mozambic Channet and along $48^{\circ}30 E$ from 12° S to the equator in the Indian ocean at the beginning of the N-E monsoon. The most interesting hydrological features encountered are: the separation lines between the equatorial counter-current and the north equatorial current at 2° S and the south-equatorial current at 6° S, the transitional disturbed zone at 10-12° S between the tropical and equatorial systems, an upwelling at 17° S near Juan de Nova, a physical and chemical frontal zone at 23° S and a dynamical front at 26° S in the S-E of the Mozambique Channel.

1. INTRODUCTION.

En novembre 1970, le Centre O.R.S.T.O.M. de Nosy-Bé a commencé un nouveau programme d'océanographie physique dans la région équatoriale et tropicale sud de l'ouest de l'océan Indien. Au cours des deux premières campagnes intitulées « SUD 70 » et « ÉQUATEUR 70 », soixante trois stations hydrologiques ont été effectuées dans cette zone du 2 novembre au 19 décembre 1970, aux positions indiquées sur la figure 1. De 27° S à 22° S, vingt trois stations ont été disposées selon un contour triangulaire dans le but de préciser la topographie dynamique de cette région où des études antérieures (MENACHE, 1961) avait décelé un système de courants superficiels opposés. De 22° S à 13° S, une série de 16 stations a été faite au large de la côte malgache afin de détecter d'éventuels remontées d'eau à l'approche du talus continental. Enfin, de 13° S à l'équateur, vingt deux stations ont été exécutées selon une section méridienne, au voisinage de 48°30' E, longitude à laquelle peu de stations ont été effectuées au

Cah. O.R.S.T.O.M., sér. Océanogr., vol. XI, nº 1, 1973: 97-113.



Fig. 1. — Position des stations hydrologiques effectuées au cours des croisières «SUD 70» et «ÉQUATEUR 70» du «VAUBAN».

cours de campagnes océanographiques précédentes.

Les méthodes de mesure utilisées et les résultats obtenus durant ces campagnes ont été publiées, après traitement par le NODC (ROCKVILLE, U.S.A.), au Centre O.R.S.T.O.M. de Nosy-Bé (MAGNIER *et al.*, 1970) (1). Toutes les autres données utilisées, provenant de diverses croisières, ont été fournies par le NODC.

2. SITUATION GÉNÉRALE DE LA RÉGION PENDANT L'ÉTÉ AUSTRAL.

2.1. Les courants de surface

On peut voir sur la figure 2 les cartes de courants de surface pendant l'été austral (mousson de nordest), d'après différents auteurs : Schott (1935), ANONYME (1960), DEFANT (1961), OVTCHINNIKOV (1961), MENACHE (1961), LEDNEV et MUROMTSEV (non publié), BOISVERT (1966). De l'examen de ces cartes ainsi que de celles fournies par les « Pilot Charts » (1966), CREPON (1965) et DONGUY et PITON (1969), il ressort les traits principaux suivants :

(a) le courant sud équatorial diverge une première fois devant la côte nord-est de Madagascar, entre 17° S et 10° S, une seconde fois devant la côte africaine vers 10° S,

(b) le contre-courant équatorial s'établit à partir de la confluence, au voisinage de 5° S, des eaux de la branche nord du courant sud-équatorial et du courant de la côte est africaine dirigé en cette saison vers le sud-ouest,

(c) les branches sud des deux divergences citées ci-dessus forment deux courants portant au sud, l'un le long du bord ouest du canal de Mozambique, l'autre le long de la côte est malgache. Ce dernier contourne le sud de Madagascar et rejoint la côte africaine pour former le courant des Aiguilles,

(d) deux cellules anticycloniques l'une au nord, l'autre au sud occupent le canal de Mozambique.

2.2. Les masses d'eau

La structure hydrologique de la région intertropicale de l'océan Indien est influencée par de nombreux facteurs :

— la circulation zonale des courants et contrecourants équatoriaux dont les limites se déplacent au rythme des moussons,

— la circulation méridienne pôle-équateur classique amenant les eaux de l'hémisphère sud,

— la circulation méridienne venant du nord et marquée par les nombreuses sources dues à l'influence continentale.

La conséquence de ces divers apports d'eau se traduit par une grande complexité de la structure verticale. ROCHFORD (1964 et 1966) distingue par exemple dans les 1 000 premiers mètres, cinq eaux caractérisées par un maximum de salinité, ayant leur origine dans la Mer Rouge, dans le Golfe Persique ou dans la Mer d'Arabie, et quatre eaux riches en oxygène, venant des différentes zones de convergence (à 30° S, 40° S et 50° S) du sud de l'océan Indien,

⁽¹⁾ Ces données sont disponibles sur demande au Centre O.R.S.T.O.M. de Nosy-Bé.



Fig. 2. — Courants de surface dans l'ouest de l'océan Indien et dans le canal de Mozambique d'après a) Schott (1943), b) ANONYME (1960), c) DEFANT (1961), d) OVTCHINNIKOV (1961), e) MENACHE (1961), f) LEDNEV et MUROMTSEV (non publié), g) BOISVERT (1966).

ou de l'est (eau frontale, équatoriale). D'après SCHERBININ (1969), la région située entre 20°S et 5°S est une zone de brassage de toutes ces masses d'eau : c'est la « zone de transition équatoriale ». De plus, HAMON (1967), à partir de mesures de la salinité en continu, fait ressortir qu'à la configuration T-S principale se surajoute une structure à « moyenne échelle » extrêmement variable d'un point à un autre et pouvant donc masquer les caractères persistants si l'échantillonnage est discontinu.

Sur la figure 3, nous avons représenté les différentes masses d'eau et leur cheminement à travers le canal de Mozambique et jusqu'à 5° N, d'après les schémas

Cah. O.R.S.T.O.M., sér. Océanogr., vol. XI, nº 1, 1973: 97-113.

proposés par KIMITSA (1968) pour le canal de Mozambique et par IVANENKOV et GUBIN (1960) pour la zone comprise entre 10° S et 5° N dans l'ouest de l'océan Indien.

Pour ces auteurs, les masses d'eau en présence sont les suivantes :

(a) l'eau superficielle nord-équatoriale, de 80 à 100 mètres d'épaisseur, ayant une température entre 22° et 28 °C et une salinité voisine de 35,4 °/°.
Formée en surface en Mer d'Arabie, elle s'étend vers le sud jusqu'à la convergence dite « tropicale » par IVANENKOV et GUBIN, à 5° S.



Fig. 3. — Les masses d'eau, et leurs caractéristiques principales, dans l'ouest de l'océan Indien et dans le canal de Mozambique d'après KIMITZA (1968) et IVANENKOV et GUBIN (1960) : a) eau superficielle nord-équatoriale, b) eau superficielle sud-équatoriale, c) eau tropicale de surface, d) eau subsuperficielle subtropicale, e) eau subsuperficielle sud-équatoriale, f) eau nord-indienne profonde, g) eau intermédiaire sub-antarctique.

(b) l'eau superficielle sud-équatoriale, entre 5° S et 25° S, de 50 à 100 mètres d'épaisseur, amenée de l'est par le courant sud-équatorial, transformée par mélange avec les eaux sous-jacentes à la divergence de 8-12° S, et qui s'étend vers le sud du canal de Mozambique. Cette eau a une température supérieure à 25 °C et une salinité inférieure à 35,2 °/₀₀.

(c) L'eau tropicale de surface, provenant de la région des anticyclones sud-indiens vers $25-34^{\circ}$ S. Cette eau, de salinité supérieure à $35,5^{\circ}/_{00}$ à son origine, s'enfonce jusqu'à 300 mètres de profondeur et se glisse sous l'eau sud-équatoriale de surface jusqu'à 20° S. Elle est caractérisée par un maximum de salinité voisin de $35,5^{\circ}/_{00}$ et des teneurs en oxygène voisines de 4,2 ml/l.

(d) l'eau sub-tropicale sub-superficielle, formée dans la zone de la convergence sub-tropicale (40° S) à partir de l'eau sub-tropicale de surface et de l'eau sub-antarctique de surface. Dans le sud du canal de Mozambique, on trouve cette eau entre 400 et 1 000 mètres de profondeur; son épaisseur diminue vers le nord : à l'équateur, elle se trouve entre 100 et 300 mètres. Sa caractéristique principale est une teneur maximale en oxygène dissous : supérieure à 5 ml/l dans le sud, voisine de 3 ml/l à l'équateur. (e) l'eau sud-équatoriale sub-superficielle, entre 5° S et 20° S qui occupe la zone de transition entre les deux eaux précédentes au sud de la divergence sud équatoriale (10° S). Sa salinité est la même que celle de l'eau tropicale, mais elle s'en distingue par un minimum d'oxygène (teneur inférieure à 3 ml/l) bien accusé qui va en s'affaiblissant vers le sud où sa teneur est voisine de 3,6 ml/l.

(f) l'eau nord-indienne profonde, trouvée dès 300-400 mètres d'immersion au voisinage de l'équateur avec une salinité supérieure à $35^{\circ}/_{00}$ et une teneur en oxygène inférieure à 1.5 ml/l. Dans le canal de Mozambique, cette eau n'est rencontrée qu'à partir de 800-1 000 mètres d'immersion avec une salinité entre 34,70 et $34,85^{\circ}/_{00}$ et un minimum d'oxygène de 2,3 ml/l dans le nord du canal et de 3,2 ml/l dans le sud.

(g) l'eau intermédiaire sub-antarctique, dans l'est de Madagascar, remonte vers le nord jusqu'à 10° S, où elle est trouvée à 500 mètres de profondeur. Par contre, d'après KIMITSA, cette eau subantarctique ne dépasse pas 24° S dans le canal de Mozambique et se trouve à plus de 800-1 000 mètres de profondeur, avec une salinité de 34,50 à 34,65°/00 et une teneur en oxygène de 4,5 à 4,8 ml/l.

100



Fig. 4 a, b et c. — Distribution verticale de la température, de la salinité et de la densité, de 27 °S à l'équateur dans l'ouest de l'océan Indien.





Fig. 4 d et e. — Distribution verticale des teneurs en oxygène dissous et en nitrate, de 27 °S à l'équateur, dans l'ouest de l'océan Indien.

3. SITUATION HYDROLOGIQUE RENCON-TRÉE EN NOVEMBRE-DÉCEMBRE 1970

Les illustrations de la figure 4 représentent la répartition verticale des caractères hydrologiques et chimiques observés en novembre et décembre 1970 de 27° S à l'équateur entre 40° E et 49° E. L'examen détaillé de ces coupes verticales permet d'identifier les différentes masses d'eau rencontrées à cette époque et de les caractériser d'une façon plus précise, parfois différente de ce qui a été décrit dans le paragraphe précédent. Dans ce qui suit, on se référera à ces figures.

3.1. Les eaux superficielles

3.1.1. TRAITS GÉNÉRAUX

Dans la région étudiée, on peut définir comme

Cah. O.R.S.T.O.M., sér. Océanogr., vol. X1, nº 1, 1973: 97-113.

eau superficielle, l'eau ayant une température supérieure à 22° C, de salinité comprise entre 35,0 et $35,4^{\circ}/_{00}$, riche en oxygène, généralement sursaturée, avec un maximum de 4,7 à 5,0 ml/l vers 40 mètres de profondeur, et pauvre en sels nutritifs : la teneur en nitrate est inférieure à 0,1 matg/m³. Sa limite inférieure est le sommet de la zone à gradient maximum des diverses propriétés étudiées; ce gradient est plus intense dans la partie nord des coupes que dans la partie sud. L'épaisseur de cette couche superficielle est de 40 à 60 mètres dans le nord et de 80-100 mètres dans le sud.

3.1.2. Les différentes eaux superficielles

De l'équateur à 12°S, on peut distinguer, d'après la hauteur dynamique de la surface par rapport à 500 décibars (fig. 5) les courants superficiels suivants :

- le courant nord-équatorial, jusqu'à 2º S,

- le contre-courant équatorial de 2º S à 6º S,

— la branche nord du courant sud-équatorial de 6° S à 12° S.



Fig. 5. — Hauteurs dynamiques de la surface, et à 50 mètres d'immersion, par rapport à 500 décibars, de 12 °S à l'équateur. En pointillé : limites du contre-courant équatorial.

De l'équateur à 6° S, la salinité de l'eau superficielle est légèrement plus élevée (de l'ordre de $35,3^{\circ}/_{00}$) que plus au sud. C'est dans cette zone que naît le contrecourant équatorial, d'où l'impossibilité de distinguer par la salinité l'eau de ce courant de celle du courant

Cah. O.R.S.T.O.M., sér. Océanogr., vol. XI, nº 1, 1973: 97-113,

nord-équatorial. Appelons-la *eau superficielle équatoriale*, caractérisée à l'époque des observations par une salinité comprise entre 35,3% of et 35,5% of valeurs plus petites que ce qui est généralement observé durant la mousson de nord-est (SCHOTT, 1935 -IVANOV-FRANTSKEVICH, 1961), vraisemblablement parce que c'est le début de cette saison.

De 6ºS à 22ºS, on rencontre l'eau superficielle sud-équaloriale, sur 80-110 mètres d'épaisseur. C'est dans la partie nord de cette zone, de 6ºS à 11ºS, que l'on trouve l'eau la moins salée (minimum de 34,8º/oo) de toute la coupe présentée. Cette veine d'eau dessalée est probablement la veine centrale du courant sud-équatorial influencée par l'eau dessalée de l'est de Java (Rochford, 1967). Entre 12ºS et 22º S, dans le canal de Mozambique protégé des influences orientales par Madagascar, l'eau superficielle circulant en circuit fermé (cellules anticycloniques) ne subit pratiquement que des influences locales caractérisées par l'alternance d'une saison des pluies, de novembre à avril, et une saison sèche de mai à octobre. A l'époque de nos observations, en novembre, la salinité de cette eau dans le nord du canal est plus élevée (35,0 à 35,2%) que celle trouvée entre 8º S et 12º S; cela correspond au maximum de fin de saison sèche (Donguy et Piton, 1969). Par contre, en fin de saison des pluies, la salinité de l'eau superficielle peut descendre aux alentours de 34,5-34,7%/00 (PITON el al. 1968). L'examen de la salinité à ces différentes saisons dans le sud du canal d'après les résultats du Commandant Robert-Giraud et de l'Almirante Lacerda montre des variations saisonnières moins grandes, car les précipitations y sont plus faibles (SCHOTT, 1935). On pourrait appeler cette eau, eau superficielle du canal de Mozambique.

Entre 22° S et 27° S, on a une zone de mélange entre l'eau du canal de Mozambique et l'eau tropicale de surface plus salée $(35,5°/_{00})$ venant du sud, d'où une salinité variable, entre 35,1 et $35,4°/_{00}$.

Dans cette zone, la topographie dynamique de la surface par rapport à 500 décibars (fig. 6 *a*) montre un creux dynamique vers 26° S et 40° E, séparant un courant portant au sud-est d'un courant portant à l'ouest. On retrouve dans cette interprétation une grande ressemblance avec celle des résultats de la campagne du Cdt ROBERT-GIRAUD en octobrenovembre 1957 (fig. 6 *b*).

3.1.3. TRAITS PARTICULIERS

3.1.3.1. Les limites du contre-courant équatorial à 2° S et 7° S correspondent : la première à une zone de convergence, la seconde à une zone de divergence. Cette zone de divergence est caractérisée (fig. 7) par un net refroidissement de l'eau juste sub-superficielle (à 50 mètres d'immersion par exemple) et un enri-



Fig. 6. — Courants géostrophiques de surface dans le sud du canal de Mozambique : a) d'après les résultats du VAUBAN (par rapport à 500 décibars), b) d'après les résultats du Commandant Robert GIRAUD (par rapport à 1 000 décibars).



Fig. 7. — Température et teneurs en nitrate de l'eau à 50 mètres d'immersion, de 12 °S à l'équateur. En pointillé : limites du contre-courant équatorial. En tireté : courbe lissée.

Cah. O.R.S.T.O.M., sér. Océanogr., vol. XI, nº 1, 1973: 97-113.

chissement important en sels nutritifs. Cependant, à cette latitude, il n'a pas été trouvé (fig. 8) de fortes teneurs en chlorophylle a (teneurs maximales de l'ordre de 0,4 mg/m³), mais d'après RYTHER *el al.* (1966), on peut penser que cette zone est très productive.

3.1.3.2. Vers 17° S, un net refroidissement de l'eau (de l'ordre de 2 °C) a été enregistré au thermographe de surface entre les stations 30 et 32. On peut voir sur les coupes de la figure 4 que ce refroidissement est dû à une remontée d'eau enrichissant en même temps l'eau superficielle en sels nutritifs. Correspondant à cet enrichissement, des teneurs en chlorophylle *a* supérieures à 4 mg/m³, ont été trouvées vers 60 mètres de profondeur (fig. 8). Cette remontée peut être provoquée par le courant de reflux (portant au sud-ouest) de 1 à 2 nœuds, constaté d'après la dérive du bateau, et retrouvé par le calcul dynamique entre les stations 30 et 31.



Fig. 8. — Distribution verticale des teneurs en chlorophylle *a*, de 27 °S à l'équateur, dans l'ouest de l'océan Indien. En tireté : maximum mesuré.

3.2. Les eaux sub-superficielles

3.2.1. TRAITS GÉNÉRAUX

Au-dessous de la couche superficielle, et au-dessus de l'« eau intermédiaire », on trouve, sur une épaisseur de 100 à 200 mètres une couche d'eau ayant les caractères suivants :

-- un grand gradient vertical de température, entre 15 et 23 °C, plus grand dans le nord que dans le sud de la coupe,

— une salinité élevée, toujours supérieure à $35,2^{\circ}/_{00}$ avec un ou deux maximums, dépassant à peine $35,5^{\circ}/_{00}$ dans le sud,

— des teneurs en oxygène minimales, inférieures à 3.4 ml/l à l'équateur, à 4.6 ml/l à 25° S ,

— des teneurs en sels nutritifs élevées ou maximales : des valeurs de nitrate supérieures à 20 matg/ m³ peuvent être trouvées vers 120-140 mètres d'immersion à 5° S et supérieures à 13 matg/m³ vers 250 mètres à 20° C.

Par ses caractères extrêmes, cette couche subsuperficielle a une grande importance dans la structure des masses d'eau de l'ouest de l'océan Indien.

3.2.2. Les différentes eaux sub-superficielles

Occupant la couche entre 60 et 150 mètres d'immersion à l'équateur et celle située entre 100 et



Fig. 9. — Courbes T — S, T — O_2 et T — NO_3 les plus typiques de la zone située entre 8° S et l'équateur. Les chiffres inscrits près des courbes T-S sont les immersions des observations, en mètres.

Cah. O.R.S.T.O.M., sér. Océanogr., vol. XI, nº 1, 1973: 97-113.



Fig. 10. — Courbes T-S, T-O₂ et T-NO₃ de la station 2 (ÉQUATEUR 70), et à quelques stations effectuées dans le nord-est de Madagascar par le VAUBAN, le VITYAZ et l'ATLANTIS. Les chiffres inscrits près des courbes T-S sont les immersions des observations en mètres.

300 mètres à 17º S, on rencontre une eau caractérisée par un maximum de salinité et, à une immersion voisine, par un minimum d'oxygène : cette eau pourrait s'identifier à l'« eau sud-équatoriale subsuperficielle» de KIMITSA (1968), mais il semble douteux que son origine soit la divergence sud-équatoriale à 10° S. En effet, le minimum d'oxygène ne présente pas de solution de continuité bien nette depuis l'équateur et on ne voit pas pourquoi on fixerait à 5° S la limite nord de cette eau. Donguy et PITON (1969) lui attribuent une origine située en Mer d'Arabie; elle pourrait en effet correspondre à l'un des maximums identifiés par Rochford (1964), associé au minimum d'oxygène caractéristique des eaux sub-superficielles de la Mer d'Arabie. Cette eau sub-superficielle nord-équatoriale conserve ses caractéristiques jusqu'à 11°S : un maximum de salinité autour de 35,25 °/00 et un minimum d'oxygène inférieur à 3 ml/l, jusqu'à 11º S; les teneurs en nitrate croissent rapidement de 2 à 20 matg/m³. Les courbes T-S, T-O₂ et T-NO₃ de la figure 9, sont typiques de cette région.

On peut considérer que le minimum de salinité détecté légèrement au-dessus du maximum, de l'équateur à 11° S et jusqu'à 24° S, est la trace de la dilution des eaux superficielles à une autre époque de l'année. Dans la partie nord de la région étudiée, ce minimum peut ne pas exister et le caractère maximal de la salinité de l'eau sub-superficielle disparaître, lorsque la saison de mousson de nord-est est bien établie (résultats non publiés).

On trouve vers 11-12° S un front physico-chimique : grand gradient horizontal de température, de salinité, d'oxygène et de nitrate séparant le «système équatorial » du «système tropical » ou, comme le disent TCHERNIA et al. (1958), séparant l'océan Indien en une partie méridionale vraiment océanique et une partie septentrionale où prédominent les influences continentales.

Ce front est perturbé à 11°30' S (station 2 de la croisière ÉQUATEUR 70) : on y trouve en effet une eau légèrement plus chaude, plus salée, plus riche en oxygène et plus pauvre en nitrate que de part et d'autre, ce qui dessine une auge entre 100 et 300 mètres de profondeur dans le dessin des isoplèthes. La ressemblance des courbes T-S, T-O₂ et T-NO₃ de cette station 2 avec celles trouvées à quelques stations situées dans le nord-est de Madagascar (fig. 10) incite à penser qu'une eau d'origine différente venant de l'est de Madagascar et contournant le Cap d'Ambre débouche dans le système des masses d'eau du nord du canal de Mozambique. Cette eau, de par ses caractéristiques, serait d'origine tropicale, comme on le verra plus loin; on peut l'appeler eau tropicale de l'est de Madagascar.

De 12º S à 17º S, le minimum d'oxygène de l'eau équatoriale sub-superficielle persiste, quoique moins accusé (de l'ordre de 3,3 ml/l), soit par suite de mélange avec l'eau tropicale au passage à 11º S, soit par mélange vertical avec l'eau sous-jacente riche en oxygène. De même, le maximum de salinité se maintient autour de 35,3 º/oo. On a l'eau sub-superficielle nord-équatoriale du canal de Mozambique. DONGUY et PITON (1969), ont montré que dans cette région les caractères physico-chimiques des eaux au-dessous de 120 mètres de profondeur n'évoluaient pratiquement pas en cours d'année. Il semble que cette zone soit la plus calme de toute la région étudiée : c'est en effet celle où la structure verticale est la plus simple. On y retrouve toujours les courbes T-S, T-O, et T-NO, de la forme de celles indiquées sur la figure 11 a.

La partie comprise entre 17° S et 27° S est une zone de transition; en effet, en allant vers le sud et dès 17° S, on note vers 240 mètres de profondeur l'apparition d'un deuxième maximum de salinité de $35,3 \circ/_{00}$, très voisin donc du premier mais que l'on peut déceler jusqu'à 22° S. Dans toute cette zone à deux maximums de salinité distants verticalement de 60 à 120 mètres, la salinité augmente lentement jusqu'à une valeur voisine de $35,5 \circ/_{00}$.

A partir de 23° S, on ne retrouve plus qu'un seul maximum légèrement supérieur à 35,5 %.

Parallèlement, on note à 17° S, une augmentation importante (grands gradients verticaux) des teneurs en oxygène au-dessous du niveau du minimum, vers 300 mètres d'immersion, au point que l'on peut même déceler un maximum à 18-19° S vers 340 mètres de profondeur.

Entre 22° S et 24° S, l'épaisseur de la couche à minimum d'oxygène diminue nettement. A partir de 23° S, on trouve sous ce minimum un maximum d'oxygène coïncidant avec le maximum de salinité unique; ce maximum d'oxygène reste décelable jusqu'à 27° S, ou tout au moins, son action enrichissante reste importante jusqu'à cette latitude tandis que le minimum d'oxygène, au-dessus, s'estompe peu à peu. Pour expliquer cette structure, nous pouvons émettre l'hypothèse suivante : nous assistons à la rencontre de deux eaux,



Fig. 11. — Courbes T-S, T-O₂ et T-NO₃ les plus typiques du canal de Mozambique. Les chiffres inscrits près des courbes T-S sont les immersions des observations, en mètres.



Fig. 12. — Distribution verticale de la température, la salinité, la densité, des teneurs en oxygène dissous et en nitrate dans le sud du canal de Mozambique à 39 ºE.

— l'une, que nous avons appelée « eau sub-superficielle nord-équatoriale du canal de Mozambique » diffusant vers le sud, caractérisée par un maximum de salinité de 35,3 °/₀₀ et un minimum d'oxygène de 3,4 ml/l,

— l'autre, pouvant être identifiée à l'eau tropicale de KIMITSA (1968), ou « eau du 30° degré sud » (TCHERNIA et al., 1951), ou « eau de la ceinture à haute salinité de 30-35° S » de ROCHFORD (1967). Cette eau sub-superficielle tropicale est un peu plus salée (35,5 °/oo), sa teneur en oxygène plus élevée (et parfois maximale autour de 4,6 ml/l) et en nitrate plus petite que celle de l'« eau sub-superficielle du canal de Mozambique ». Elle passe au-dessous de celle-ci dans l'est du canal de Mozambique mais dans le milieu du canal, on voit (fig. 12) que ces deux eaux semblent se rencontrer avec moins de mélange : on a un front physico-chimique vers 23° S, plus net au milieu du canal de Mozambique gue sur son bord est.

On trouve donc de part et d'autre de ce front deux types de courbes T-S, T-O₂ et T-NO₃ :

— un premier type trouvé entre 17° S et 22° S caractérisé (fig. 11 b) par deux maximums de salinité et un maximum peu marqué d'oxygène, entre deux minimums,

— un second type, entre 24° S et 27° S, caractérisé (fig. 11 c) par un seul maximum de salinité, et un maximum d'oxygène plus net que précédemment entre deux minimums.

3.2.3. TRAITS PARTICULIERS

(a) L'« eau tropicale » remonte, d'après Roch-FORD (1967) beaucoup plus nord du côté est de

Cah. O.R.S.T.O.M., sér. Océanogr., vol. XI, nº 1, 1973: 97-113.



Fig. 13. — Distribution verticale de la température, la salinité, des teneurs en oxygène dissous et en nitrate au voisinage de l'équateur, à 48°30 E.

Madagascar que du côté ouest, Sur la figure 11 présentée par cet auteur, on peut voir que le cheminement du maximum de salinité caractéristique de



Fig. 14. — a) Immersion, en mètres de l'isopycne $\sigma t = 26.8$; b) Évolution de la valeur du maximum intermédiaire d'oxygène de l'eau centrale indienne, de 27° S à l'équateur.

cette eau coupe le méridien 49° E à 11° de latitude sud, ce qui est exactement conforme à nos observations, de même que l'immersion (200 m) et la valeur (35,4°/₀₀) de ce maximum.

(b) On retrouve à l'équateur, entre 50 et 120 mètres de profondeur, ce qui pourrait être la trace physico-chimique du contre-courant équatorial sub-superficiel (« equatorial undercurrent ») décrit en particulier par TAFT (1967) : éclatement de la thermocline, maximum de salinité correspondant au maximum de vitesse zonale portant à l'est, écartement des isoplèthes d'oxygène et de nitrate (fig. 13). En fait, ce contre-courant n'a auparavant été observé de façon certaine et durable (mesures directes) qu'en fin de mousson de nord-est (SWALLOW, 1969) c'est-àdire en mars-avril, et de façon intermittente en février (IVANOV, 1964). Mais d'après TAFT (1967), ce courant semble très « variable » d'une année à l'autre et même d'un mois à l'autre.

(c) Il faut noter enfin que la remontée d'eau à 17° S intéresse surtout l'eau sub-superficielle : les isoplèthes de température, d'oxygène et de nitrate remontent d'une centaine de mètres. KIMITSA (1968) a déjà signalé une remontée d'eau profonde à l'approche du plateau continental au large du cap Saint-André, mais plus au nord, vers 15° S.

3.3. Les eaux intermédiaires

Notre étude étant limitée à 600 mètres d'immersion, les eaux intermédiaires en présence sont l'« eau centrale indienne » et l'« eau de la mer d'Arabie ».

L'eau centrale indienne, ainsi appelée par SVERDRUP et al. (1942), est caractérisée par un maximum d'oxygène presque toujours trouvé sur l'isopycne $\sigma t =$ 26,8. L'immersion de ce maximum est voisine de 550 mètres vers 25° S et de 300 mètres à l'équateur, et sa teneur en oxygène passe de 5,2 ml/l au sud à 3,2 ml/l au nord (fig. 14).

De 27° S à 10° S dans tout le canal de Mozambique cette eau est trouvée dès 300 mètres d'immersion et occupe toute la couche jusqu'à 600 mètres de profondeur, immersion maximale de nos observations.

A 11°30'S, compliquant encore la structure du front physico-chimique déjà signalé plus haut, on note vers 500 mètres d'immersion, des teneurs maximales d'oxygène supérieures à 4,8 ml/l, plus élevées que celles trouvées à ce niveau un peu plus au sud (4,3 ml/l) durant toute l'année (Donguy et Piton, 1969). Il semble que, comme pour l'« cau sub-superficielle », l'« eau centrale indienne » à cet endroit vienne de l'est de Madagascar par le nord du Cap d'Ambre. Cette eau a la même origine que celle trouvée à l'ouest, mais elle est restée plus riche



Fig. 15. — Courbes T-S et T-O₂ typiques de la zone de transition (8-10 °S) à l'est de la zone étudiée (stations du VITYAZ). Les chiffres inscrits près des courbes T-S sont les immersions des observations, en mètres.

en oxygène parce qu'elle est plus jeune; elle a vraisemblablement moins subi l'influence de l'eau équatoriale dans son trajet vers le nord.

Au nord de 10° S, l'épaisseur de la couche d'eau centrale indienne diminue et sa limite inférieure remonte jusqu'à 300 mètres de profondeur, sa limite supérieure étant alors à 150 mètres. Le maximum d'oxygène s'atténue progressivement vers le nord mais ne disparaît pas; nous ne retrouvons pas à 48°30 E, à l'époque de nos observations, la structure appelée par MOKIEVSKAIA (1961) et SCHCHERBININ (1969) « équatoriale de transition » caractérisée par la disparition du maximum d'oxygène et une grande

Cah. O.R.S.T.O.M., sér. Océanogr., vol. XI, nº 1, 1973: 97-113.

homogénéité verticale en salinité (autour de $34,90 \circ/_{00}$) et en oxygène (autour de 2,5 ml/l); cette eau de transition serait trouvée à travers l'océan Indien entre 15° S et 6-7° S. IVANENKOV et GUBIN (1960) ne l'ont pas non plus mis en évidence sur leur coupe allant de 64° S-90° E jusqu'au cap Gardafui, passant dans notre zone d'étude par 60-62° E. En fait, il semble que cette structure soit plus nette à l'est de 68° E qu'à l'ouest. En effet, les meilleures exemples de courbes T-S et T-O₂ du type « transition » (par opposition à celle du type « équatoriale » et à celle du type « tropicale ») à 54° E et à 68° E (fig. 15 *a* et 15 *b*) montrent un maximum de salinité supérieur à



Fig. 16. — Distribution verticale des teneurs en oxygène dissous entre 15 °S et 5 °S, à 54 °E à droite et 68 °E à gauche d'après les résultats du VITYAZ.



Fig. 17. --- Schéma des masses d'eau dans l'ouest de l'océan Indien et dans le canal de Mozambique en novembre-décembre 1970.

 $35,2 \circ/_{00}$ et des teneurs en oxygène relativement homogène, autour de 2,3 ml/l à 68° E, de 3,0 ml/l à 54° E. Sur les coupes verticales d'oxygène à 68° E et 54° E (fig. 16 *a* et 16 *b*) on voit que l'influence de l'« eau centrale indienne », riche en oxygène, se fait sentir jusqu'à 8° S, limite située plus au nord que celle qui serait trouvée à l'est de 68° E. A 48°30 E, on trouve encore des teneurs en oxygène supérieures à 3,4 ml/l au proche voisinage de l'équateur. Il y a donc dissymétrie entre l'est et l'ouest de l'océan Indien, comme le fait remarquer Ivanov-Frantskevitch (1961).

On peut cependant noter qu'à la longitude de nos observations et au nord de 11° S, les isohalines sont légèrement plus écartées que plus au sud, la station représentant le mieux cette structure de transition étant la station située à 5° S (fig. 9 c).

Au nord de 8° S, on trouve sous cette « eau centrale indienne », à partir de 500 mètres de profondeur à

8º S et à partir de 300 mètres à l'équateur, l'eau de la mer d'Arabie ainsi appelée par TCHERNIA et al. (1961), ou « eau de la Mer Rouge » (SVERDRUP, 1946), caractérisée sur notre coupe par de basses teneurs en oxygène (inférieures à 3 ml/l), et une salinité supérieure à 35,0 % à l'équateur qui diminue en allant vers le sud, au contact de l'eau antarctique intermédiaire, dont on trouve la trace (salinité - inférieure à 34,8 º/00), à partir de 500 mètres de profondeur entre 8º S et 11º S. L'«eau de la mer d'Arabie» s'enfonce sous cette « eau antarctique » et Donguy et PITON (1969) ont trouvé, à 130 S dans le canal de Mozambique, le maximum de salinité vers 1 200 mètres de profondeur, tandis que le minimum de salinité de l'eau antarctique intermédiaire est à 800 mètres. Clowes et Deacon (1935) considèrent également que cette eau est présente jusqu'au nord du canal de Mozambique.

4. CONCLUSION

La description détaillée des différentes masses d'eau observées en novembre et décembre 1970 aboutit au schéma de la figure 17 rassemblant tous les types d'eau qui ont été retenus.

Les différences essentielles avec celui de la figure 3 sont :

(1) la mise en évidence au nord et au nord-ouest de Madagascar d'une eau sub-superficielle et intermédiaire venant de l'est en contournant le cap d'Ambre et en compliquant le front trouvé à cette latitude (11°30' S),

(2) l'hypothèse que l'eau sub-superficielle à maximum de salinité, et à minimum d'oxygène, vient du nord de l'océan Indien et non d'un mélange d'eau à 10° S, cette eau faisant sentir son influence jusqu'à 27° S.

(3) l'extension jusqu'à 8° S de l'influence de l'eau antarctique intermédiaire.

Les diverses particularités signalées dans cet article (fronts, divergence, remontées d'eau) appellent des études ultérieures plus fines et saisonnières; elles constituent le programme de travail du VAUBAN dans les années à venir.

Manuscrit reçu au S.C.D. le 25 août 1972.

BIBLIOGRAPHIE

- ANONYME, 1960. Summary of oceanographic conditions in the Indian Ocean. U.S. Nav. Oceanogr. Off. Washington, SP 53.
- ANONYME, 1966. Atlas of Pilot charts, South Pacific and Indian Ocean. U.S. Oceanogr. Off. Washington, H.O. Pub. nº 107.
- BOISVERT (W. E.), 1966. Ocean currents in the Arabian sea and north west Indian Ocean. U.S. Nav. Oceanogr. Off. Washington, SP 92.
- CLOWES (A. J.), DEACON (G. E. R.), 1935. The deep water circulation of the Indian Ocean. Nature, vol. 136 : 936-938.
- CREPON (M.), 1965. Circulation superficielle dans l'Océan Indien. Résultats des mesures faites à l'aide d'un G.E.K. entre 1955 et 1963. Cah. Océanogr., vol. 17, suppl. nº 3 : 221-241.
- DEFANT (A.), 1961. Physical oceanography. Pergamon Press, vol. 1, 729 p.
- 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., vol. 7, nº 2: 3-26.

Cah. O.R.S.T.O.M., sér. Océanogr., vol. XI, nº 1, 1973: 97-113.

- HAMON (B. V.), 1967. Medium scale temperature and salinity structure in the upper 1550 m in the Indian Ocean. Deep Sea Res., vol. 14, nº 2 : 169-181.
- IVANENKOV (V. N.), GUBIN (F. A.), 1960. Water masses and hydro-chemistry of the western and southern parts of the Indian Ocean. Trans. Mar. Hydrophysical Inst., vol. 22: 33-115.
- IVANOV (Y. A.), 1964. Hydrological investigations of the northern part of the Indian Ocean. Trud. Inst. Okeanol., vol. 64 : 22-42.
- IVANOV-FRANTSKEVICH (G. N.), 1961. Some features of hydrological structure and of the water masses in the Indian Ocean. Okeanol Issled., nº 4 : 7-17.
- KIMITSA (V. A.), 1968. On water masses and hydrochemistry of the Mozambique strait. Okeanol Issled., nº 19: 180-188.
- MAGNIER (Y.), PITON (B.), CITEAU (J.), 1972. Observations physico-chimiques faites par le VAUBAN dans l'Océan Indien, de novembre 1970 à mars 1971. Centre O.R.S.T.O.M. de Nosy-Bé, doc. nº 26 (multigr.).

- MENACHE (M.), 1961. Découverte d'un phénomène de remontée d'enux profondes au sud du Canal de Mozambique. Mém. Inst. Scient. Madagascar, t. 4, sér. F : 167-173.
- MOKIEVSKAJA (V. V.), 1961. Some hydrochemical features of the northern part of Indian Ocean. Okeanol Issled., nº 4: 50-61.
- OVCINNIKOV (I. M.), 1961. Circulation of waters in the northern part of the Indian Ocean during the winter monsoon. Okeanol Issled., nº 4 : 18-24.
- PITON (B.), PRIVE (M.), TERAY (A.), 1968. Résultats des observations physicochimiques des croisières 6814 et 6823 du VAUBAN. Centre O.R.S.T.O.M. de Nosy-Bé, Doc. nº 1 (multigr.).
- ROCHFORD (D. J.), 1964. Salinity maxima in the upper 1 000 metres of the north Indian Ocean. Aust. J. Mar. Fresh. Res., vol. 15, nº 1 : 1-24.
- ROCHFORD (D. J.), 1966. Source regions of oxygen maxima in intermediate depths of the Arabian sea. Aust. J. Mar. Fresh. Res., vol. 17, nº 1 : 1-30.
- ROCHFORD (D. J.), 1967. The phosphate levels of the major surface currents of the Indian Ocean. Ausl. J. Mar. Fresh. Res., vol. 18, nº 1 : 1-22.

- RYTHER (J. H.), HALL (J. R.), PEASE (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 Oceanogr., vol. 11, nº 3 : 371-380.
- SCHOTT (G.), 1935. Geographie des Indischen und Stillen ozeans. Verlay Von C. Boysen, Hamburg, 413 p.
- SHCHERBININ (A. D.), 1969. Water structure of the equatorial Indian Ocean. Oceanology, vol. 9, nº 4 : 487-495.
- SVERDRUP (H. U.), JOHNSON (M. W.), FLEMING (R. H.), 1946.
 The oceans, their physics, chemistry and general biology. Prentice-Hall, Inc. New York, 1087 p.
- SWALLOW (J. C.), 1969. Recent physical oceanographic work in the Indian Ocean. N.I.O. Collect. reprints, vol. 17, nº 715.
- TAFT (B. A.), 1967. Equatorial undercurrent of the Indian Ocean, 1963. Stud. Trop. Oceanogr., nº 5 : 3-14.
- TCHERNIA (P.), LACOMBE (H.), GUIBOUT (P.), 1958. Sur quelques nouvelles observations hydrologiques relatives à la région équatoriale de l'Océan Indien. Bull. Inf. COEC, année X, nº 3 : 115-143.
- TCHERNIA (P.), LEFLOCH (J.), LACOMBE (M.), 1951. Contribution à l'étude de l'Océan Indien et du secteur adjacent de l'Océan Antarctique. Bull. Inf. COEC, année III, nº 10: 414-419.