

LES EAUX INTERMÉDIAIRES ANTARCTIQUES DANS L'ATLANTIQUE INTERTROPICAL

Jean LE FLOG'H et Jacques MERLE

Professeur à l'Université de Bretagne Occidentale — Maître de recherches à l'O.R.S.T.O.M.

RÉSUMÉ

Cette étude est une tentative d'utilisation des données historiques obtenues jusqu'ici dans l'Atlantique Intertropical au niveau de l'eau Antarctique Intermédiaire. Nous avons essayé de calculer d'abord le coefficient de diffusion virtuel vertical et ensuite de décrire d'un point de vue quantitatif la distribution des propriétés hydrologiques. L'idée d'une distribution spatiale reflétant les variations temporelles de la salinité et de la température à l'origine (convergence antarctique) est confirmée ici. Les variations saisonnières de la circulation des eaux Antarctiques Intermédiaires sont aussi examinées à l'aide des mêmes données historiques.

ABSTRACT

This paper is an attempt to use all the historical data obtained, up till now, in the intertropical Atlantic, at the level of the Antarctic Intermediate water. We have tried first to calculate the vertical eddy coefficient of diffusion and afterwards to describe under a quantitative point of view the distribution of the hydrological properties. The idea of a spatial distribution reflecting the time dependant variations of salinities and temperatures at the "origin" (antarctic convergence) is assented here. The seasonal variations of the circulation of the antarctic intermediate water are also investigated through all the historical data.

1. INTRODUCTION. QUELQUES PROPRIÉTÉS DES EAUX ANTARCTIQUES INTERMÉ- DIAIRES DANS L'ATLANTIQUE INTERTRO- PICAL

Le schéma général de la circulation méridienne dans l'Atlantique est bien connu dans ses grandes lignes... Au niveau des eaux de type intermédiaire antarctique les travaux de WUST (1936) et DEFANT (1941) restent les principales références. Outre l'aspect général des mouvements dans le sens méridien, WUST avait présenté une carte de la distribution des minimums de salinités (que nous reproduisons sous forme modifiée (fig. 1). Cette carte nous servira de terme de comparaison. Il en sera de même de la carte de DEFANT correspondant aux courants à 800 mètres déduits de la topographie absolue de la

surface 800 décibars (cartes reproduites dans le traité d'océanographie physique de DEFANT 1961).

Ces résultats complètent donc le schéma méridien en donnant la distribution spatiale des minimums de salinité et des courants associés.

Une remarque à ce propos : la définition de la limite Nord d'extension des eaux intermédiaires antarctiques, ou plutôt de la limite en salinité à partir de laquelle l'on peut considérer leur influence comme négligeable avait été définie par DEFANT et WUST par l'isohaline 34,95 ‰. Ceci conduit à admettre que l'influence des eaux intermédiaires antarctiques devient pratiquement nulle vers 25° N.

Le problème de cette limite d'influence peut être reconsidéré sur des points de détail mineurs. Il est bien évident que dans l'hémisphère Nord le système de circulation observé à 800 mètres se rattache surtout au grand système de circulation anticyclo-

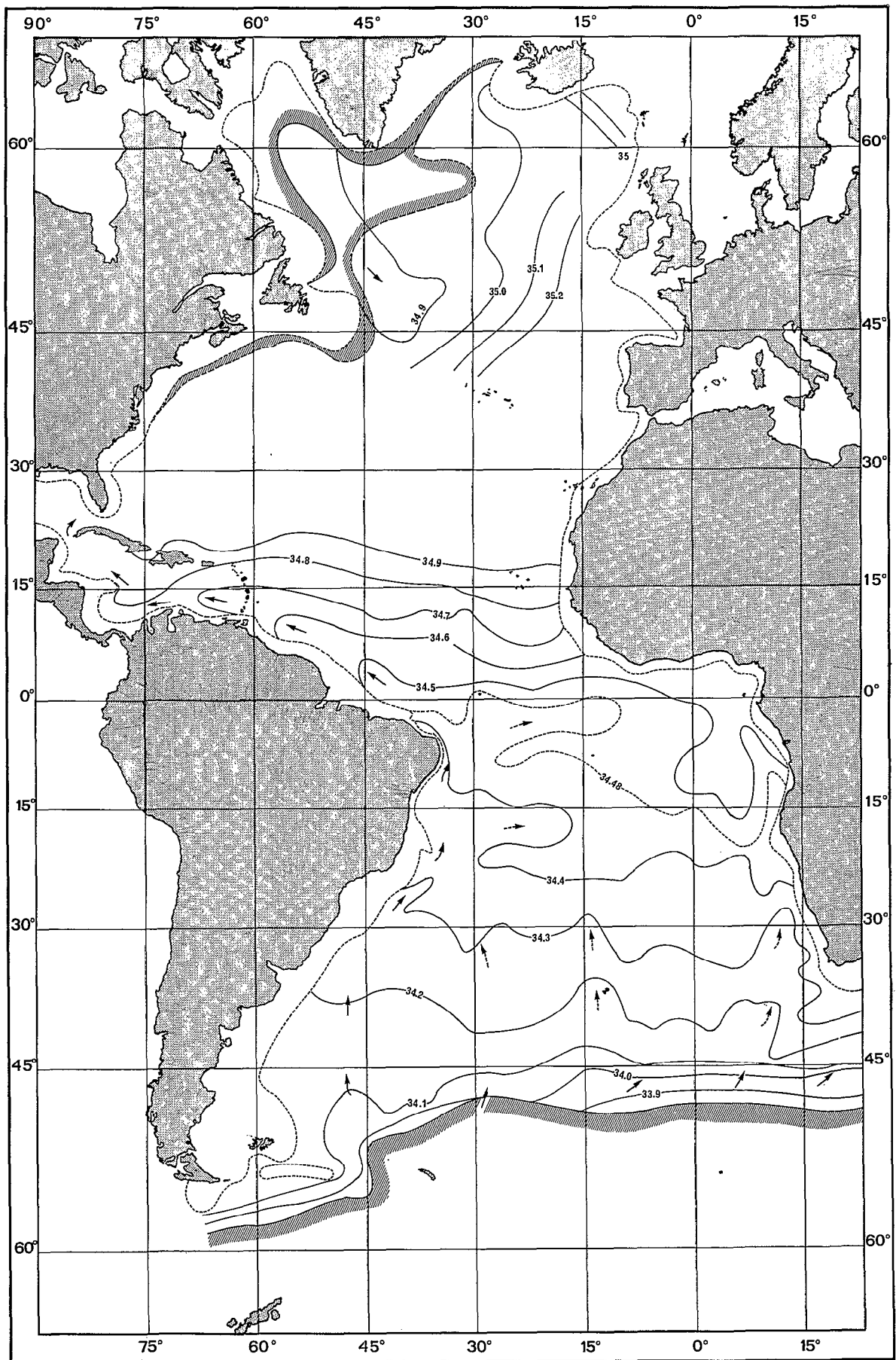


Fig. 1. — Distribution des salinités au niveau antarctique intermédiaire d'après Wusr.

nique auquel s'associe le Gulf Stream. Mais il n'est pas inutile à ce propos de rappeler le schéma proposé par SVERDRUP dans son traité d'océanographie, schéma faisant apparaître une influence d'eau intermédiaire antarctique vers le Nord au-delà de la limite adoptée par WUST. Dans le même ordre d'idées, l'examen de la distribution des propriétés dans l'Atlantique Est-tropical a conduit LE FLOCH (1973) à considérer qu'au Sud des Canaries subsistait une légère influence des eaux d'origine antarctique, ce qui repousserait la limite où l'on décèle celles-ci à 35,10 ‰. Il faut bien reconnaître que ceci est un peu conventionnel mais justifié toutefois par des considérations dynamiques.

Bien entendu, plus au Nord et dans le secteur Est de l'Océan, le minimum observé n'est en fait qu'induit par la présence de la nappe d'origine méditerranéenne qui s'étend au-dessous des eaux centrales Nord-Atlantique et n'a rien à voir avec une quelconque influence d'origine antarctique.

Les résultats résumés ci-dessus ont été déduits de séries de mesures ou de campagnes océanographiques isolées. Il est apparu intéressant de considérer l'ensemble de toutes les mesures réalisées dans l'Atlantique intertropical jusqu'à ce jour. Ceci permet de reprendre l'étude de la distribution des propriétés des eaux antarctiques intermédiaires à partir d'un fichier historique global où interviennent toutes les mesures disponibles.

L'étude présente est basée sur le fichier des données N.O.D.C. et porte sur la zone intertropicale 25° N-25° S; nous disposons au total d'environ 8.000 stations de mesures océanographiques. Ces stations ont été classées par mailles de 2 degrés de côté. Nous avons, dans chacun des carrés ainsi définis, déterminé les valeurs moyennes du minimum de salinité et des propriétés associées :

profondeur
température
teneur en oxygène.

Nous nous proposons dans cette étude de présenter quelques résultats sur les points suivants :

1° — Donner une image de la répartition des caractéristiques moyennes des eaux antarctiques intermédiaires dans l'Atlantique intertropical.

2° — Rechercher une interprétation en termes de mélange des structures observées. En particulier essayer de mettre en évidence les effets de mélange avec les eaux sus-jacentes (sub-tropicales) et les eaux sous-jacentes (profondes), et les influences relatives de ces masses d'eaux au niveau de la couche à minimum de salinité. Ceci concerne les effets de diffusion turbulente verticale. Il faut y ajouter le problème des mélanges latéraux.

3° — A partir des cartes moyennes présentées, essayer de déduire un schéma de circulation et

préciser quantitativement les conditions des processus de mélange (calcul de la diffusion « virtuelle »).

2. LES DONNÉES ET LEUR TRAITEMENT

DONNÉES

Les données sont extraites du fichier général des stations hydrologiques du N.O.D.C.

Ces données appartiennent à toutes les croisières répertoriées par le N.O.D.C. jusqu'au mois de juillet 1971 et couvrent la zone allant de 25° N à 25° S et de 60° W à la côte africaine. Il nous est difficile ici de répertorier l'ensemble de ces croisières dont le nombre est voisin de 250. Notons cependant que parmi celles-ci figurent certaines campagnes bien connues telles que : celle du *Météor*, l'ensemble des données obtenues de 1957 à 1959 présenté dans l'Atlas de FUGLISTER et l'importante série des données Équalant.

TRAITEMENT*

Les stations ont été réparties par carreaux de 2 degrés de côté. Pour chacune de ces stations la valeur du minimum de salinité a été extraite, ainsi que les propriétés associées : Immersion, Température, Teneur en oxygène. A l'intérieur de chaque carreau on a calculé la moyenne de ces valeurs :

— Moyenne saisonnière pour les 2 saisons principales : juillet, août, septembre d'une part et janvier, février, mars d'autre part.

— Moyenne générale annuelle.

Une formule de lissage horizontal a été appliquée tenant compte pour chaque carreau des valeurs obtenues dans les 8 carreaux voisins en séparant les 4 carreaux adjacents des 4 carreaux diagonaux.

Cette formule est la suivante :

$$T' = T + A_1 \sum_{i=1}^4 (T - P_i) + A_2 \sum_{i=1}^4 (T - Q_i)$$

Q ₁	P ₁	Q ₂
P ₄	T	P ₂
Q ₄	P ₃	Q ₃

T' est la valeur lissée pour le carreau traité.

T est la valeur non lissée du carreau traité.

(*) Ces moyennes sont extraites d'une étude plus générale faite par J. MERLE en vue de présenter l'atlas de la distribution générale des propriétés de l'Atlantique intertropical.

P_i sont les valeurs des carreaux adjacents.
 Q_i sont les valeurs des carreaux diagonaux.
 A_1 est un coefficient de lissage qui a été pris égal à 0,06.
 $A_2 = 0,7 A_1$.

Le lissage est d'autant plus énergique que le coefficient A_1 a une valeur plus élevée. La détermination de A_1 a été empirique. Notons que cette formule de lissage est généralement employée pour de multiples itérations. Il est donc nécessaire qu'elle converge, ce qui impose une limite supérieure au coefficient A_1 . Nous n'avons procédé ici qu'à une seule itération et le coefficient A_1 a été le même pour le lissage des 3 champs : salinité, température, oxygène.

3. UNE APPROCHE PRÉLIMINAIRE

Le travail que nous présentons ici a pour origine quelques tentatives faites principalement sur la circulation méridienne à partir de quelques données des séries Équalant en vue de tester quelques idées.

Ces essais préliminaires ont porté d'abord dans deux directions :

- La distribution méridienne des propriétés, étudiée en relation avec la circulation.
- Les effets de mélange verticaux et le calcul de la diffusion turbulente.

Voyons rapidement le premier aspect qui est un peu décevant lorsque l'on se limite à la circulation méridienne mais conduit toutefois à des résultats si l'on passe à la distribution spatiale des propriétés.

On peut imaginer l'hypothèse suivante :

Il est admis que les eaux intermédiaires antarctiques ont pour caractéristiques T-S à leur origine :

$$S = 33,80 \text{ ‰} \quad T = 2^{\circ} 20'$$

Il est raisonnable de penser qu'au cours de l'année et au niveau de la convergence antarctique les caractéristiques T-S des eaux puissent varier suivant un rythme saisonnier autour de cette valeur. L'on pourrait même aller plus loin et imaginer avec SVERDRUP (1942) que les eaux intermédiaires antarctiques, qui constituent à leur origine une eau-type « sont formées de façon continue ou *intermittente* près de la convergence où elles s'enfoncent ».

A l'opposé de cette façon de voir concernant un hypothétique rythme saisonnier, l'on peut aussi penser que la zone de convergence se déplace en latitude suivant un balancement lié à l'alternance hiver-été et que de ce fait, les caractéristiques T-S d'origine de l'eau type restent constantes. Nous

n'avons pas fait de recherche bibliographique dans ce sens et nous nous placerons dans l'hypothèse d'éventuelles variations saisonnières de l'eau type intermédiaire antarctique dans la zone de convergence; ces variations pouvant d'ailleurs porter sur d'autres caractéristiques que la température et la salinité : l'oxygène par exemple.

Examinons alors si cette façon de voir, présentée au seul titre d'une éventuelle possibilité, permet d'interpréter les distributions observées des propriétés, au niveau intermédiaire antarctique, dans l'Atlantique intertropical. En effet les variations saisonnières « à l'origine » de telle ou telle propriété devront se reproduire spatialement et se traduire dans le sens méridien (si l'on prend un schéma simplifié) par une série de maximums et minimums. Si l'on admet que la vitesse du courant au niveau considéré se situe entre 3 et 10 cm/s, c'est-à-dire 9 à 27° par année en latitude, il « suffirait » donc de représenter la distribution méridienne d'une propriété, bien choisie, pour avoir un aperçu des vitesses du courant dans la couche d'influence maximale intermédiaire antarctique.

Jusqu'à présent, les cartes représentant la distribution des minimums de salinité, celle de WUST par exemple, ne font pas apparaître une telle succession de maximums et minimums relatifs, mais il faut noter qu'elles ont été établies à partir d'un réseau de stations à grands pas d'espace dans le sens méridien, alors qu'une tentative de vérification de l'hypothèse examinée nécessite la mise en évidence de variations relativement faibles au sein de l'évolution générale. Ceci réclame évidemment une densité de points d'observation importante.

Les premiers essais faits dans ce sens ne portaient que sur un schéma de circulation méridien, mais ont conduit à une recherche plus approfondie dont les résultats sont encourageants, et finalement à la tentative d'analyse globale que nous présentons ici.

Pour cette première approche, les mesures Équalant I et Équalant II séparées d'environ 6 mois laissaient espérer l'obtention d'une représentation spatiale des variations saisonnières « à l'origine ». Dans le sens méridien, un décalage de l'ordre de 4 à 13° suivant la vitesse du courant était attendu; et comme nous l'avons dit, c'eût été un moyen de préciser cette vitesse.

La première tentative, et la plus simple dans ce sens consistait à utiliser le minimum de salinité représentatif de l'influence maximale des eaux intermédiaires antarctiques. Un essai sur les données « Crawford » à 25° W et sur celle de l'« Explorer » à 15° W (mars et février 1963) ne conduit à aucun résultat dans le sens espéré. A noter toutefois une salinité pratiquement constante de 10° Sud à l'équateur dans le cas des mesures Crawford (mars 1963)

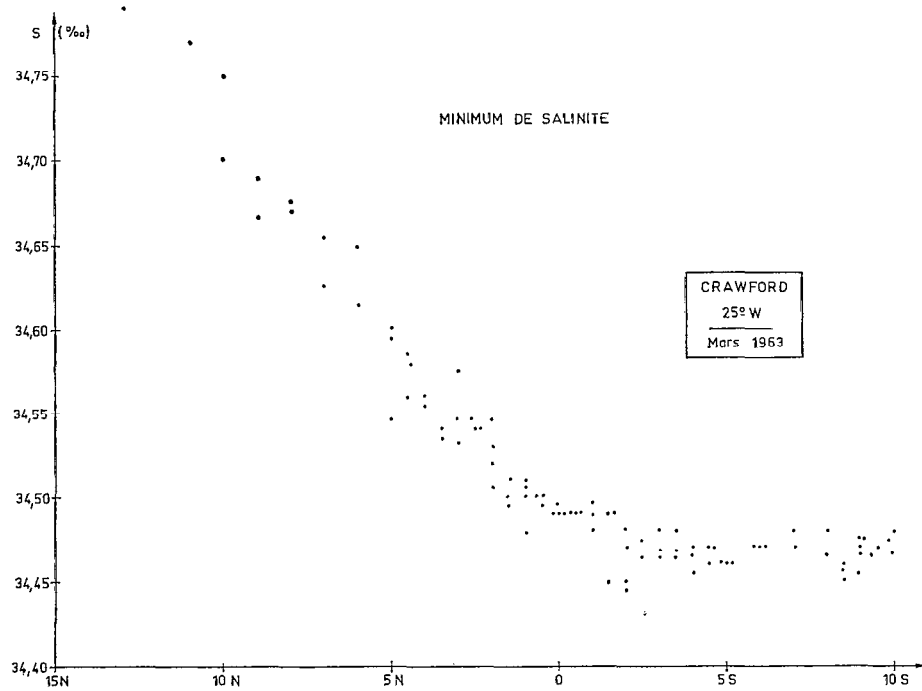


Fig. 2. — Variation en fonction de la latitude de la salinité au niveau antarctique intermédiaire d'après les données de la croisière CRAWFORD.

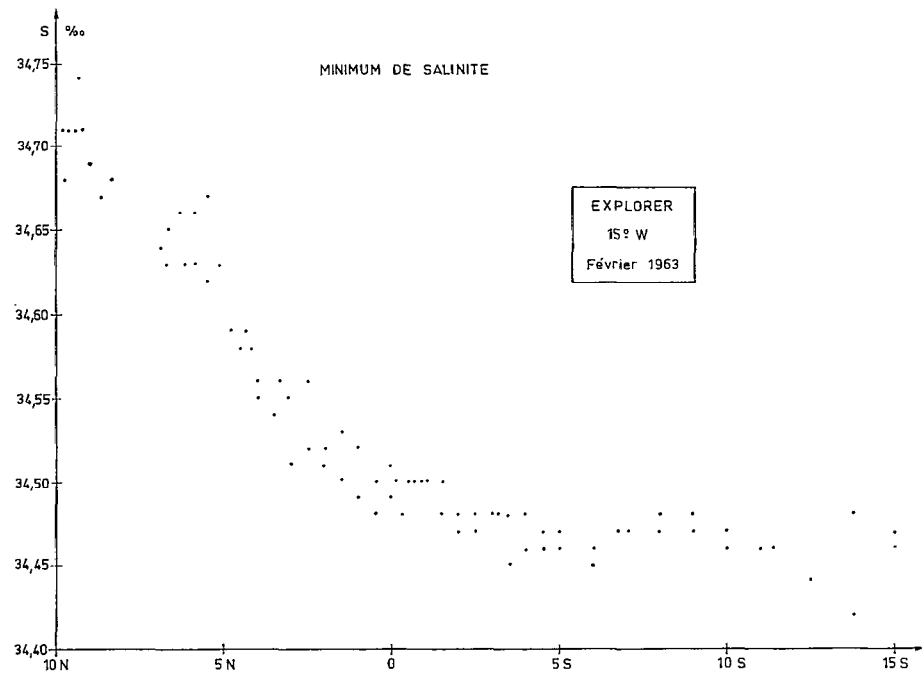


Fig. 3. — Variation en fonction de la latitude de la salinité au niveau antarctique intermédiaire d'après les données de la croisière EXPLORER

et de 15° Sud à 3° Sud pour les mesures « Explorer » (février 1963). Dans l'un et l'autre cas, cette salinité se situe au voisinage de 34,47 ‰. Mais aussi dans les deux cas l'on remarque une nette augmentation de la salinité dans le sens méridien vers le Nord à partir de l'équateur (fig. 2 et 3) : ainsi le minimum de salinité atteint environ 34,70 ‰ vers 10° de latitude Nord. Nous n'insistons pas ici sur ces résultats d'ailleurs négatifs eu égard au but poursuivi, car nous y reviendrons de façon plus précise à propos de la distribution spatiale des propriétés.

Sur 25° W la série de mesures « Crawford » de mars 1963 fait apparaître un maximum vers 2° Sud (seul maximum existant entre 10° Sud et 10° N). Une comparaison avec les mesures « Casco » effectuées 5 mois plus tard en août sur le même méridien permettait donc de tester l'hypothèse émise précédemment; et cette comparaison envisagée de ce point de vue n'est pas concluante : l'on observe comme dans le cas précédent un « palier » voisin en moyenne de 3,5 ml/l entre 10°00 Sud et 2° Nord et ensuite, plus au Nord, une décroissance rapide jusqu'à 10° N confirmant ce qui a été dit précédemment à propos de la distribution méridienne des salinités. Mais aucun maximum relatif vraiment significatif n'apparaît et surtout les décalages de « phase » attendus ne peuvent être mis en évidence.

Le problème de l'interprétation du maximum de teneur en oxygène sur la coupe de mars 1963 reste posé et semble bien, compte tenu de ce que nous venons de constater, ne pouvoir être interprété qu'en faisant intervenir la composante zonale de la circulation au niveau considéré. Nous examinons ce point dans ce qui suit.

Pour en rester provisoirement à l'aspect méridien de la circulation, voyons ce que donnent les résultats auxquels nous avons fait allusion ci-dessus quant aux conditions de mélange. Cette façon de voir a été utilisée autrefois, en particulier pour essayer d'obtenir un ordre de grandeur des mouvements verticaux en partant des distributions moyennes zonales en températures et salinités et en se donnant les valeurs des coefficients de diffusion virtuelle dans le sens méridien et le sens vertical. Ceci a pour inconvénient le fait que ces coefficients sont encore mal connus et qu'il importe plus d'essayer de les calculer que d'utiliser des valeurs quelque peu contestables pour définir des schémas de circulation.

En outre, l'utilisation de moyennes zonales n'est pas très réaliste étant donné le caractère dissymétrique de la circulation méridienne dans l'Atlantique.

Restant dans le domaine d'une approche préliminaire et partant des données de température et salinité sur 25° W quelques utiles indications sont obtenues en se plaçant dans le cas simple du seul

mélange turbulent vertical. Dans ces conditions et en supposant que le mouvement s'effectue dans le sens Sud-Nord, l'on a, en salinité :

$$U \frac{\delta S}{\delta x} + W \frac{\delta S}{\delta z} = A \frac{\delta^2 S}{\delta z^2}$$

Ceci avec les conventions habituelles :

U : composante de la vitesse horizontale vers le Nord;

W : composante verticale de la vitesse (Axe des z vers le bas);

A : coefficient de viscosité virtuelle verticale.

Puisque nous nous plaçons au niveau du minimum intermédiaire de salinité,

$$\frac{\delta S}{\delta z} = 0.$$

Dans ces conditions, l'équation précédente nous conduira à une relation entre A et U.

Au même niveau (S minimum) si l'on considère les transferts thermiques, l'on a :

$$U \frac{\delta T}{\delta x} + W \frac{\delta T}{\delta z} = A \frac{\delta^2 T}{\delta z^2}$$

en admettant que la valeur de A soit la même pour la relation en S et la relation en T (ce qui est une hypothèse d'ailleurs contestable). Ici, il faut tenir compte de la composante verticale de la vitesse, puisque $\frac{\delta T}{\delta z}$ ne s'annule pas à ce niveau.

Ce qui nous conduit à 2 équations pour lesquelles il y a 3 inconnues : U, W et A.

Nous avons vu que l'équation en S conduit à :

$$U \frac{\delta S}{\delta x} = A \frac{\delta^2 S}{\delta z^2}$$

c'est-à-dire : $A = K(x) U$

$$\text{avec : } K(x) = \frac{\frac{\delta S}{\delta x}}{\frac{\delta^2 S}{\delta z^2}}.$$

D'autre part, d'après l'équation en T :

$$\frac{\delta T}{\delta x} + \frac{W}{U} \frac{\delta T}{\delta z} = \frac{A}{U} \frac{\delta^2 T}{\delta z^2}$$

$$\frac{\delta T}{\delta x} + \frac{W}{U} \frac{\delta T}{\delta z} = K \frac{\delta^2 T}{\delta z^2}$$

On peut donc déduire de ce qui précède :

— Les relations entre A et U à différentes latitudes.

— Les valeurs de $\frac{W}{\bar{U}}$ aux mêmes latitudes :

$$\frac{W}{\bar{U}} = \frac{\frac{\frac{\delta S}{\delta x}}{\delta z^2} \frac{\delta^2 T}{\delta z^2} - \frac{\delta T}{\delta x}}{\frac{\delta T}{\delta z}}$$

Il faut tout de même un moyen de contrôle, et celui-ci existe. En effet, si l'on admet que le mouvement au niveau du minimum de salinité d'origine antarctique suit la topographie de ce minimum (nous nous plaçons toujours dans le cas schématique d'une circulation méridienne), alors :

$$\frac{W}{\bar{U}} = \frac{\Delta z}{\Delta x}$$

Cette relation faisant intervenir seulement la pente dans le sens Sud-Nord de la surface correspondant au minimum de salinité.

Quelques calculs numériques ont été faits à ce sujet. Nous en résumons ci-dessous les résultats :

Pour le facteur k :

φ	K
8° N	4,8
4° N	3,35
0°	2,48
4° S	0,27
8° S	0,10

Si nous introduisons ces résultats dans l'équation représentant les transferts thermiques, nous en déduisons les valeurs de $\frac{W}{\bar{U}}$. Celles-ci sont les suivantes :

φ	$\frac{W}{\bar{U}}$
8° N	2,43.10 ⁻⁴
4° N	0,29.10 ⁻⁴
0°	0,91.10 ⁻⁴
4° S	-0,21.10 ⁻⁴
8° S	-0,04.10 ⁻⁴

Ces résultats sont-ils valables en ce qui concerne la relation $A = KU$?

Il suffit pour le vérifier de comparer les valeurs de

$\frac{W}{\bar{U}}$ calculées ci-dessus à celles déduites de la topographie de la surface de salinité minimale comme nous l'avons indiqué précédemment. Voyons ce que donne cette comparaison :

φ	$\frac{W}{\bar{U}}$ calculé	$\frac{W}{\bar{U}}$ observé
8° N	2,43.10 ⁻⁴	1,2.10 ⁻⁴
4° N	0,29.10 ⁻⁴	0,9.10 ⁻⁴
0°	0,91.10 ⁻⁴	0
4° S	-0,21.10 ⁻⁴	-0,45.10 ⁻⁴
8° S	-0,04.10 ⁻⁴	-0,17.10 ⁻⁴

Compte tenu des approximations adoptées, cette comparaison apparaît bonne.

L'on peut donc penser que les valeurs A déduites de :

$$A = KU$$

doivent être assez représentatives sous réserve toutefois d'avoir une bonne approximation sur U.

On ne peut espérer obtenir ici U que par un calcul géostrophique, aux limites Nord et Sud de notre domaine, avec une surface de référence soigneusement déterminée. Les résultats obtenus de ce côté n'ayant pas été très convaincants, nous avons adopté — pour simplifier — les indications numériques présentées par Wustr (1949), c'est-à-dire :

- 8° N : 4 cm/s vers le N
- 4° N : 4 cm/s vers le N
- 0° : 4 cm/s vers le N
- 4° S : 6 cm/s vers le N
- 8° S : 8 cm/s vers le N

On peut alors calculer les valeurs correspondantes de A et les valeurs de W résultantes et comme précédemment comparer ces dernières à celles qui se déduisent de la topographie de la couche de salinité minimale et des grandeurs adoptées pour U.

φ	U	A cgs	W calculé	W observé
8° N	4	19	+ 9,7.10 ⁻⁴	+ 4,8.10 ⁻⁴
4° N	4	13	+ 1,2.10 ⁻⁴	+ 3,6.10 ⁻⁴
0°	4	10	+ 3,6.10 ⁻⁴	0
4° S	6	1,6	- 1,3.10 ⁻⁴	- 2,7.10 ⁻⁴
8° S	8	0,8	- 0,3.10 ⁻⁴	- 1,4.10 ⁻⁴

L'on notera la variation importante du coefficient A en fonction de la latitude, ce qui rejoint les résultats des observations ici présentées : variation brutale de la distribution méridienne des salinités à partir de l'équateur (Fig. 4).

Le fait d'arriver à ces valeurs numériques donnant une interprétation satisfaisante est encourageant

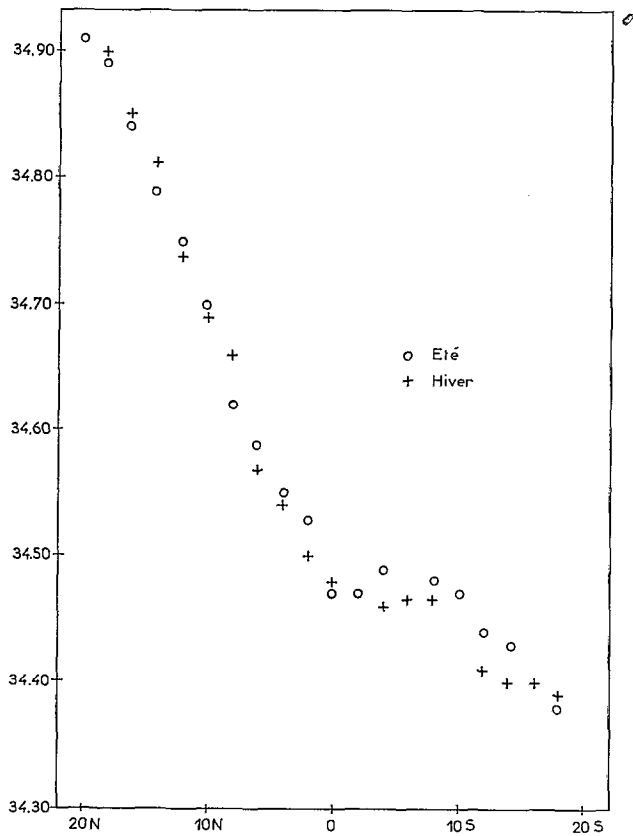


Fig. 4. — Évolution du minimum moyen de salinité antarctique intermédiaire en fonction de la latitude dans les régions équatoriales atlantiques.

mais il reste à essayer de préciser comment se forment ces processus de mélange et pourquoi A croît avec les latitudes croissantes. C'est ce que nous allons essayer d'examiner dans ce qui suit en considérant cette fois la distribution spatiale des propriétés au voisinage du minimum de salinité d'origine antarctique.

4. DISTRIBUTION DES PROPRIÉTÉS DES EAUX ANTARCTIQUES INTERMÉDIAIRES

4.1. Salinité

Passons maintenant à la représentation des résultats obtenus à partir du traitement de l'ensemble des données historiques.

La figure 5 montre la répartition des moyennes annuelles de la salinité au niveau du minimum antarctique intermédiaire.

Nous présentons ici quelques commentaires d'une part sur l'aspect général des résultats obtenus, d'autre part sur les détails mis en évidence.

1° ASPECT GÉNÉRAL

Si l'on s'en tient à l'allure globale de la distribution des salinités, on note que les valeurs numériques extrêmes : 34,90 vers 18° N côté Est-34,30 vers 30° S, sont sensiblement voisines des valeurs trouvées par WUST (fig. 1). La carte que nous présentons est toutefois plus détaillée (espacement des isolignes 0,02 ‰) grâce au grand nombre de stations utilisées; notons cependant que dans le secteur Sud, la densité des stations reste relativement modeste.

En ce qui concerne l'aspect général du tracé des isohalines, on constate :

— L'orientation des isohalines est généralement zonale, surtout au Nord de l'équateur; au Sud de l'équateur et en particulier au Sud du Golfe de Guinée, cette distribution est toutefois plus complexe. Sur le bord ouest de l'océan, au Nord et surtout au Sud de l'équateur, on note un infléchissement des isohalines vers le Nord.

— Il existe un contraste très marqué du gradient méridien de salinité entre les zones Nord et Sud de la région étudiée, l'équateur apparaissant ici comme une frontière très nette : le gradient méridien est de l'ordre de 0,02 ‰ par degré au Nord tandis qu'à l'extrême Sud, il tombe à 0,01 ‰. Dans la zone intermédiaire entre 0 et 15° Sud, ce gradient est beaucoup plus faible, mais il est difficile de donner une valeur moyenne, étant donné la plus grande complexité du tracé des isohalines.

2° QUELQUES POINTS DE DÉTAIL

Puisqu'il s'agit ici d'une moyenne annuelle, certains maximums ou minimums relatifs isolés et de faibles extensions observés en particulier dans la partie occidentale de l'Atlantique Sud ne sont vraisemblablement pas significatifs; cependant, certaines distributions à beaucoup plus grandes extensions semblent bien constituer un caractère dominant de la distribution moyenne des propriétés; nous faisons allusion ici au tracé de l'isohaline 34,48 ‰ qui dessine :

— une langue à minimum intermédiaire de salinité vers 4° S, orientée vers l'Est;

— une langue à maximum intermédiaire de salinité vers 7° S orientée vers l'Ouest.

En outre, au Sud du Golfe de Guinée, une langue à maximum marquée par l'isohaline 34,52 ‰ est orientée en direction du Sud; avec un noyau isolé de salinité relative maximale. La même isohaline 34,52 ‰ met en évidence plus à l'Est une avancée vers le Nord d'eaux relativement moins salées. Ces derniers résultats semblent bien significatifs, eu égard

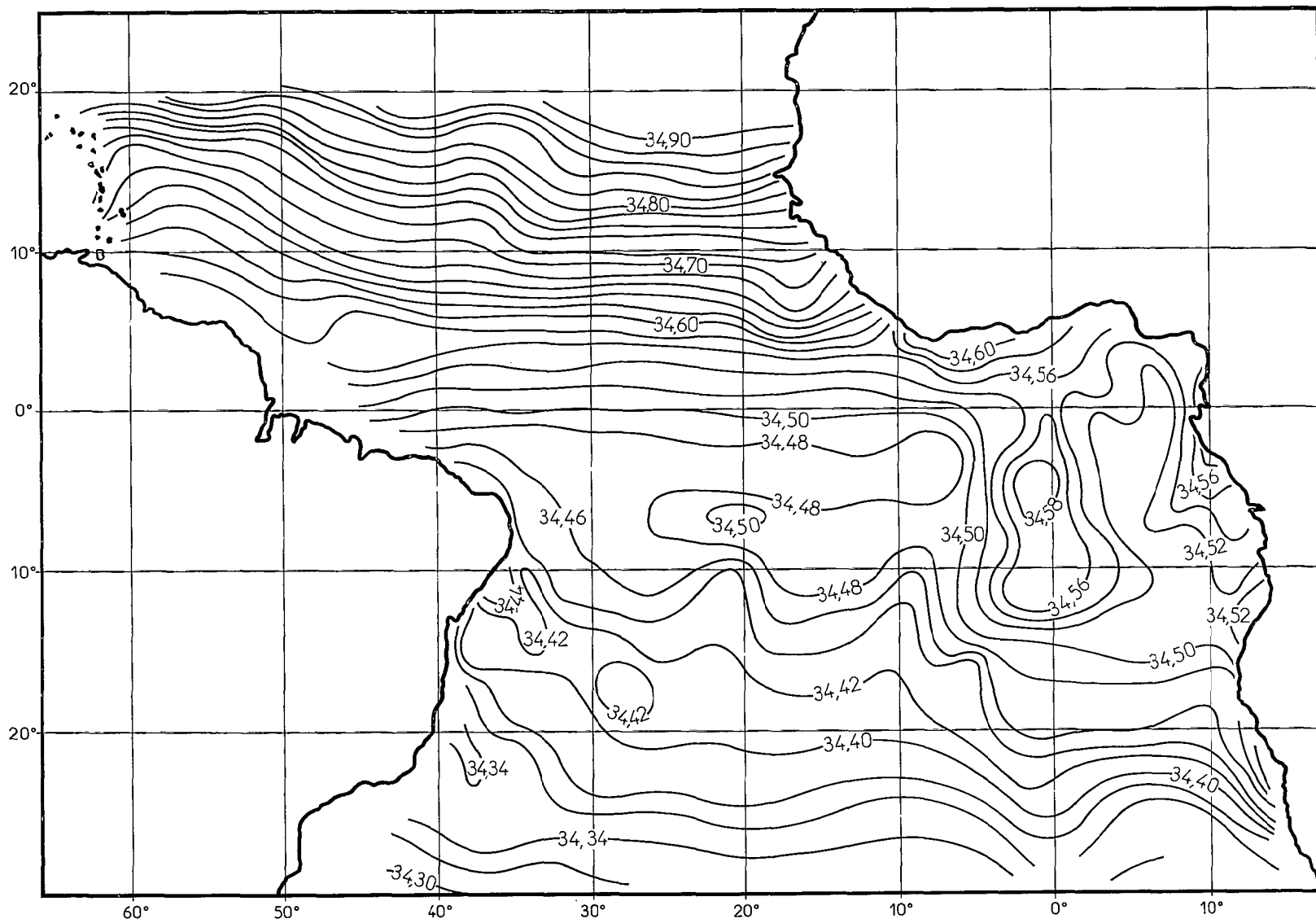


Fig. 5. — Distribution moyenne annuelle de la salinité au niveau des eaux antarctiques intermédiaires.

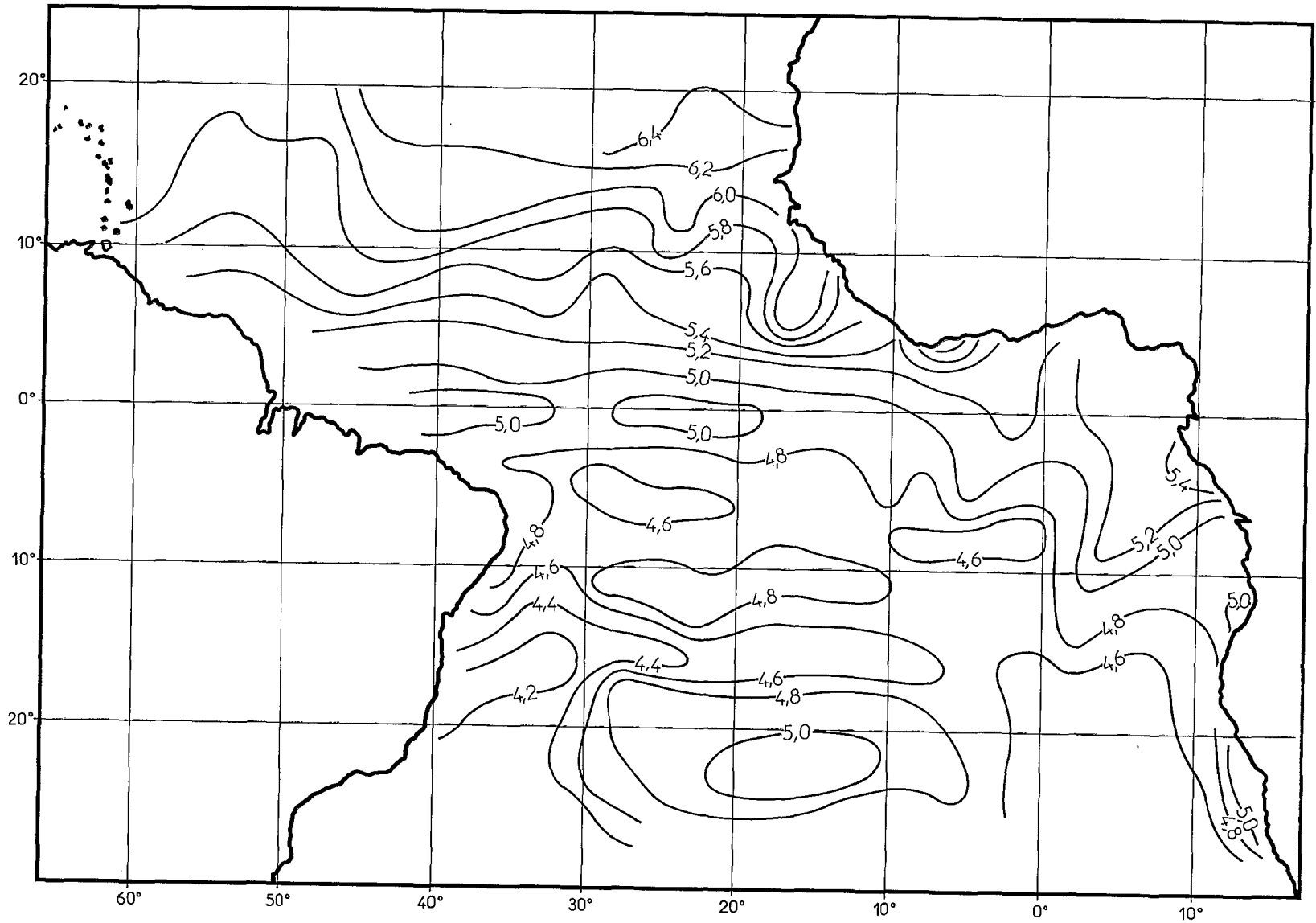


Fig. 6. — Distribution moyenne annuelle de la température au niveau des eaux antarctiques intermédiaires.

à la densité de stations disponibles dans le secteur considéré. Il faut noter que ces résultats recourent en les précisant ceux obtenus antérieurement par Wüst (fig. 1) sauf en certains secteurs, par exemple, vers 15° S, où des détails mis en évidence par Wüst ne sont pas confirmés.

4.2. Température

La figure 6 représentant la température associée au minimum de salinité des eaux antarctiques intermédiaires, montre une répartition de la température apparemment plus complexe que la répartition des salinités décrite précédemment.

Ici encore, nous distinguerons d'une part l'aspect général et d'autre part, quelques détails significatifs.

1° ASPECT GÉNÉRAL

— Pour l'ensemble de la zone considérée, les températures sont comprises entre les valeurs extrêmes 4°2 au Sud et 6°4 au Nord;

— au Nord de l'équateur, les températures sont supérieures à 5° 0; au Sud de l'équateur au contraire, les températures sont en général inférieures à 5° 0 C excepté dans la zone comprise entre le méridien origine, la côte africaine, 10° S et l'équateur où les températures peuvent atteindre 5° 4;

— l'orientation des isothermes est généralement zonale; on note cependant au Sud de l'équateur une alternance de dômes et de creux thermiques alors qu'au Nord de l'équateur, au contraire, les températures croissent régulièrement en direction du Nord.

2° POINTS DE DÉTAIL

Comme pour la salinité, nous ne considérerons comme significatifs que les caractères des distributions à grande extension. Parmi les plus remarquables de ceux-ci, nous notons :

— une langue à basse température relative (inférieure à 4° 6), s'étendant le long du parallèle 18° S depuis la côte brésilienne jusqu'au voisinage du méridien 0.

— Une autre langue à basse température relative, moins marquée cependant que la précédente s'étend au voisinage du parallèle 7° S; les températures correspondantes sont encore voisines de 4° 6.

— Un 3° minimum relatif de température (inférieur à 5° 0 C) se situe au voisinage du parallèle 3° N.

— Ces 3 minimums relatifs isolent naturellement 3 zones à maximums relatifs. Le plus au Sud situé vers 20° S atteint la température de 5° 0 C; le maximum intermédiaire situé au voisinage de 10° S atteint 4° 8 C; enfin un 3° maximum relatif est centré sur l'équateur même et atteint 5° C.

— Notons encore que ces alternances zonales de minimum et de maximum relatifs ne s'étendent pas vers l'Est au-delà du méridien 0. Ainsi entre le méridien 0 et la Côte Africaine au fond du Golfe de Guinée, on observe une zone à températures relatives élevées, dépassant 5° 2 C et même 5° 4 C.

Toutefois, il faut remarquer que dans le secteur Sud-Est, le tracé de l'isotherme 4° 6 C met en évidence une extension vers le Nord d'une langue qui rejoint les eaux de mêmes caractéristiques situées vers 7° S.

4.3. Oxygène

La figure 7 représente la distribution de la quantité d'oxygène dissous au niveau du minimum de salinité correspondant aux eaux antarctiques intermédiaires.

La distribution générale de la teneur en oxygène met en évidence 2 axes correspondant à des teneurs maximales situés vers 3-5° S et 15° S qui semblent assez représentatifs de la circulation si l'on tient compte des schémas déduits de la température et de la salinité.

Par contre les valeurs minimales observées sur les bords Est de l'Océan (vers 15° N et 10° S) ne semblent pas représentatives du mouvement des eaux antarctiques intermédiaires mais seraient à relier à des effets de diffusion verticale avec des eaux sus-jacentes pauvres en oxygène.

4.4. Essais de synthèse

Il s'agit d'interpréter les moyennes annuelles. Si nous acceptons l'hypothèse de travail concernant l'effet des variations saisonnières sur la distribution spatiale des propriétés, on devrait s'attendre à ce que celles-ci soient effacées par effet de moyenne; il est évident que :

1° les moyennes étant faites à partir de données inégalement réparties dans le temps; il subsiste des inégalités non significatives qui pourraient conduire à des erreurs d'interprétation;

2° d'autre part, il est vraisemblable que la circulation elle-même subit des variations saisonnières, et dans ce cas notre raisonnement précédent concernant un lissage sur les moyennes annuelles est en défaut.

Il faut bien cependant à partir des données disponibles essayer de présenter un schéma de circulation moyen.

Faisons une synthèse des distributions observées de la salinité de la température et de l'oxygène.

Un schéma de circulation déduit de la distribution des salinités minimales, des températures associées et des teneurs en oxygène dissous observées aux mêmes niveaux conduit aux remarques suivantes :

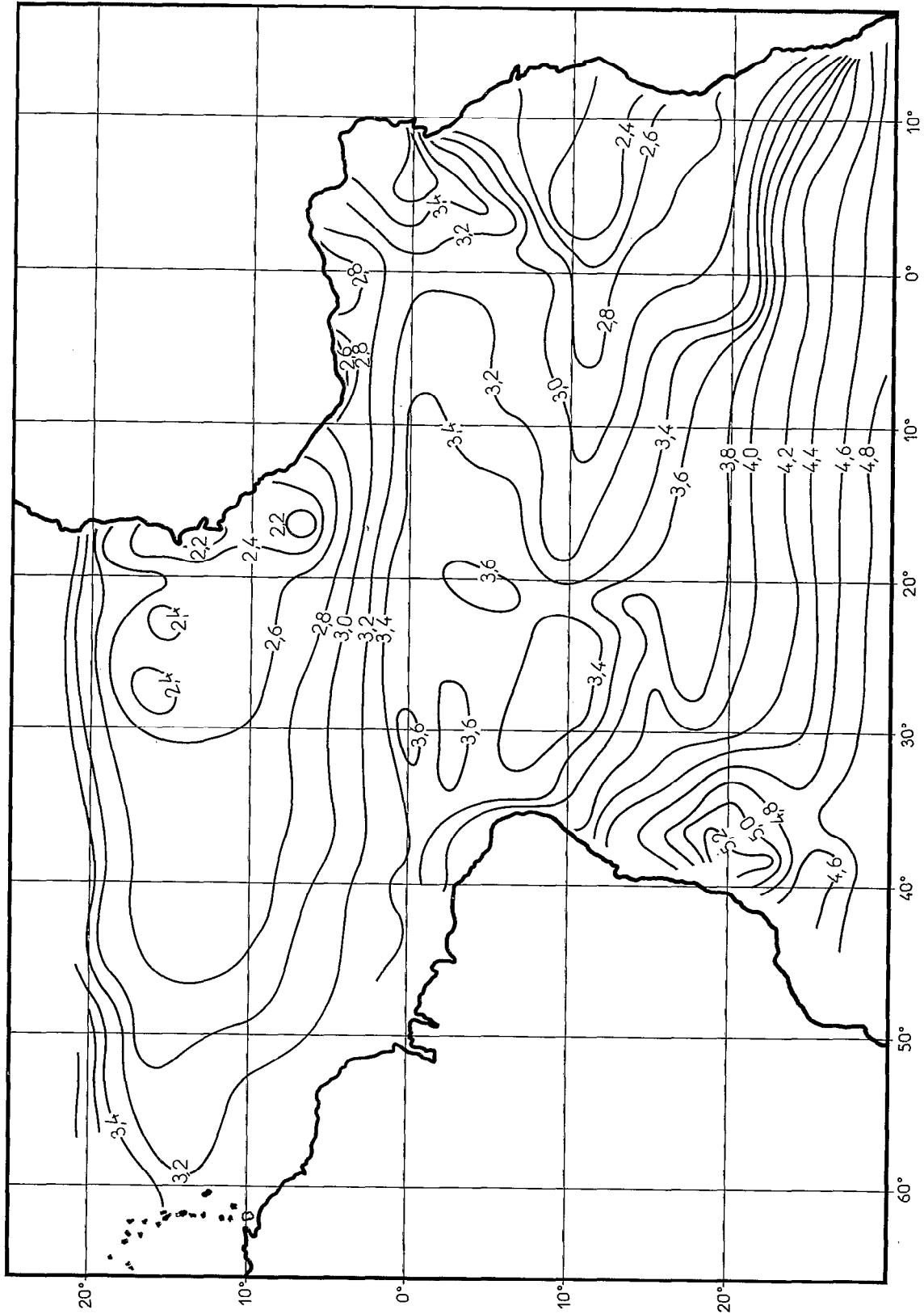


Fig. 7. — Distribution moyenne annuelle de la teneur en oxygène au niveau des eaux antarctiques intermédiaires.

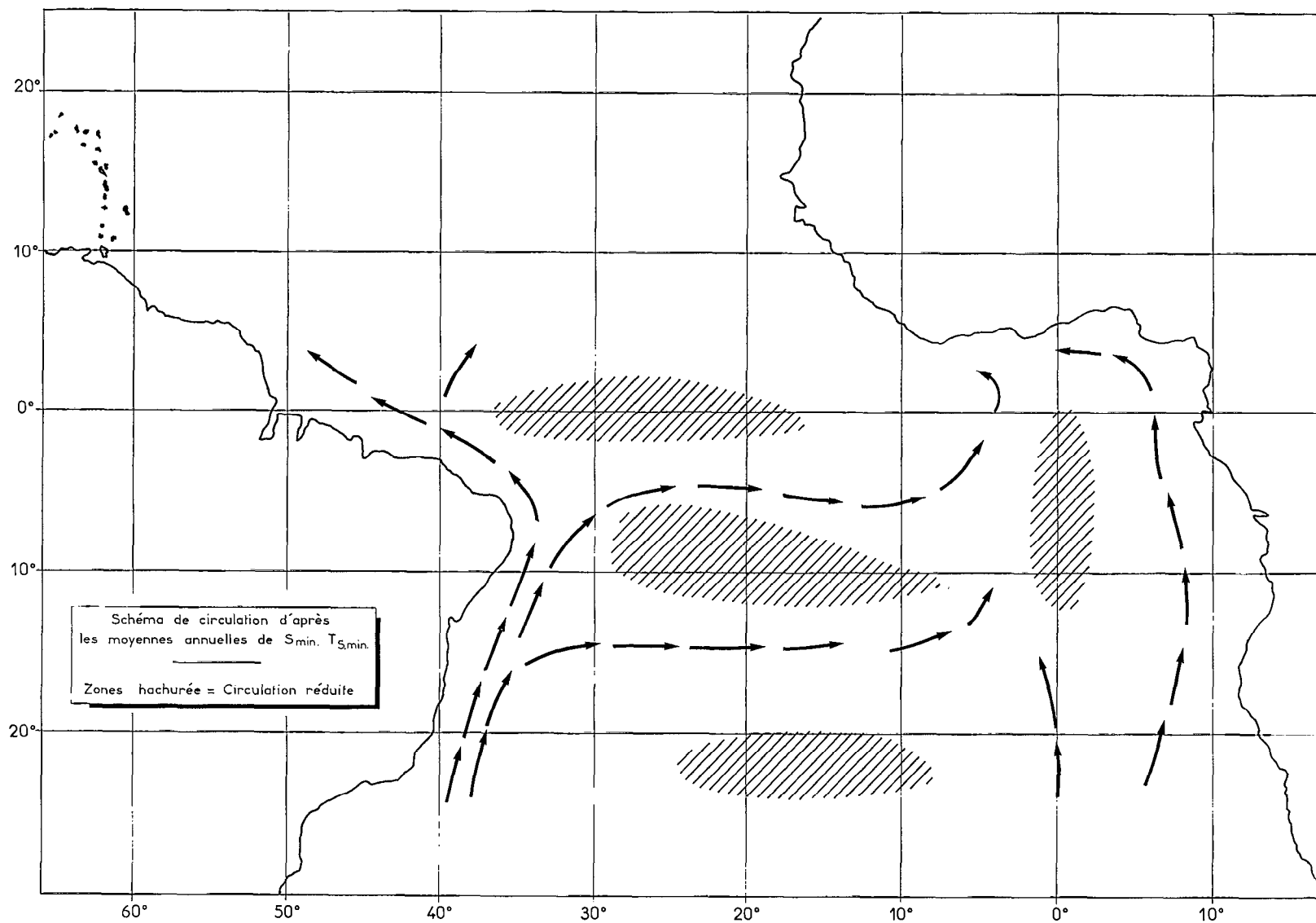


Fig. 8. — Schéma de circulation moyen.

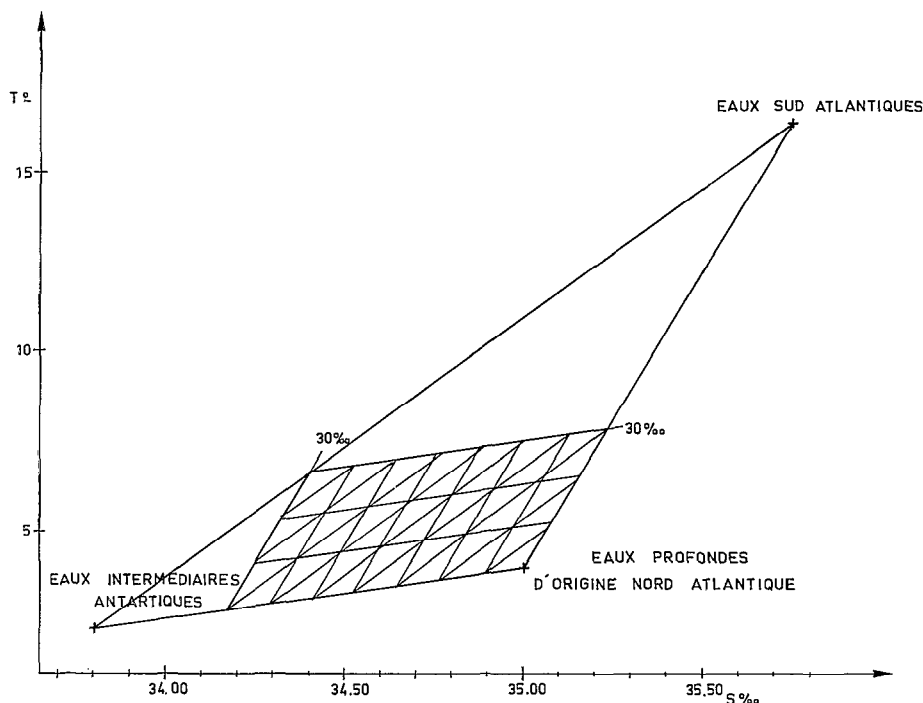


Fig. 9. — Triangle de mélange.

La distribution des températures et salinités fait apparaître des zones stagnantes légèrement décalées; l'existence de ces zones à circulation réduite est corroborée en partie par la distribution des teneurs en oxygène où il apparaît en particulier une zone à minimum dans le secteur Sud-Est qui correspond en partie à la région où le mouvement intermédiaire antarctique paraît relativement atténué; il faut noter qu'au Nord de l'équateur, la distribution zonale des isohalines et des isothermes ne soulève pas les problèmes d'interprétation que nous venons d'évoquer. Il apparaît toutefois que le mouvement préférentiel des eaux intermédiaires antarctiques s'effectue sur le bord ouest de l'Océan. La figure 8 constitue une tentative de synthèse de ces différents résultats.

Nous nous sommes plus particulièrement intéressés ici au secteur situé au Sud de 5° N où les contrastes dans la distribution spatiale des propriétés sont extrêmement marqués. Au contraire au Nord, la distribution zonale des propriétés ne permet pas de distinguer des axes de mouvements privilégiés, sauf peut-être sur le bord Ouest de l'Océan. Nous ne faisons pas de commentaire particulier sur la carte présentée figure 8, mais nous signalons que des résultats concordants nous conduisent à marquer par des zones hachurées des régions où il nous semble que le mouvement des eaux intermédiaires antarctiques est

particulièrement atténué et que peut-être leur présence dans ces régions s'interprète surtout par des effets de diffusion latérale.

5. ASPECTS SAISONNIERS. LE PROBLÈME QUANTITATIF DU MÉLANGE

L'un des problèmes qui se posent sur le plan général est de savoir si au cours de sa progression, l'eau intermédiaire antarctique se mélange de façon préférentielle ou non avec les eaux sous-jacentes et sus-jacentes; l'un des moyens permettant de préciser ces processus et conduisant en outre à une meilleure représentation des effets saisonniers, de préférence à la seule considération de la distribution des salinités minimales, consiste à utiliser la méthode bien simple du triangle de mélange. En effet, pour la même valeur du minimum de salinité, la température correspondante peut varier comme nous l'avons vu de façon relativement importante, ce qui témoigne donc de conditions de dilution totalement différentes.

Le triangle de mélange utilisé

Le triangle de mélange utilisé (fig. 9) fait référence aux masses d'eaux suivantes :

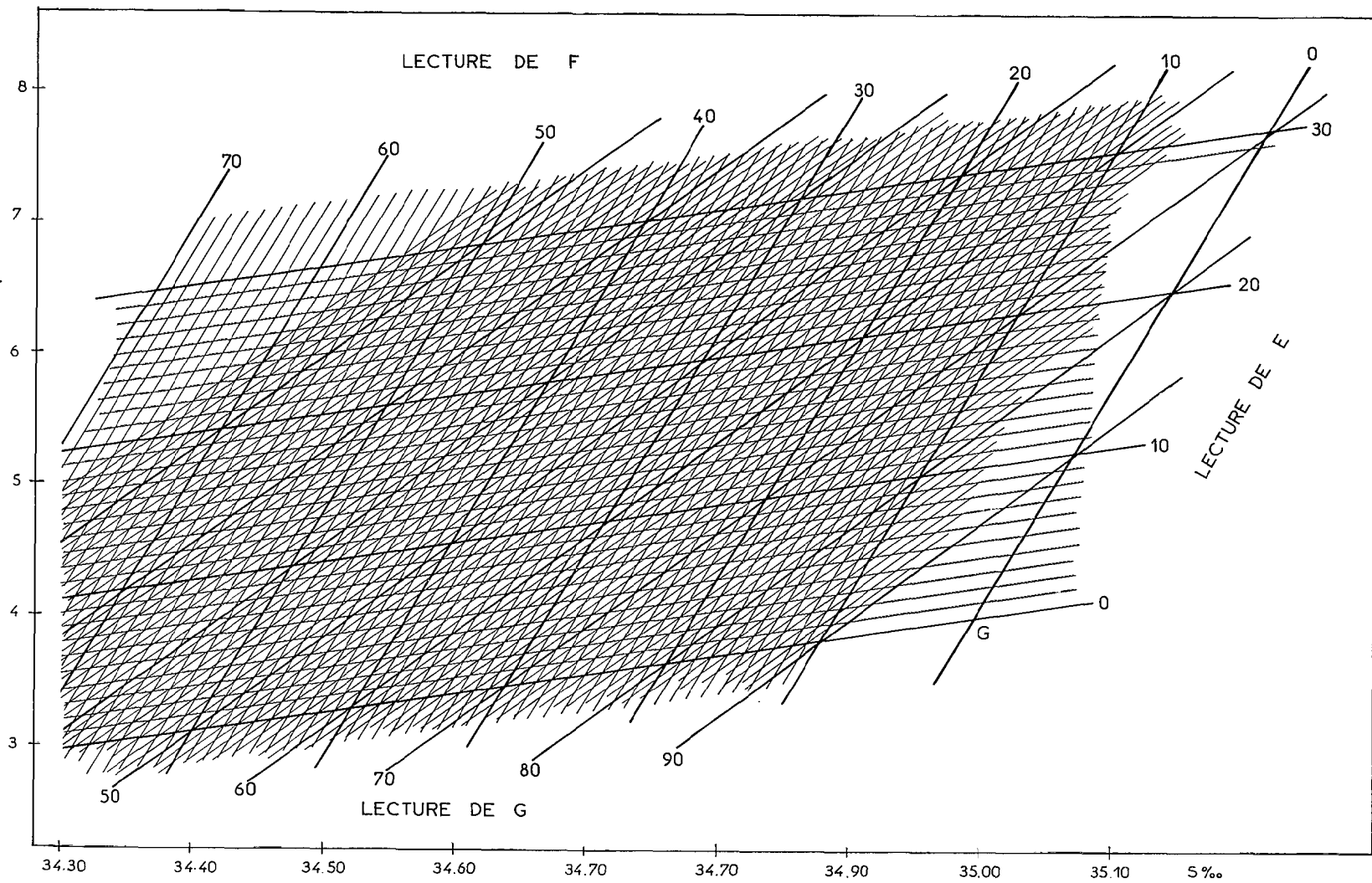


Fig. 10. — Grille de mélange pour l'Atlantique Intertropical et au voisinage du minimum Antarctique intermédiaire.

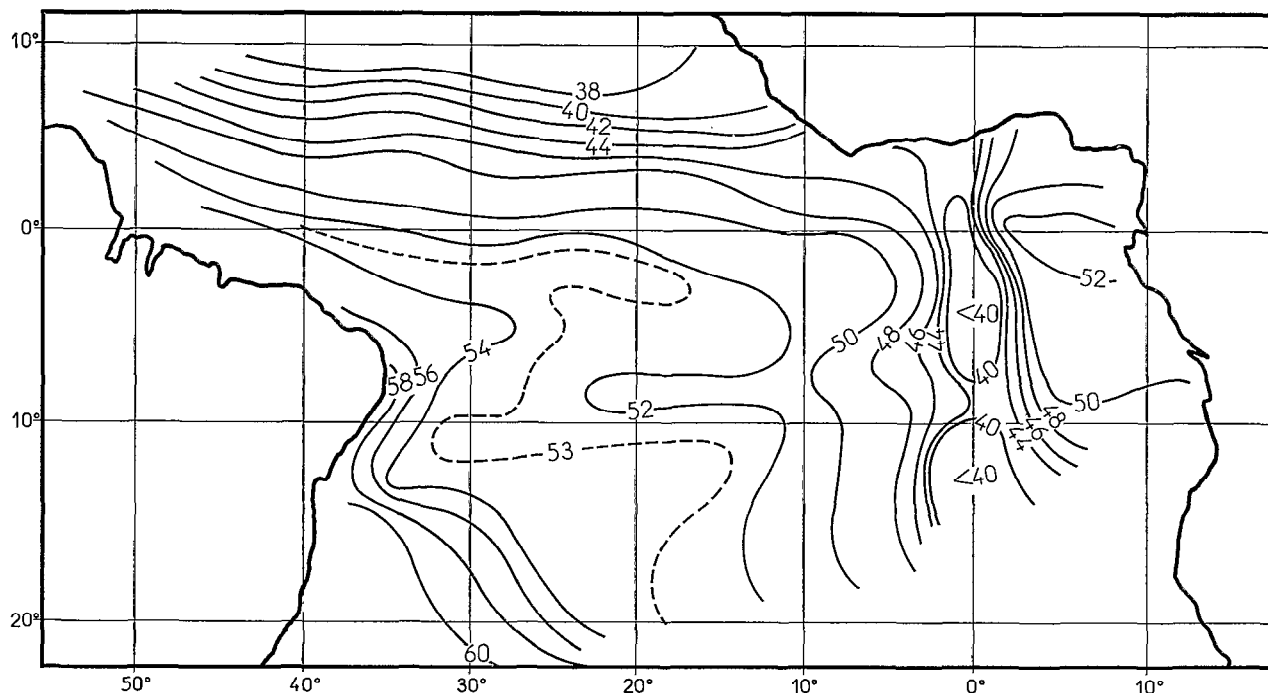


Fig. 11. — Distribution des pourcentages d'eaux antarctiques intermédiaires en hiver.

1° Eaux intermédiaires antarctiques — $T = 2,2\text{ °C}$ — $S = 33,80\text{ ‰}$

2° Eaux profondes — $T = 4,0\text{ °C}$ — $S = 35,00\text{ ‰}$; ceci ne correspond pas exactement aux caractéristiques d'origine des eaux profondes, mais n'oublions pas que celles-ci dans notre secteur arrivent déjà après évolution par mélange.

3° Eaux centrales Sud-Atlantique ou subtropicale (il y a ici un problème dont il conviendrait de discuter ultérieurement pour les valeurs à adopter) Nous avons choisi : $T = 16,5\text{ °C}$; $S = 35,75\text{ ‰}$. Ce choix est contestable; on aurait pu prendre des valeurs supérieures en température et en salinité, correspondantes aux valeurs maximales des caractéristiques des eaux d'origine subtropicale. De toutes façons, pour l'interprétation de nos pourcentages dans le triangle de mélange, un tel choix, un peu arbitraire, ne conduit qu'à une erreur relative et ne change rien quant aux conclusions auxquelles on aboutit.

La figure 9 représente le triangle de mélange ainsi défini. Naturellement pour la zone qui nous intéresse, nos points T S correspondant au minimum de salinité se situent dans un quadrilatère assez réduit, celui-ci est matérialisé par la zone hachurée de la figure 9 et représenté en agrandi dans la figure 10; c'est à partir

de celle-ci que nous avons défini les pourcentages des différentes masses d'eau intervenant dans le mélange au niveau du minimum de salinité. Ce sont ces résultats que nous présentons maintenant.

Résultats obtenus

LE POURCENTAGE D'EAU INTERMÉDIAIRE ANTARCTIQUE ET SES VARIATIONS SAISONNIÈRES :

— *en hiver* : la distribution des pourcentages d'eau intermédiaire antarctique (fig. 11), si on se limite à ses grands traits, ressemble d'assez près à la distribution générale des salinités minimales (fig. 5), à savoir :

— Maximum d'extension vers le Nord sur le bord Ouest de l'Océan;

— Présence d'une langue orientée vers l'Est, vers 5° de latitude Sud, particulièrement bien marquée par la courbe d'isopourcentage 52 %.

— Plus au Sud, vers 7° S, cette isocourbe 52 % s'infléchit vers l'Ouest, mettant ainsi en évidence cette fois un minimum relatif;

— Plus à l'Est et vers le méridien origine, s'étend une bande Nord-Sud de minimum relatif de proportion d'eau d'origine antarctique.

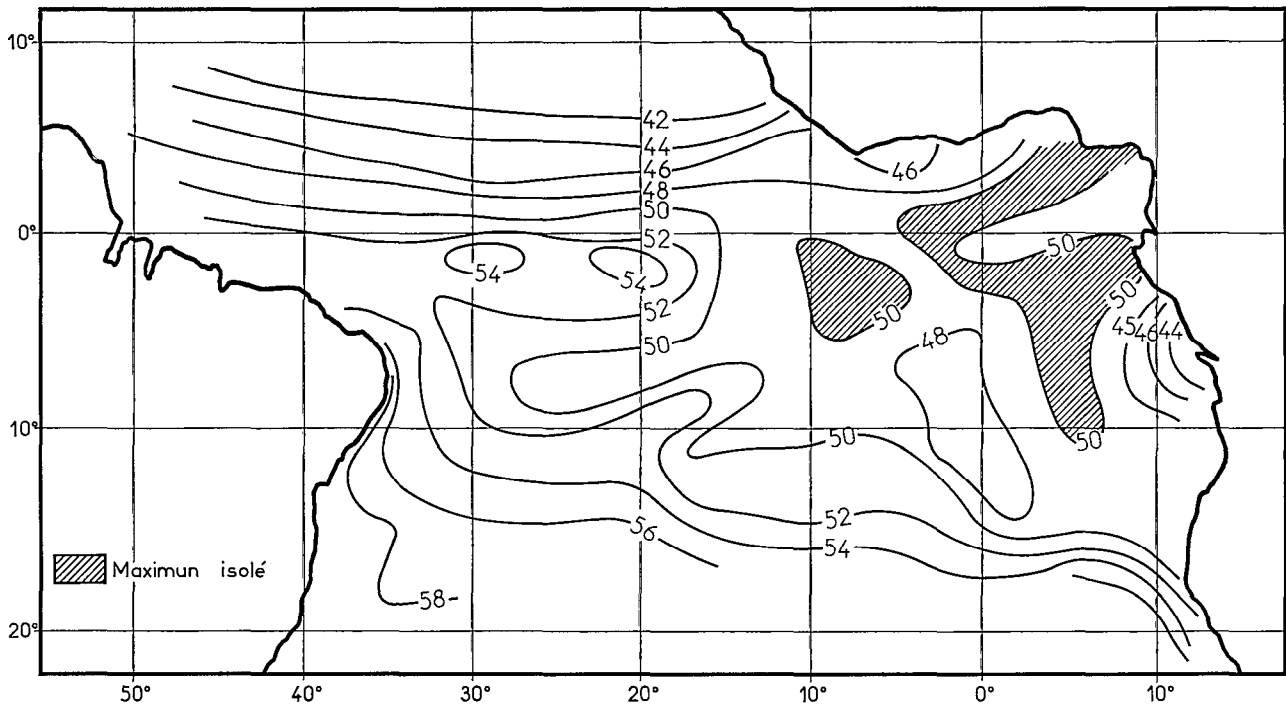


Fig. 12. --- Distribution des pourcentages d'eaux antarctiques intermédiaires en été.

— Encore plus à l'Est, dans le fond du Golfe de Guinée, le long du littoral africain, les pourcentages observés croissent de nouveau (voir le tracé de l'isoligne 50 %) avec maximum dans le fond du Golfe de Guinée; noter qu'il y a solution de continuité avec le secteur Est de l'Atlantique Sud tropical.

Une remarque en ce qui concerne les valeurs numériques correspondant au minimum axé sur le méridien origine; il est possible qu'elles soient entachées d'une erreur due à une série de mesures paraissant douteuses. Cette erreur n'infirme pas pour autant l'existence de ce minimum; ainsi les résultats de Wüst antérieurs aux mesures auxquelles il vient d'être fait allusion conduisaient pour cette bande méridienne à une description assez voisine (fig. 1).

Ce résultat montre par comparaison avec le schéma moyen de circulation que nous venons de présenter que le mouvement à composante Nord le long de la Côte d'Amérique du Sud reste particulièrement marqué et constitue un caractère quasi permanent comme nous pourrions le vérifier en examinant les conditions d'été, il en est de même de la composante Est de la circulation centrée sur 5° S. L'examen de celles-ci que nous allons envisager maintenant montre que les caractères de variabilité du mouvement au niveau considéré sont beaucoup plus importantes.

— en été : la distribution des pourcentages d'eau antarctique intermédiaire présente les caractères suivants (fig. 12) :

— Côté Ouest, la structure générale en langue, marquée par exemple par le tracé de l'isoligne 52 %, est axée sur les mêmes latitudes qu'en hiver; cependant, on remarque un déplacement général de cette isoligne vers l'Ouest. C'est-à-dire que si les axes ainsi définis peuvent être considérés comme un indicateur lié à la circulation générale, le mouvement en direction de l'Est observé vers 5° S serait alors atténué en été, et le mouvement de retour éventuel vers l'Ouest plus au Sud (7° S) transporterait une quantité légèrement plus importante d'eau intermédiaire antarctique (ceci par rapport aux conditions d'hiver).

— En ce qui concerne la région à minimum de teneur en eau intermédiaire antarctique, celle-ci est considérablement élargie dans le sens zonal, mais les valeurs numériques de ce minimum sont très atténuées, sauf dans le secteur Sud, où la distribution des pourcentages (isolignes 50 %, 52 %, 54 %) a tendance à approcher une orientation zonale, ce qui correspond à une augmentation nette par rapport aux conditions d'hiver dans la même région.

— Enfin, plus à l'Est, on observe une situation

semblable à celle rencontrée en hiver, à savoir une zone de maximum relatif de pourcentage d'eau antarctique intermédiaire située autour de 50 % à l'exception peut-être d'un léger minimum correspondant au maximum d'hiver, observé dans la même région. Ceci est à considérer avec précaution, mais conduit de nouveau si l'on poursuit la comparaison dans le détail des 2 cartes, à reposer le problème déjà évoqué, de la signification des variations saisonnières.

Ce problème des variations saisonnières nous amène à revenir à la question des distributions spatiales des propriétés et de leur relation avec les caractéristiques de la masse d'eau considérée à son origine.

Pour la période d'été, nous observons les détails suivants :

— 2 maximums délimités par les isolignes 54 % ; un autre maximum plus à l'Est délimité par 50 %.

De même, dans le secteur Est de l'Océan, c'est-à-dire du Congo à la Côte d'Ivoire, nous observons une succession de valeurs maximales et minimales des pourcentages en eaux intermédiaires antarctiques au niveau du minimum de salinité. Ces distributions s'accordent bien avec le schéma général de circulation que nous avons proposé. Si l'on interprète ces détails dans le sens que nous avons envisagé, ceci conduirait à des vitesses de déplacement de 2 à 4 cm/seconde vers l'Est dans la bande située vers 5° de latitude Sud. Dans la partie Est de l'Océan, une estimation des vitesses faite suivant le même procédé conduit à un mouvement grossièrement parallèle à la côte, ayant même ordre de grandeur, les vitesses étant légèrement plus faibles, c'est-à-dire de l'ordre de 2 cm/seconde. Ces résultats conduiraient à penser que notre

interprétation de la distribution de maximums ou de minimums isolés suivant l'axe du courant est acceptable et traduit bien les variations de caractéristiques de l'eau antarctique à son origine ou peut-être des variations saisonnières de la dynamique du mélange entre la convergence antarctique et la région équatoriale.

On pourrait faire une objection à cette façon de voir, car aux maximums d'été devraient correspondre des minimums d'hiver, et inversement, ce qui n'est pas vérifié, mais nous avons montré aussi que le schéma de circulation est soumis à des variations de caractère saisonnier, ce qui permet d'écarter cette incertitude, mais montre aussi la complexité de ce problème d'interprétation. On notera cependant qu'au minimum marqué par l'isoligne 50 % en été dans le Golfe de Guinée, correspond un maximum en hiver dans le même secteur marqué par l'isoligne 52 %.

Comparaison des résultats avec des données à caractères quasi synoptiques

Compte tenu des résultats disponibles, nous ne pourrions faire ici de comparaison qu'avec les résultats des séries Équalant 1 et 2, qui d'ailleurs ont été utilisées dans le programme général précédent; cette tentative est assez grossière car nous avons seulement relevé les températures à 600 mètres de profondeur (1).

Nous pensons toutefois que l'examen de la distribution des températures à 600 mètres reste assez représentatif car à cette profondeur le contraste des températures est suffisant pour distinguer les maximums et minimums significatifs. La fig. 13 donne une

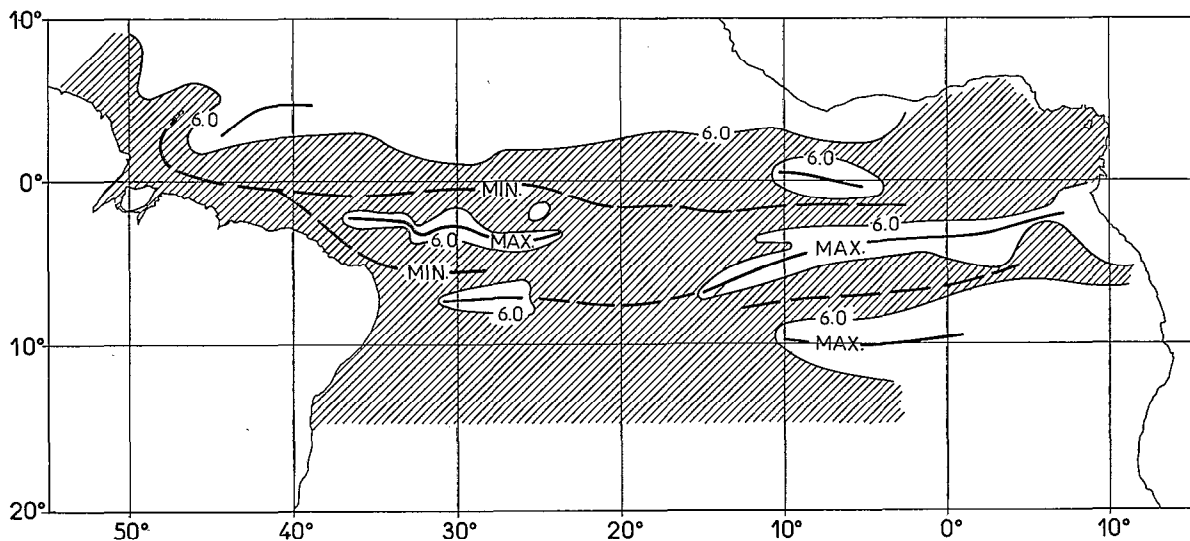


Fig. 13. — Température à 600 mètres d'après Équalant I (février-mars-avril 63).

(1) Nous avons utilisé pour ce faire l'Atlas Équalant, publié par l'UNESCO.

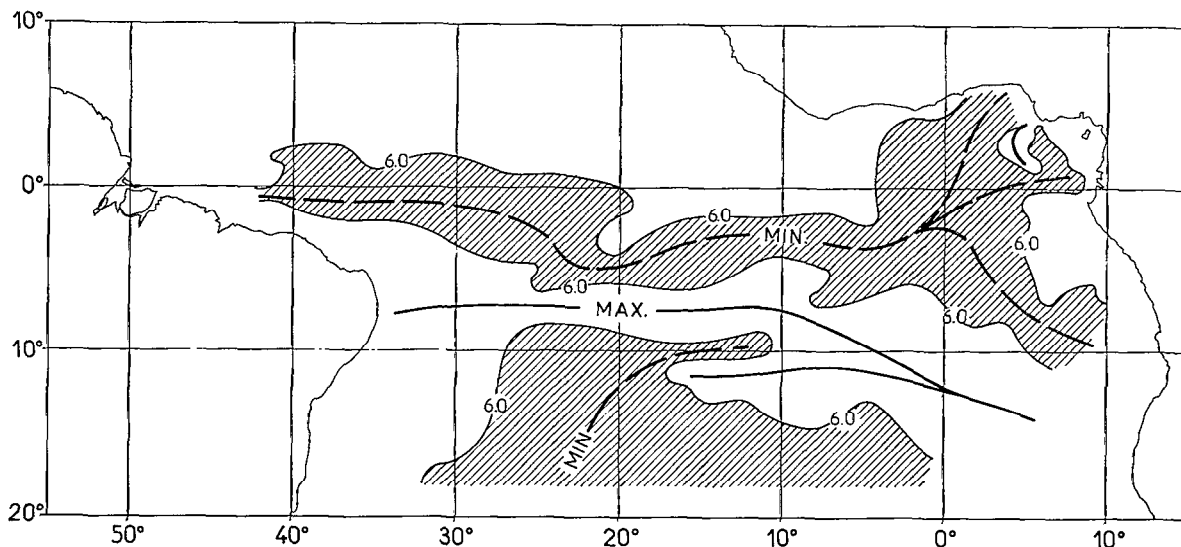


Fig. 14. — Température à 600 mètres d'après Équalant II (août-septembre-octobre 63).

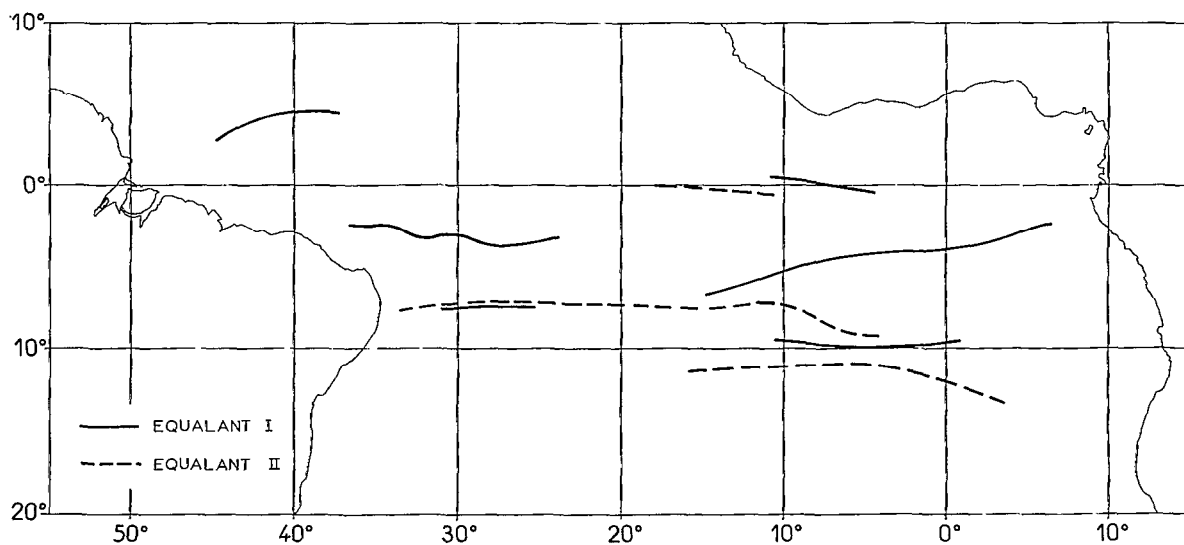


Fig. 15. — Lieux géométriques des maximums de températures à 600 mètres pour les croisières Équalant I et II.

représentation schématique des résultats de température déduits d'Équalant I (février-mars-avril). Les zones hachurées correspondent aux températures inférieures à 6°. La fig. 14 représente les résultats déduits d'Équalant II (août-septembre-octobre). On remarque dans l'un et l'autre cas l'alternance des maximums et minimums, ce qui tendrait à confirmer les hypothèses que nous avons envisagées. Pour essayer de préciser le décalage saisonnier de ces alternances, nous avons porté sur les figures 15 et 16 les lieux géométriques des maximums et des minimums

de température pour les croisières Équalant I et II séparées d'environ 6 mois. Nous constatons un décalage général des maximums et minimums sauf toutefois dans le secteur Ouest de l'Océan.

Les maximums d'Équalant II ne correspondent cependant pas toujours aux minimums d'Équalant I et vice-versa. Cette comparaison reste toutefois très encourageante quant à la possibilité d'observer dans la zone intertropicale des zonations traduisant dans l'espace les variations saisonnières des caractéristiques des eaux Antarctiques Intermédiaires à leur

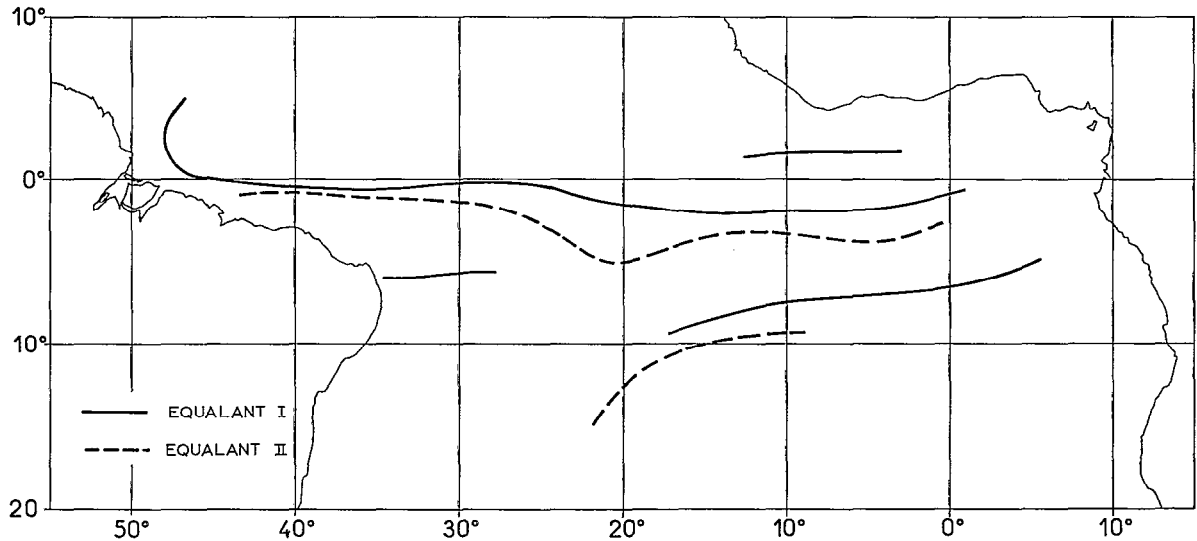


Fig. 16. — Lieux géométriques des minimums de températures à 600 mètres pour les croisières Équalant I et II.

origine. Il faut noter toutefois comme nous l'avons déjà remarqué que la circulation subissant elle-même des variations saisonnières, celles-ci compliquent encore les problèmes d'interprétation.

CONCLUSIONS

Nous avons essayé dans ce qui précède de présenter quelques aspects de la distribution des propriétés des eaux Antarctiques intermédiaires et de la circulation associée. Il nous semble que l'intérêt de ce travail réside dans le fait qu'il tient compte de l'ensemble des données historiques disponibles, ce qui permet de prendre en compte de façon certes bien imparfaite, les variations saisonnières. Cette façon de voir a été corroborée par l'examen de données à caractère quasi-synoptique (extraites des croisières Équalant). L'hypothèse que nous avons avancée de variations temporelles à l'origine se traduisant spatialement dans le secteur intertropical qui nous intéressait directement ici semble confirmée. Il est bien certain cependant que les variations de la circulation perturbent ce schéma, ce que nous avons pu d'ailleurs mettre en évidence.

Restent posés cependant bien des problèmes :

1° Nous avons essayé de définir le coefficient de diffusion virtuelle verticale, mais il semble bien que des effets latéraux puissent avoir une importance non

négligeable. L'importance relative des 2 effets reste à déterminer;

2° Si l'on s'en tient aux effets de mélange verticaux, on note d'après les résultats que nous avons obtenus une grande différence entre le Secteur Nord équatorial et le Secteur Sud équatorial. L'origine de cette différence reste une inconnue;

3° Un autre point dans ce domaine concernant la diffusion virtuelle : certains auteurs (AAGAARD et MOSBY par exemple) considèrent que les effets de mélange sont différents en température et en salinité; pour nous, il semble que les effets de mélange étant à caractère turbulent, ceux-ci doivent se traduire par d'uniques coefficients de diffusion virtuelle en température et en salinité, mais cette question reste sujette à examen aussi bien pour la diffusion latérale que verticale.

L'un des problèmes qui se posent serait de définir les coefficients de diffusion verticale et latérale, que ce soit dans le sens où nous l'entendons, ou dans le sens de la « double diffusivité ».

Car nous savons bien que le calcul des courants au voisinage de l'équateur et à l'équateur même pose de très difficiles problèmes et qu'une recherche de solutions pourrait être facilitée par une tentative d'interprétation quantitative de la distribution des caractères hydrologiques.

Manuscrit reçu au S.C.D. de l'O.R.S.T.O.M. le 2 juin 1975.

BIBLIOGRAPHIE

DEFANT (A.), 1961. — Physical oceanography. Pergamon Press, London : 1 à 500.

LE FLOCH (J.), 1974. — Quelques aspects de la dynamique et de l'hydrologie des couches superficielles dans l'ouest Marocain. Campagne CINECA-CHARCOT I et II. TETHYS 6 (1-2). Marseille : 53-68.

SVERDRUP (H. U., JOHNSON (M. W.) et FLEMING (R. H.),

1942. — The oceans, their physics, chemistry, and general biology. Prentice-Hall, inc., New York.

U.N.E.S.C.O., 1973. — Atlas Eupalant (Document provisoire). Paris.

Wüst (G.), 1936. — Schichtung und Zirkulation des Atlantischen Ozeans. Meteor-Werk, 6 (1). Das Bodenwasser und die Stratosphäre. Berlin.