

CONTINUITÉ ZONALE ET CIRCULATION MÉRIDIENNE DU MAXIMUM DE NITRITE DANS LE PACIFIQUE ÉQUATORIAL SUD-OUEST

I. Description de l'évolution spatiale du maximum de nitrite dans le contexte hydrologique

CLAUDE OUDOT

Océanographe Physicien O.R.S.T.O.M.
C.R.O. B.P. V 18 Abidjan (R.C.I.)

RÉSUMÉ

La continuité zonale à petite échelle (174° E à 163° E) du maximum de nitrite est étudiée à la lumière des observations recueillies durant la campagne ÉPONITE 2 (août-septembre 1976), au cours de laquelle la couche d'accumulation a atteint un développement inégalé (concentration maximale de nitrite: 3,2 $\mu\text{mol/l}$ et concentrations supérieures à 2 $\mu\text{mol/l}$ s'étendant sur plus de 6 degrés de latitude). Le transport zonal, à l'image de celui du maximum de salinité sous-jacent, ne saurait seul rendre compte de la continuité de la « poche à nitrite ». L'évolution spatiale de la structure verticale de la couche d'accumulation suggère un renouvellement permanent du nitrite d'est en ouest dans des couches d'eau plus légères. La circulation méridienne du maximum de nitrite est soulignée. Le développement particulièrement intense de la couche d'accumulation est interprété comme le résultat de la disparition de l'upwelling équatorial.

ABSTRACT

ZONAL CONTINUITY AND MERIDIAN CIRCULATION OF THE NITRITE MAXIMUM IN THE SOUTH-WEST EQUATORIAL PACIFIC. I. DESCRIPTION OF THE SPATIAL EVOLUTION OF THE NITRITE MAXIMUM IN THE HYDROLOGICAL CONTEXT

Zonal continuity on a medium scale (174° E to 163° E) of the nitrite maximum is studied from the observations collected during the EPONITE 2 cruise (august-september 1976), when the accumulation layer reached an unequalled growth (maximal concentration of nitrite: 3.2 $\mu\text{mol/l}$ and concentrations higher than 2 $\mu\text{mol/l}$ spread over more than 6 degrees of latitude). In spite of an apparent zonal continuity of the "nitrite pouch", the vertical structure of the accumulation layer changes slightly but regularly from 174° E to 163° E, suggesting a permanent replenishment of nitrite from east to west in lighter water layers. The modification of the nitrite distribution in the hydrological field is a feature of an evolution on the scale of the Pacific (140° W to 150° E). Into the accumulation layer, the various nitrite horizons are considered as the result of the mineralization of the waste of different successive phases of organic production in the equatorial upwelling (OUDOT et WAUTHY, 1976). These nitrite horizons are involved in the meridional circulation cells generated by the upwelling: they move towards the convergence zone in the upper layers and towards the Equator in the lower layers lying above the salinity maximum level. When the surface divergence disappears with the fall of the trade winds, the upwelling of subsuperficial saline and in nitrite enriched water vanishes; the nitrite becomes stored south of the Equator and reinforces the growth of the accumulation layer. In that case the probable lot of the nitrite is the oxydation into nitrate, the last step of mineralization of organic nitrogen.

The growth of the "nitrite pouch" is the result of a more or less stable balance between the production rate and the disappearance rate induced by the equatorial upwelling dynamics. The space and time fluctuations of the growth of the nitrite accumulation layer could express the hydroclimatic variations of the equatorial superficial circulation.

1. INTRODUCTION

Dès les premières campagnes du N.O. CORIOLIS dans le Pacifique sud-ouest inaugurées en 1965, les océanographes du Centre O.R.S.T.O.M. de Nouméa (Nouvelle Calédonie) ont remarqué des concentrations de nitrite particulièrement élevées pour une zone ouverte de l'océan (plus de $2 \mu\text{mol NO}_2/\text{l}$), régulièrement situées à la base de la couche homogène dans une zone de convergence, immédiatement au sud de l'Équateur. La distribution dans un plan méridien en fut décrite pour la première fois dans le détail par HISARD et PITON (1969). Ces auteurs, en vérifiant que l'association entre la zone de convergence et les fortes accumulations de nitrite existe de 160°E à 180° , suggèrent que la « poche à nitrite » est un trait général de la circulation, à la convergence entre le Courant Équatorial et le Contre Courant Équatorial Sud, caractéristique des eaux sub-équatoriales de l'Océan Pacifique. De fait les travaux ultérieurs du Centre (ROTSCHI *et al.*, 1969; DONGUY *et al.*, 1974) et des travaux japonais (HATTORI et WADA, 1971), confirment plus à l'est, dans le Pacifique central, le bien-fondé de cette hypothèse, jusqu'à 140°W . Malgré son instabilité chimique relative (BRANDHORST, 1959, le qualifie de « ephemeral nutrient »), la distribution du nitrite reflète en partie la circulation zonale et méridienne (WOOSTER *et al.*, 1965; HATTORI et WADA, 1971; OUDOT *et al.*, 1969; OUDOT et WAUTHY, 1976). Il importait donc d'étudier la continuité zonale à petite échelle de la couche d'accumulation de nitrite, tant en concentration qu'en profondeur et densité, afin de mieux cerner les mécanismes qui gouvernent la distribution de ce sel (formation et disparition), qui, de par sa position intermédiaire entre l'ammoniaque et le nitrate, est très utile à la compréhension du cycle de l'azote dans l'écosystème productif de l'upwelling équatorial (OUDOT et WAUTHY, 1976). C'est pour répondre à ces besoins que fut conduite la campagne ÉPONITE 2.

2. PLAN DE LA CROISIÈRE ET MÉTHODES

Durant la campagne ÉPONITE 2, réalisée en août-septembre 1976, le N.O. CORIOLIS parcourt cinq rails méridiens ($9^\circ 30' \text{S}$ à $1^\circ 30' \text{N}$) distants d'environ 3 degrés entre 174°E et 163°E (fig. 1). La zone étudiée est couverte en un mois à raison d'une station hydrologique et courantométrique tous les 40 milles, soit toutes les 7 heures.

Chaque station hydrologique conduit à un échantillonnage serré à 24 niveaux entre la surface et 300 mètres au moyen de bouteilles Niskin 1,7 l (entièrement en PVC). Les déterminations de salinité, oxygène, azote, gaz carbonique total, pH et

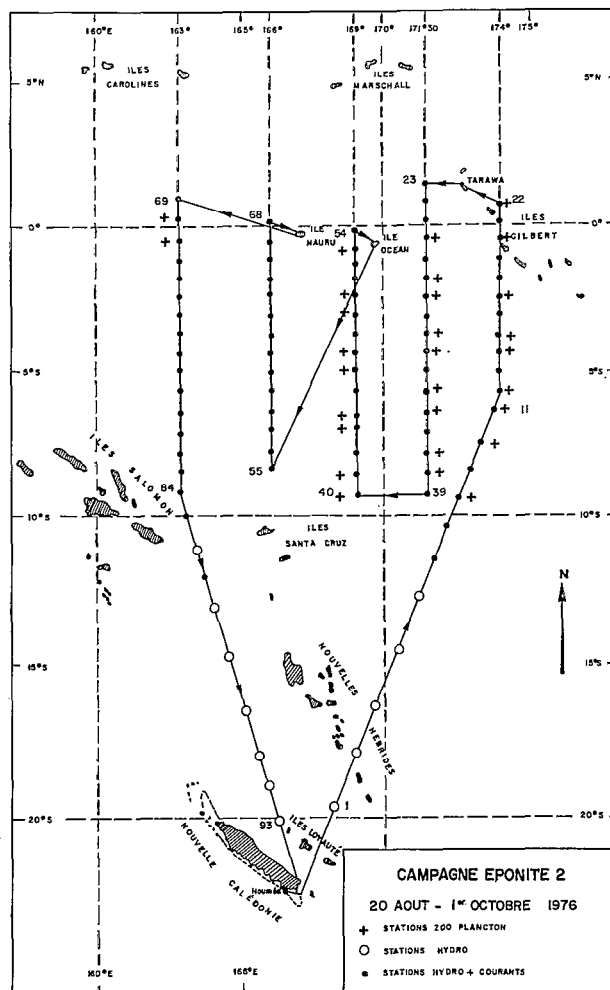


Fig. 1. — Plan de la campagne ÉPONITE 2.
Plan of the EPONITE 2 cruise.

alcalinité, ammoniacque, nitrite, nitrate, phosphate, silicate, azote et phosphore organique dissous et pigments chlorophylliens, sont réalisées à bord immédiatement après la récolte des échantillons.

Les mesures de température, salinité et oxygène sont faites suivant les techniques classiques : thermomètres à renversement (fabrication japonaise Yoshino et allemande Richter et Wiese), salinomètre à induction AUTOLAB, méthode de Winkler avec titrage potentiométrique automatique de l'iode libéré. L'oxygène est également mesuré par chromatographie en phase gazeuse simultanément à l'azote et au gaz carbonique total (OUDOT et WAUTHY, 1978). Les mesures de pH sont effectuées à l'aide d'un pHmètre digital ORION Model 801 et l'alcalinité des carbonates est déterminée à partir des mesures de pH et de gaz carbonique total (TAKA-

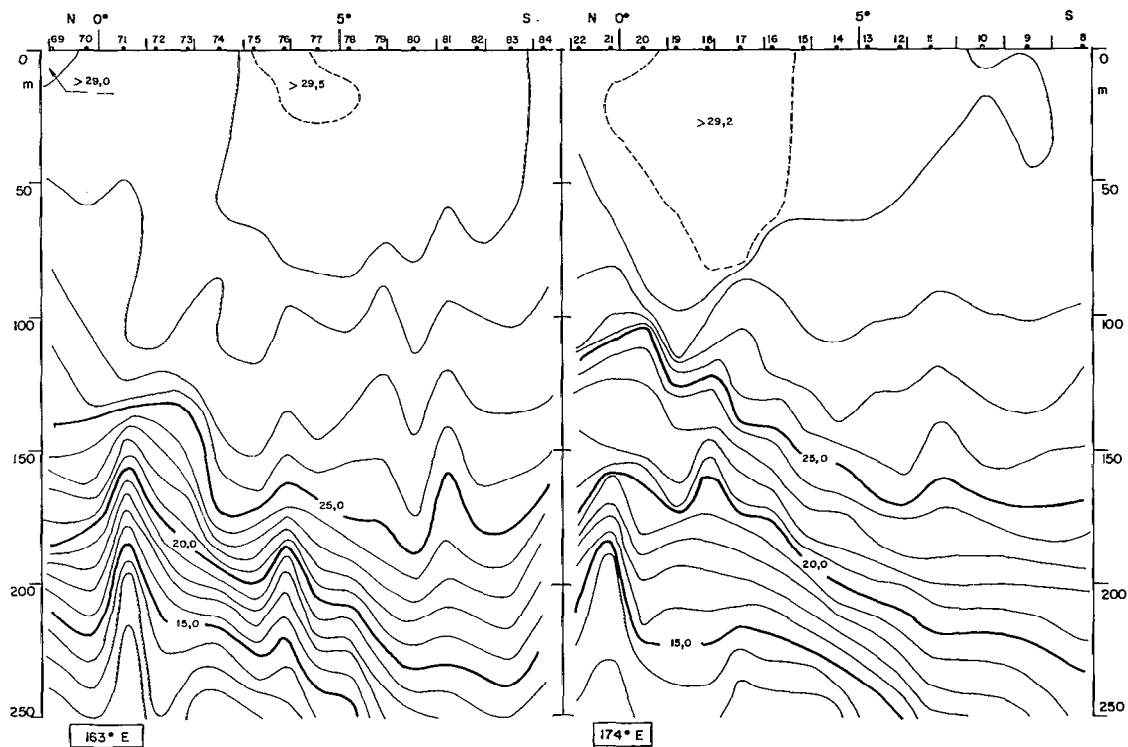


Fig. 2. — Distributions verticales de la température ($^{\circ}\text{C}$) le long des méridiens 174°E et 163°E (campagne ÉPONITE 2).
 Vertical distributions of the temperature ($^{\circ}\text{C}$) along the meridians 174°E and 163°E (cruise EPONITE 2)

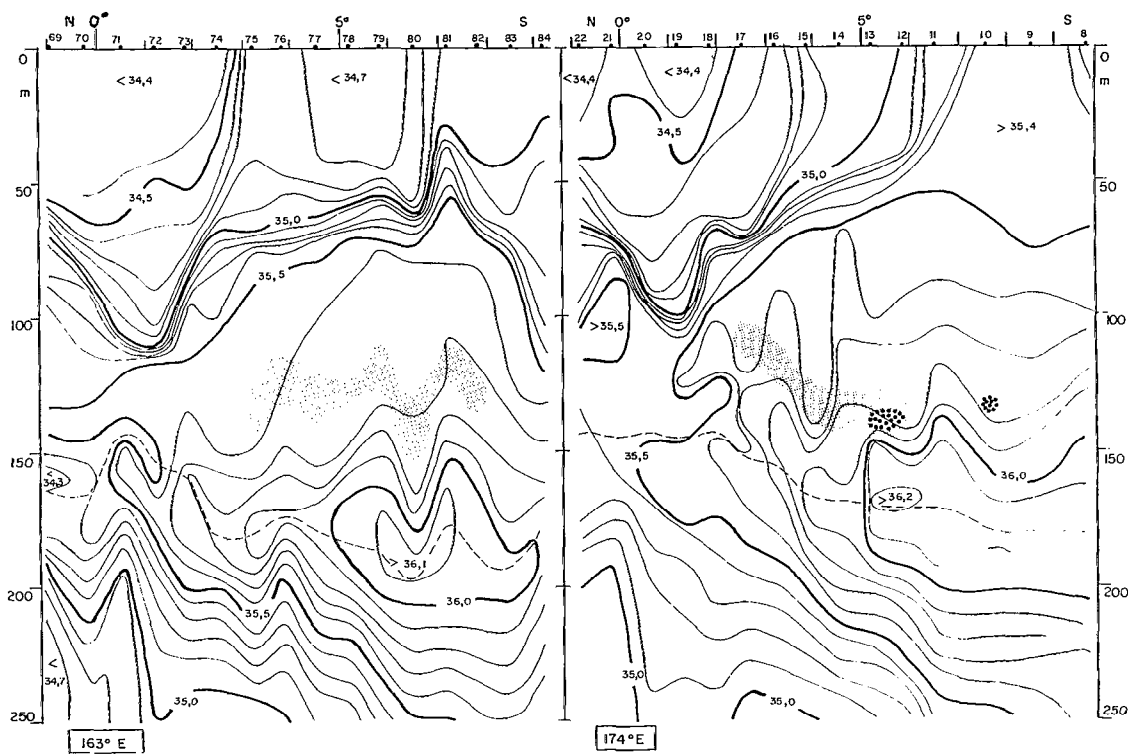


Fig. 3. — Distributions verticales de la salinité (‰) le long des méridiens 174°E et 163°E (campagne ÉPONITE 2).
 Vertical distributions of the salinity (‰) along the meridians 174°E and 163°E (cruise EPONITE 2).

HASHI *et al.*, 1970). Les sels nutritifs sont dosés automatiquement en adaptant à l'Auto Analyzer Technicon II les méthodes manuelles classiques : méthode de KOROLEFF (1969) pour l'ammoniaque, méthode de BENDSCHNEIDER et ROBINSON (1952) pour le nitrite, méthode de WOOD *et al.*, (1967) pour le nitrate, méthode de MURPHY et RILEY (1962) pour le phosphate, et méthode de BREWER et RILEY (1966) pour le silicate. Les déterminations d'azote et de phosphore organique dissous ont lieu suivant la technique d'irradiation ultraviolette (lampe à vapeur de mercure 450 W) des échantillons d'eau de mer filtrée pour l'évaluation de la biomasse végétale (ARMSTRONG et TIBBITS, 1968). Les mesures de chlorophylle *a* et de phaeopigments sont exécutées par fluorimétrie suivant la technique d'extraction acétonique des pigments retenus sur des filtres Millipore HA 0,45 μ (STRICKLAND et PARSONS, 1968).

Les observations courantométriques sont effectuées au moyen de deux courantographes Hydro-Products model 501 B et les résultats sont donnés relativement à une couche de référence choisie à 1 000 mètres et supposée immobile (MAGNIER *et al.*, 1973).

Les observations météorologiques sont relevées à la passerelle pendant le déroulement de la campagne ; elles sont complétées par les observations recueillies à la station météorologique de l'atoll de Tarawa (fig. 1) pour la période précédant la campagne.

3. CONDITIONS HYDROLOGIQUES

Les caractéristiques hydrologiques typiques d'un upwelling équatorial (ROTSCHI et WAUTHY, 1973), à savoir : présence en surface à l'équateur d'une eau froide ($T = 27,0$ °C) et salée ($S = 35,3$ ‰), n'apparaissent pas du début à la fin de la campagne ÉPONITE 2 (fig. 2 et 3). Au contraire une masse d'eau chaude (voisine de 29,0 °C) et dessalée (inférieure à 34,5 ‰) recouvre la zone équatoriale sur une largeur d'au moins quatre degrés (de 3° S à 1° N). Une telle situation, à la longitude de 170° E, n'a été relevée qu'en deux occasions par le passé : en décembre 1965 et en avril 1967 (ROTSCHI *et al.*, 1972). Encore était-ce en une saison (hiver boréal) où le régime des alizés n'est pas établi de façon régulière dans le Pacifique équatorial occidental, l'Équateur étant recouvert par la zone de convergence intertropicale des vents alizés. Cette anomalie hydroclimatique semble avoir été générale sur toute la zone équatoriale du Pacifique en 1976 (DONGUY et HENIN, 1978). Elle découle de conditions météorologiques anormales : lorsque nous approchons de l'équateur à 174° E le vent s'affaiblit et tourne au nord puis à l'ouest (fig. 4). Cette situation persiste depuis un mois déjà, tant au plan météorologique

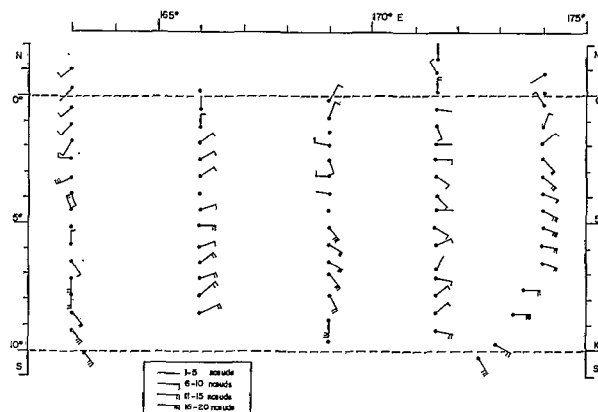


Fig. 4. — Distribution des vents observés à la passerelle du navire pendant la campagne ÉPONITE 2.

Distribution of shipboard observed winds during the EPONITE 2 cruise.

que hydrologique, comme nous l'indiquent les observations météorologiques recueillies à l'atoll de Tarawa et les observations de salinités superficielles rapportées par les navires marchands (DONGUY, comm. pers.). Pendant toute la durée de la campagne, le vent reste faible et orienté au nord et à l'ouest à proximité de l'équateur, tandis qu'il s'établit, avec plus de force, à l'est-sud-est entre 5° S et 10° S (fig. 4).

Ces conditions hydrologiques particulières à l'équateur sont confirmées par les mesures de courant. D'un bout à l'autre de la campagne (fig. 5), le courant porte à l'est à l'équateur. Comme l'ont déjà montré les observations antérieures (HISARD *et al.*, 1970), il existe dans ce cas un flux ouest vers 100 m à l'équateur, entre le courant est superficiel et le Sous-Courant Équatorial (courant de Cromwell).

Au début de la campagne toutefois persistent en subsurface à l'équateur des traits de structure d'un upwelling passé qui disparaissent par la suite. L'amorce d'une crête thermique au niveau de l'isotherme 25 °C et l'éclatement de la thermocline entre 25 et 20 °C (fig. 2 : 174° E) sont caractéristiques d'une situation d'upwelling (ROTSCHI *et al.*, 1972), ainsi que le noyau de salinité ($S > 35,5$ ‰) isolé immédiatement au nord de l'équateur (fig. 3).

La masse d'eau salée superficielle rencontrée habituellement au voisinage immédiat de l'équateur (tabl. I) est repoussée vers le sud par le flux est équatorial d'eau dessalée (fig. 3). Cette masse d'eau salée ($S > 35,4$ ‰ à 174° E), qui peut seulement avoir été engendrée par un upwelling antérieur (WAUTHY, 1975), témoigne des conditions hydrologiques qui ont affecté la région par le passé. Au cours de son écoulement vers l'ouest, cette masse

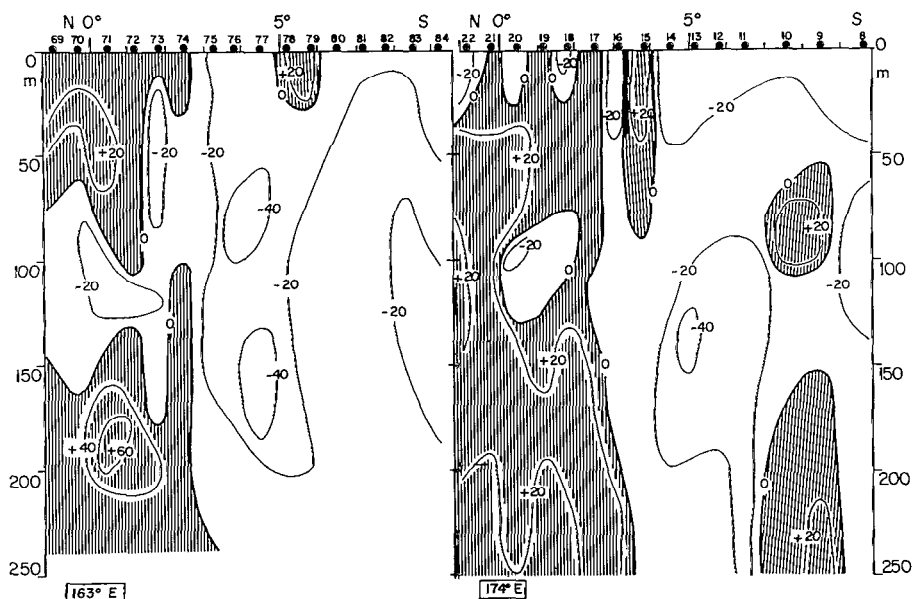


Fig. 5. — Distributions méridiennes des composantes est (+ en cm/s) et ouest (- en cm/s) de courant le long de 174° E et 163° E (campagne ÉPONITE 2). En hachuré : courant portant à l'est.

Meridian distributions of current components along 174° E and 163° E (cruise ÉPONITE 2): eastward (+ in cm/s) and westward (- in cm/s). Hachured: eastward current

TABLEAU I

Campagne	Maximum de salinité en surface au sud de l'équateur			Minimum de température en surface à l'équateur (T °C)	Teneur maximale en NO ₂ (µmol/l) (extension mérid.)
	Latitude	Salinité (‰)	Température (T °C)		
BORA 1 (déc. 1965).....	10° S	35,06	28,98	28,68	1,5
BORA 2 (mars 1966).....	1° 30 S	35,40	28,85	28,41	2,3
BORA 3 (juin 1966).....	2° S	35,44	29,67	29,14	1,8
BORA 4 (sept.-oct. 1966).....	3° S	35,52	29,63	28,18	2,7 (>2 µmol/l sur 4° latitude)
CYCLONE 2 (mars 1967).....	2° 30 S	35,59	28,24	27,01	1,4
CYCLONE 3 (avril 1967).....	3° S	35,31	28,83	29,04	1,8
CYCLONE 4 (juin 1967).....	3° S	35,50	29,31	28,74	1,9 (>1,5 µmol/l sur 1,5° latitude)
CYCLONE 5 (juillet 1967).....	2° S	35,48	28,82	28,37	2,1 (>2 µmol/l sur 0,5° latitude)
CYCLONE 6 (août 1967).....	1° 30 S	35,43	28,33	27,66	1,9
CYCLONE 7 (avril-mai 1968).....	3° 30 S	35,44	29,08	27,44	2,3 (>2 µmol/l sur 1,5° latitude)
ÉPONITE 1 (août 1970).....	3° S	35,45	28,80	--	2,3
MINEPO 1 (juillet 1973).....	1°-2° S	35,41	28,00	27,29	2,1
MINEPO 2 (juillet 1974).....	3° S	35,47	28,93	28,20	2,1
ÉPONITE 2 (août-sept. 1976).....	7° 30 S	35,45	28,94	29,11	3,2 (>2 µmol/l sur 6° latitude)

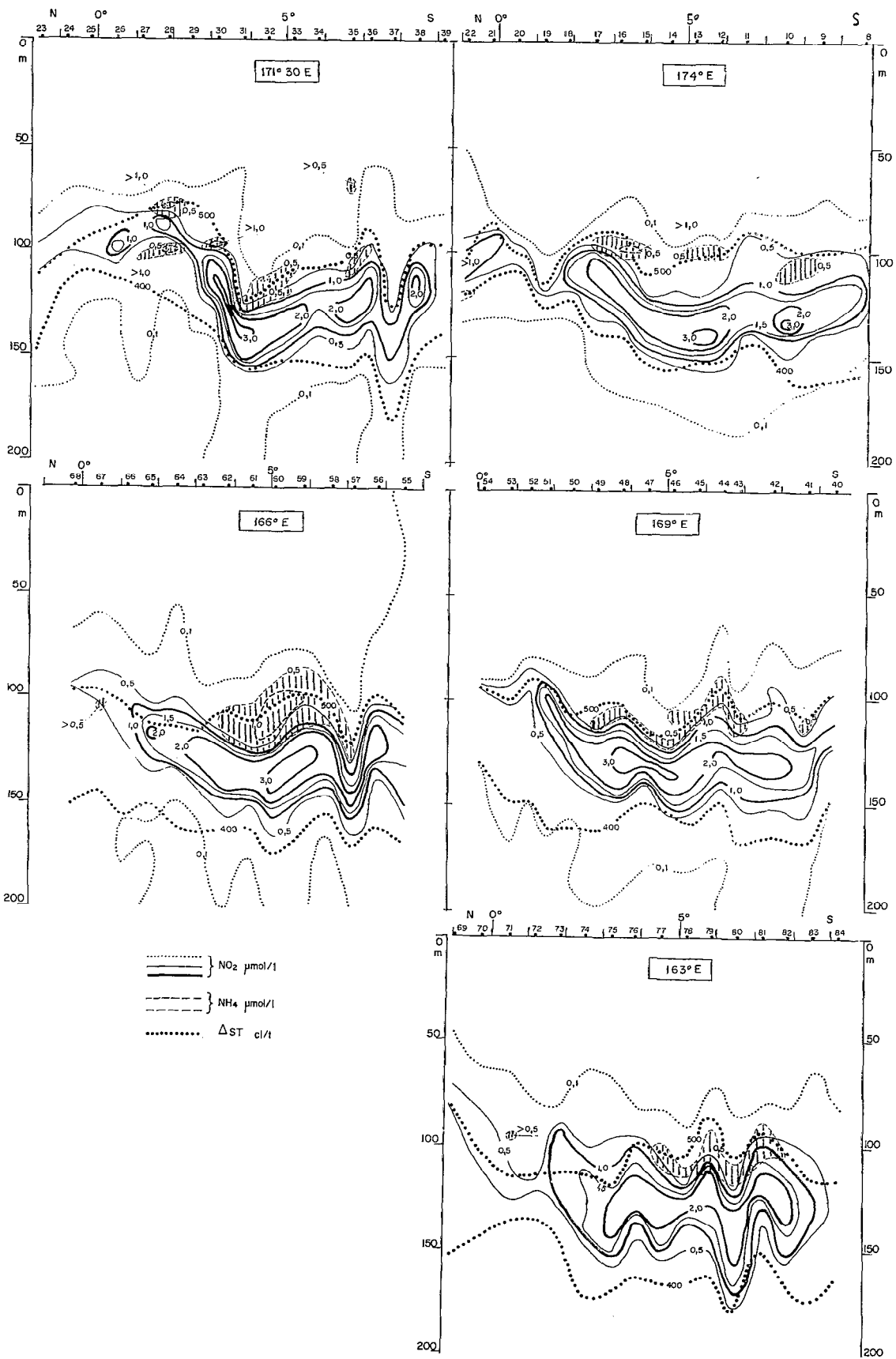


Fig. 6. — Distributions méridiennes du nitrite en fonction de la profondeur durant la campagne ÉPONITE 2. En surimpression (hachuré), concentrations d'ammoniaque supérieures à 0,5 et 1,0 $\mu\text{mol NH}_4/\text{l}$. En gros pointillés, niveaux isanostériques 500 et 400 cl/l .

Meridian distributions of nitrite versus depth during the EPONITE cruise. Superimposed (hachured), ammonia concentrations higher than 0.5 and 1.0 $\mu\text{mol NH}_4/\text{l}$. Large dotted lines, isanosteric levels 500 and 400 cl/l .

d'eau voit sa salinité diminuer ($S > 35,4$ à 174°E - $S < 35,0$ à 163°E), de même que le maximum de salinité de l'Eau Subtropicale du Pacifique Sud (E. S. P. S.) entre 150 et 200 m (fig. 3 : tracés des isohalines 36,2 et 36,1 ‰).

4. DISTRIBUTIONS MÉRIDIANNES DE NITRITE

Durant cette campagne la couche d'accumulation de nitrite est particulièrement bien développée sur toute l'étendue zonale prospectée (fig. 6). Les concentrations de nitrite excèdent $2 \mu\text{mol NO}_2/\text{l}$ sur près de 6 degrés de latitude à chaque coupe méridienne et aux trois sections intermédiaires ($171^\circ 30 \text{E}$ - 169°E - 166°E) plusieurs échantillons présentent une teneur supérieure à $3 \mu\text{mol NO}_2/\text{l}$. Un tel développement de la « poche à nitrite » n'a été relevé qu'une seule fois par le passé, à la même époque (septembre-octobre 1966 : HISARD et PIRON, 1969) sans toutefois atteindre le seul $3 \mu\text{mol NO}_2/\text{l}$.

A chaque longitude, la couche d'accumulation est cantonnée entre 100 et 150 m c'est-à-dire *grosso modo* entre les niveaux isanostériques 500 et 400 cl/t. La couche homogène superficielle est totalement dépourvue de nitrite ($< 0,1 \mu\text{mol NO}_2/\text{l}$).

Au premier abord la structure méridienne évolue assez peu d'est en ouest. La plage de concentrations supérieures à $1 \mu\text{mol NO}_2/\text{l}$ est continue de 2° à 9°S à chaque longitude. En outre aux deux sections les plus à l'est un noyau ($> 1 \mu\text{mol/l}$) apparaît détaché près de l'équateur, à l'emplacement du noyau de salinité ($S > 35,5 \text{‰}$) signalé précédemment (fig. 3).

Toutefois on peut dès à présent noter un certain déplacement méridien du noyau supérieur à $3 \mu\text{mol NO}_2/\text{l}$: il est entre 3° et 4°S à $171^\circ 30 \text{E}$, 4° et 5°S à 169°E et 5° et 6°S à 166°E .

Nous avons représenté en surimpression (fig. 6) les niveaux d'accumulations d'ammoniaque qui se situent remarquablement près de la couche d'accumulation de nitrite, à la limite supérieure de celle-ci.

5. CONTINUITÉ ZONALE DE LA STRUCTURE VERTICALE DE NITRITE

L'examen successif des distributions méridiennes de nitrite en fonction de la profondeur suggère une apparente continuité zonale de la « poche à nitrite », entre 174°E et 163°E . Mais la couche d'accumulation possède une structure verticale relativement complexe et des études antérieures (OUDOT *et al.*, 1969; OUDOT *et al.*, 1972) ont montré qu'il est possible de dégager au sein de cette couche différents

niveaux isanostériques à teneurs maximales en nitrite, d'extension méridienne plus ou moins grande, qu'on pourrait, par analogie avec les strates géologiques, assimiler à des horizons apparus successivement dans le temps (OUDOT et WAUTHY, 1976).

L'étude de la distribution méridienne du nitrite dans le champ de densité au cours de la présente campagne (fig. 7) révèle qu'il n'y a pas en fait de continuité isanostérique absolue, ni dans le sens méridien ni dans le sens zonal, des niveaux maximaux verticaux de nitrite. Il apparaît cependant que certains horizons se retrouvent d'une coupe à l'autre sur un même niveau isanostérique. L'analyse des propriétés thermo-halines de ces horizons permet de vérifier leur continuité hydrologique : d'une coupe à l'autre chaque horizon (fig. 8) garde des caractéristiques T-S très voisines.

On peut ainsi dégager six horizons différents de nitrite, plus ou moins individualisés sous forme de noyaux, susceptibles d'être suivis sur une distance zonale plus ou moins grande (fig. 7) :

- l'horizon I est illustré, à 174°E , par le noyau $\text{NO}_2 > 3,0 \mu\text{mol/l}$ entre 5° et 6°S sur le niveau isanostérique 440 cl/t ; tout en se rapprochant de l'équateur, il s'amenuise progressivement de 174°E à 166°E ;

-- l'horizon II apparaît à 7° - 8°S sur le niveau isanostérique 460 cl/t ; on le suit de 174°E à 163°E où il fusionne avec l'horizon III (fig. 8 : stations 80 et 81) ;

- l'horizon III identifié à $171^\circ 30 \text{E}$ comme le noyau $> 3,0 \mu\text{mol/l}$ (entre 3° et 4°S) sur le niveau isanostérique 460 cl/t existe déjà à 174°E ; on le retrouve à une situation de plus en plus méridionale lorsqu'on se déplace vers l'ouest, si bien qu'il fusionne à 163°E avec l'horizon II ; l'horizon III s'alourdit également d'est en ouest et ses propriétés thermo-halines se rapprochent de celles de l'horizon I (fig. 8 : stations 79 et 80) ;

- l'horizon IV est représenté dès la première coupe par le noyau isolé au nord de l'équateur ($> 1,0 \mu\text{mol/l}$) sur le niveau isanostérique 480 cl/t ; il apparaît également de plus en plus loin au sud de l'équateur lorsqu'on se déplace vers l'ouest et on peut le suivre jusqu'à 163°E ;

- l'horizon V apparaît à 169°E sous la forme du petit noyau $> 2,0 \mu\text{mol/l}$ à 2°S , entre les niveaux isanostériques 490 et 500 cl/t ; il est suivi jusqu'à 163°E ;

-- l'horizon VI apparaît comme maximum vertical de nitrite au niveau 510 cl/t, à la dernière section méridienne (2°S) ; il est cependant déjà ébauché à 166°E comme le témoignent les concentrations supérieures à $1,0 \mu\text{mol/l}$ au-dessus de 500 cl/t.

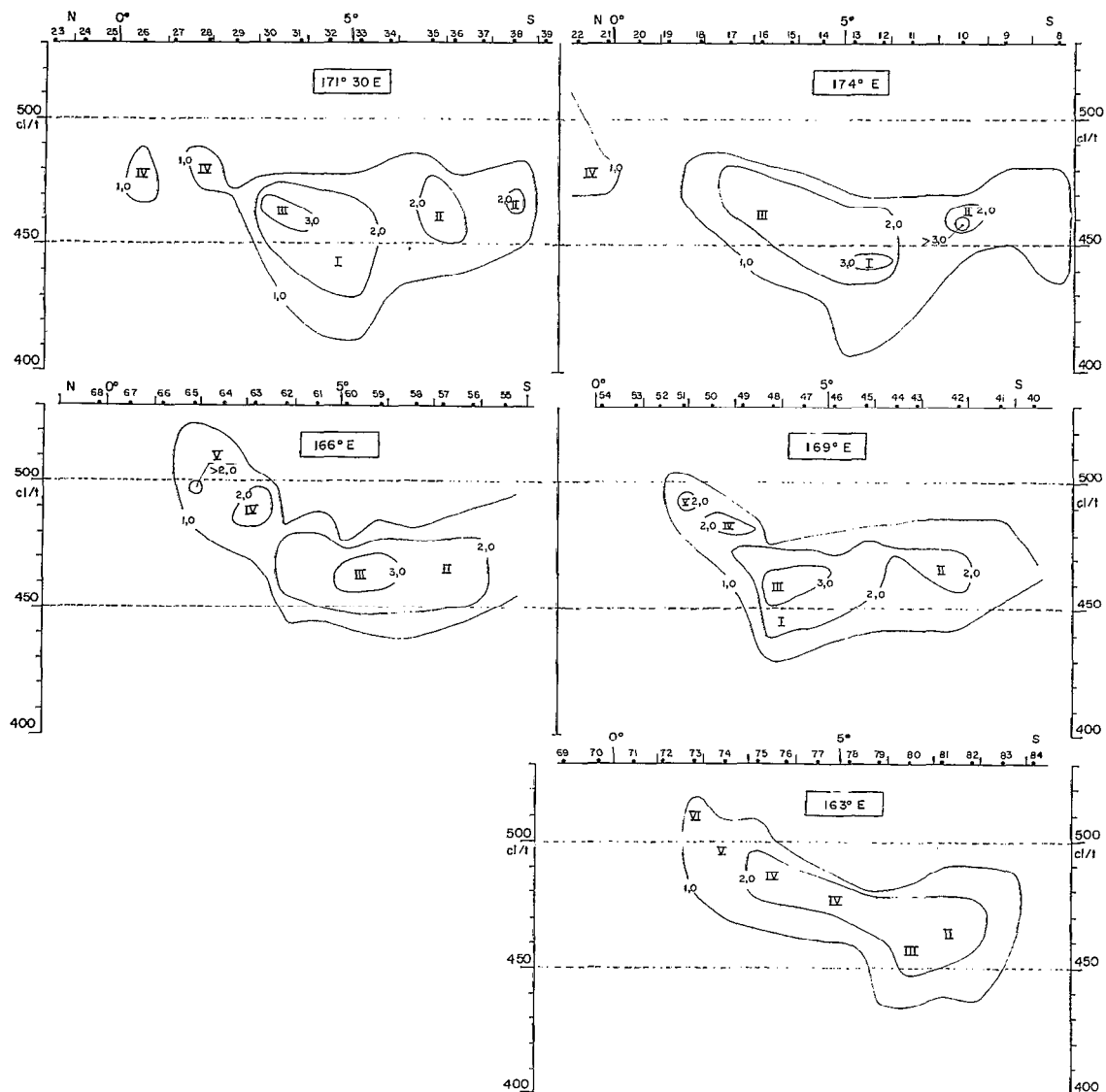


Fig. 7. — Distributions méridiennes du nitrite en fonction de la densité durant la campagne ÉPONITE 2. En chiffres romains, les divers horizons de nitrite.

Meridian distributions of nitrite versus thermosteric anomaly during the EPONITE 2 cruise. In roman numerals, the various nitrite horizons.

Outre le déplacement méridien de certains noyaux de nitrite vers le sud au-dessus du niveau 450 cl/t et vers le nord en dessous, le trait dominant de l'évolution zonale de la structure verticale de la couche d'accumulation de nitrite reste donc la disparition progressive de nitrite en dessous de 450 cl/t et l'apparition de nitrite au-dessus de 500 cl/t, c'est-à-dire une remontée apparente d'est en ouest de la couche d'accumulation dans des eaux plus légères.

6. ANALYSE ISENTROPIQUE DES DIVERS HORIZONS DE NITRITE

Le plan de marche du navire pendant la campagne est tel que notre déplacement zonal moyen vers l'ouest à la latitude de 5° S est de 3×60 milles en 7 jours environ, soit un déplacement zonal apparent de 1 nœud. Ce déplacement zonal apparent est sans doute plus rapide que la vitesse d'écoulement de la

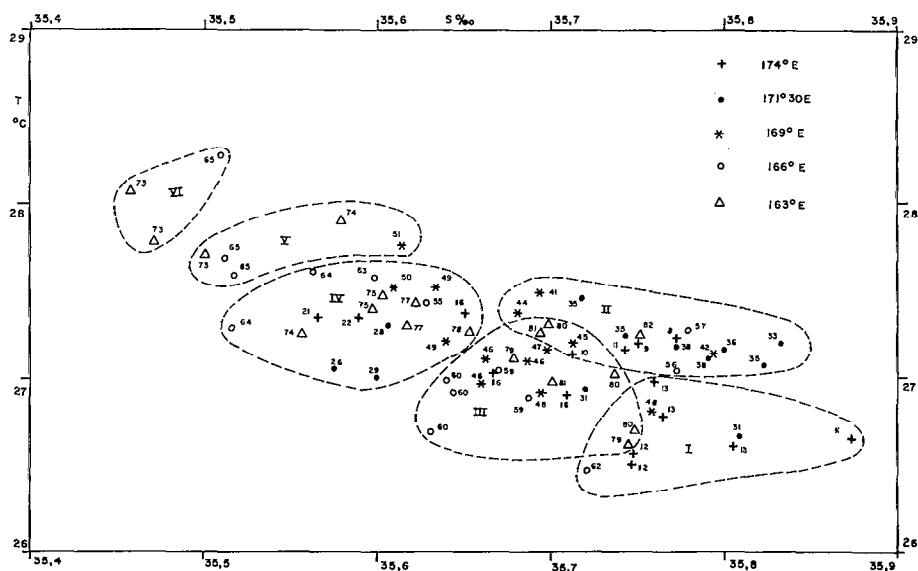


Fig. 8. — Diagramme T.S. des points figuratifs des horizons de nitrite.
T.S. diagram of points featuring the nitrite horizons.

masse d'eau qui renferme la « poche à nitrite » et il est bien rare que nous ayons retrouvé la même eau lors de nos passages successifs à 5° S. Cependant la continuité hydrologique des parcelles d'eau révélée par l'analyse du diagramme T.S. (fig. 8) nous autorise à suivre le déplacement zonal des divers horizons de nitrite sur des surfaces isanostériques caractéristiques souvent plus adaptées à l'examen de l'évolution des propriétés des masses d'eau (TSUCHIYA, 1968) que les surfaces d'égale profondeur.

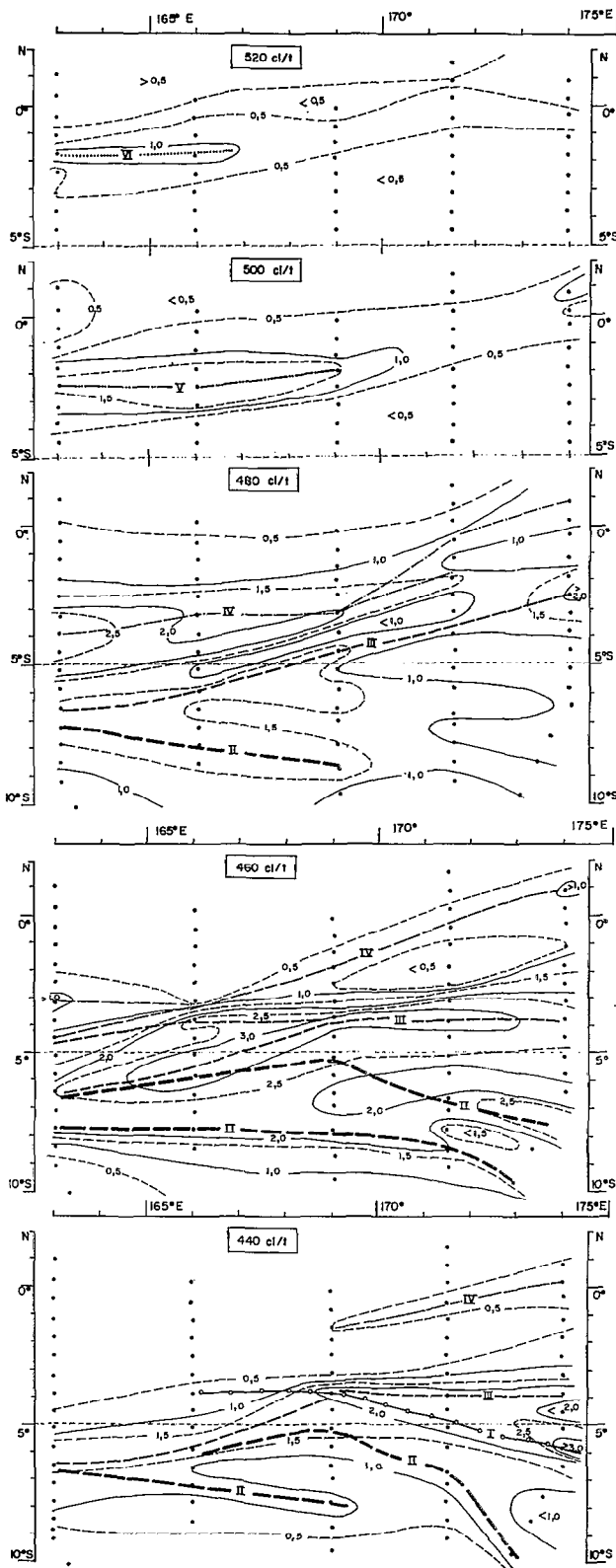
En établissant la continuité des horizons de nitrite sur les surfaces isanostériques comprises entre 440 et 520 cl/t (fig. 9), on fait clairement ressortir leur décalage méridien avec le déplacement en longitude. Dans l'ensemble ce décalage est orienté vers le sud pour les horizons situés au départ au nord de 5° S et vers le nord pour ceux situés au sud de 5° S, traduisant la convergence bien connue des eaux à cette latitude.

7. DISCUSSION

Sans préjuger du mécanisme biochimique responsable de la formation du maximum de nitrite, dont l'étude fait l'objet d'une présentation séparée (OUDOT, 1978), il est utile de comparer le présent développement de la poche à nitrite aux situations rencontrées par le passé, dans la même région ou à une autre longitude, et en particulier de replacer

l'évolution zonale décrite précédemment dans un cadre plus vaste, pour tenter de préciser les processus physiques de régulation de la couche d'accumulation.

De 174° E à 163° E, il n'y a pas continuité absolue de la couche d'accumulation : celle-ci semble se déplacer dans des couches d'eaux plus légères (fig. 7) en s'érodant par le bas et s'étoffant par le haut. Malgré un certain enfoncement général des surfaces isanostériques en direction de l'ouest (cet enfoncement est illustré par le changement de profondeur entre 174° E et 163° E du maximum de salinité de l'E.S.P.S. (figure 3) qui s'écoule isentropiquement d'est en ouest), le maximum de nitrite au voisinage de 5° S (fig. 6) se rapproche légèrement de la surface vers l'ouest : il est à 140 m à 174° E et 120 m à 163° E (fig. 10). Ces changements de profondeur (remontée du maximum de nitrite et enfoncement du maximum de salinité) se manifestent depuis le Pacifique central (140° W) et se prolongent à l'ouest de 163° E. Le maximum vertical de nitrite se développe à 142° W (ROTSCHI *et al.*, 1969; DONGUY *et al.*, 1970) sur le niveau isanostérique 320 cl/t, c'est-à-dire en dessous du maximum de salinité (continu d'est en ouest sur le niveau 350 cl/t) situé à cette longitude légèrement au-dessus de 150 m (fig. 10). A l'ouest au contraire (163° E) le maximum de nitrite (120 m - 470 cl/t) est nettement au-dessus du maximum de salinité proche de 200 m. Il arrive donc naturellement qu'à une certaine longitude intermédiaire les niveaux maxima de nitrite et de salinité coïncident : c'est cette coïncidence fortuite à 150 m qu'ont rencontrée,



à 155° W, HATTORI et WADA (1971) qui ont alors rapporté l'association entre maximum de nitrite et maximum de salinité de l'E.S.P.S.

Au niveau du maximum de nitrite toujours situé dans la partie supérieure de la thermocline, la température, qui pour HISARD et PITON (1969) d'une part et HATTORI et WADA (1971) d'autre part, semble être un facteur déterminant dans la formation du nitrite, varie notablement entre 163° E (27-28 °C) et 140° W (23-24 °C), sans que les concentrations maximales de nitrite en soient affectées : 2,89 à 163° E - 2,96 à 174° E - 2,92 à 155° W et 2,84 $\mu\text{mol/l}$ à 140° W.

Il est assez surprenant de constater pendant toute la durée de la campagne un développement aussi permanent de la « poche à nitrite » quand on connaît les variations importantes relevées à court terme en d'autres occasions (OUDOT *et al.*, 1969; OUDOT et WAUTHY, 1976). La concentration moyenne de nitrite dans la tranche d'eau 500-400 cl/t reste sensiblement constante de 174° E à 163° E (1,03 - 1,02 - 1,07 - 1,04 - 1,01 $\mu\text{mol NO}_2/\text{l}$ respectivement à chaque longitude), alors que la salinité diminue très légèrement (35,77 - 35,79 - 35,75 - 35,73 - 35,71 ‰). Une telle conservation de la « poche » pourrait bien être la conséquence de la disparition de l'upwelling équatorial, en absence des vents alizés. En effet d'après notre hypothèse de circulation méridienne (OUDOT *et al.*, 1972), le nitrite accumulé dans la convergence au sud de l'équateur, serait « pompé » par l'upwelling équatorial au même titre d'ailleurs que l'eau dérivée du maximum de salinité (E.S.P.S.) (WAUTHY, 1975).

Le maintien de gradients verticaux et méridiens élevés à la limite de la « poche » et l'absence de continuité hydrologique même à petite échelle (174° à 163° E) du maximum de nitrite supposent un renouvellement permanent dans le temps et dans l'espace du nitrite, d'est en ouest. HATTORI et WADA (1971) analysant les résultats de HISARD et PITON (1969), pensent qu'il n'y a pas de changement saisonnier des teneurs en nitrite et qu'il règne plus ou moins un état d'équilibre gouverné par la production (ou la consommation) par les processus biochimiques et la diminution (ou l'augmentation) par les processus d'advection et de diffusion. Sur le nombre de nos croisières réalisées dans le Pacifique occidental, au voisinage de 170° E, en diverses époques de l'année (tabl. I), les deux campagnes (BORA 4 en

←
Fig. 9. — Distributions isentropiques du nitrite durant la campagne ÉPONITE 2. En chiffres romains, les horizons de nitrite.

Isentropic distributions of nitrite during the EPONITE 2 cruise. In roman numerals, the nitrite horizons.

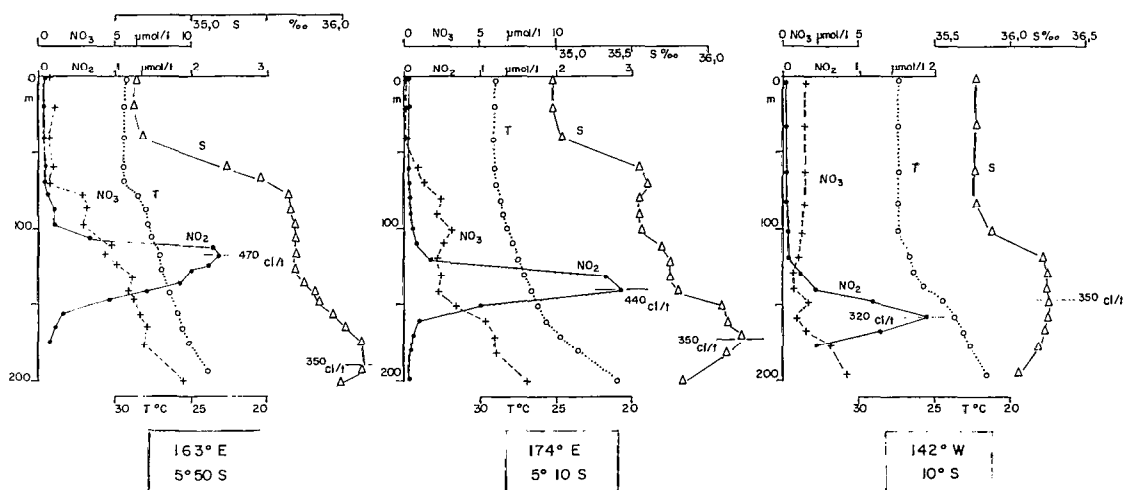


Fig. 10. — Distributions verticales du nitrite, du nitrate, de la température et de la salinité à trois longitudes différentes.
Vertical distributions of nitrite, nitrate, temperature and salinity at three different longitudes.

septembre-octobre 1966 et ÉPONITE 2 en août-septembre 1976) présentant le développement maximum de la « poche à nitrite » ont cependant eu lieu à la même saison, en été boréal, c'est-à-dire lorsque l'upwelling équatorial est traditionnellement le plus intense dans cette région. Ce facteur saisonnier n'est pas surprenant car, en suggérant une influence de l'upwelling équatorial, il s'accorde très bien avec notre hypothèse de formation de la « poche à nitrite », assimilée à un creuset de dégradation des déchets organiques de la production équatoriale (OUDOT *et al.*, 1972). Un des objectifs de la campagne ÉPONITE 2 était d'ailleurs d'étudier l'articulation entre l'évolution de l'upwelling équatorial et celle de la couche d'accumulation de nitrite. L'absence d'upwelling au moment où nous atteignons l'Équateur perturbe cet objectif mais nous fournit en revanche l'occasion d'observer un déploiement inégalé de la couche d'accumulation. Selon toute vraisemblance, à la lumière des salinités élevées ($S > 35,4 ‰$) relevées en surface lors du passage à $8^{\circ} S$, la zone équatoriale à l'est de $174^{\circ} E$ a été soumise, avant notre arrivée dans la région, à un upwelling intense qui a pu entraîner une abondante production organique. Les déchets de cette phase de production entraînés vers l'ouest par la circulation équatoriale, en absence d'upwelling ultérieur, restent accumulés dans la convergence sud-équatoriale.

La « poche à nitrite » étalée au nord de l'équateur est sensiblement moins développée que celle présente au sud (HATTORI et WADA, 1971 ; OUDOT et WAUTHY, 1976). Les premiers auteurs attribuent cette différence d'importance à des processus biologiques différents de formation du nitrite. Pour notre part, nous pensons que la cause de cette dissymétrie dans

la distribution méridienne serait plutôt de nature hydrologique. Au nord de l'Équateur, la zone de convergence entre le Courant Équatorial et le Contre Courant Équatorial Nord est beaucoup plus stable dans le temps et dans l'espace, et surtout plus proche de l'équateur, que son image dans le sud (ROTSCHI *et al.*, 1972). Il s'ensuivrait dans la zone nord un recyclage plus régulier et plus rapide de nitrite, qui n'aurait donc pas la possibilité de s'emmagasiner dans la poche comme au sud. Un tel mécanisme pourrait par ailleurs expliquer le fait que dans les parties orientales des océans, on n'ait pas relevé dans les zones de convergence bordant l'équateur des concentrations de nitrite aussi élevées que dans l'ouest : l'upwelling équatorial étant dans ces régions un trait hydrologique beaucoup plus permanent, le nitrite y serait également continuellement recyclé à l'image de l'ammoniaque sans permettre la création d'accumulation.

Durant la campagne ÉPONITE 2 les observations le long des trajets aller et retour (fig. 1) n'ont pas révélé l'existence, à la frontière entre le Contre Courant Équatorial Sud et le Courant Équatorial Sud, d'un dôme prononcé au voisinage de $10^{\circ} S$, comme ce fut le cas en juillet 1973 (OUDOT et WAUTHY, 1976). Ce dôme avait été admis jouer un rôle également dans la régulation de la « poche à nitrite », à l'image de celui de l'upwelling équatorial, à un degré moindre toutefois. L'absence de dôme sud équatorial est vraisemblablement le résultat de la disparition du Contre Courant Équatorial Sud (C.C.E.S.) : en absence de vents alizés à l'équateur, l'eau dessalée répandue en surface au nord de la Nouvelle-Guinée, qui donne naissance d'habitude au C.C.E.S., s'écoule préférentiellement le long de

l'équateur. En même temps le renforcement des alizés à l'approche de 10° S s'oppose à l'écoulement du C.C.E.S. à sa latitude habituelle. L'absence du dôme pourrait donc contribuer également à l'épaississement de la couche d'accumulation de nitrite.

8. CONCLUSIONS

Le développement particulier, tant en concentration qu'en dimensions de la couche d'accumulation de nitrite, relevée durant la campagne ÉPONITE 2, est selon toute vraisemblance le résultat de la disparition de l'upwelling équatorial.

Malgré une continuité zonale apparente de la « poche à nitrite », la structure verticale de la couche d'accumulation évolue légèrement mais régulièrement de 174° E à 163° E, suggérant un renouvellement permanent du nitrite d'est en ouest dans des couches d'eau plus légères. Cette modification de la distribution du nitrite dans le champ hydrologique est un trait d'une évolution continue à plus grande échelle (140° W à 150° E). Cette évolution, tributaire des conditions hydroclimatiques régnant à l'équateur, est plus ou moins rapide dans le temps et dans l'espace ; le transport zonal du maximum de nitrite, sous forme de continuité moléculaire, ne peut se faire sur une longue distance, contrairement à celui de salinité. Au sein de la couche d'accumulation, les divers horizons de nitrite, résultats de la dégradation

de différentes phases successives (dans l'espace et dans le temps) de production organique dans l'upwelling équatorial et/ou dans le dôme sud équatorial (OUDOT et WAUTHY, 1976) sont intégrés dans les cellules de circulation méridiennes associées à l'upwelling et au dôme : ils se déplacent vers la zone de convergence dans les couches supérieures et vers l'Équateur (d'une part et probablement vers le sud d'autre part) dans les couches inférieures reposant sur le maximum de salinité de l'E.S.P.S. Lorsqu'en absence d'alizés la divergence équatoriale des eaux de surface cesse, l'appel d'eau subsurface riche en sel et en nitrite se relâche et le nitrite reste accumulé au sud de l'équateur donnant lieu à un développement accentué de la couche d'accumulation. Dans ce cas le devenir probable du nitrite reste la transformation en nitrate, stade ultime de la reminéralisation de l'azote organique.

Le développement de la « poche à nitrite » est donc le résultat d'un équilibre plus ou moins stable entre le taux de production et le taux de disparition de nitrite entretenu par la dynamique de l'upwelling équatorial (et dans une moindre part du dôme sud-équatorial). Les fluctuations spatiales et temporelles de la couche d'accumulation de nitrite seraient en quelque sorte le reflet des variations hydroclimatiques de la circulation superficielle à l'Équateur.

*Manuscrit reçu au Service des Publications de l'O.R.S.T.O.M.,
le 27 juillet 1979.*

BIBLIOGRAPHIE

- ARMSTRONG (F. A. J.) & TIBBITS (S.), 1968. — Photochemical combustion of organic matter in sea water for nitrogen, phosphorus and carbon determination. *J. Mar. Biol. Ass. U. K.*, vol. 48 : 143-152.
- BENDSCHNEIDER (K.) & ROBINSON (R. J.), 1952. — A new spectrophotometric method for the determination of nitrite in sea water. *J. Mar. Res.*, vol. 11 : 87-96.
- BRANDHORST (W.), 1959. — Nitrification and denitrification in the eastern tropical north Pacific. *J. Cons. Perm. Int. Explor. Mer*, vol. 25 : 3-20.
- BREWER (P. G.) & RILEY (J. P.), 1966. — The automatic determination of silicate silicon in natural waters with special reference to sea water. *Anal. Chim. Acta*, vol. 35 : 514-519.
- DONGUY (J. R.), ROUGERIE (F.), COLIN (C.), OUDOT (C.), JARRIGE (F.), 1970 — Résultats des observations physico-chimiques des croisières CARIDE 4-5-6 du N.O. CORIOLIS. *O.R.S.T.O.M., Centre de Nouméa*, Rapp. 40, 35 p. (*multigr.*).
- DONGUY (J. R.), HENIN (C.), JARRIGE (F.) & ROUGERIE (F.), 1974. — Esquisse dynamique et hydrologique du Pacifique Central Sud. *Cah. O.R.S.T.O.M., sér. Océanogr.*, vol. XII, n° 2 : 129-139.
- DONGUY (J. R.) & HENIN (C.), 1978. — Hydroclimatic anomalies in the South Pacific. *Oceanol. Acta*, vol. 1 : 25-30.
- HATTORI (A.) & WADA (E.), 1971. — Nitrite distribution and its regulating processes in the equatorial Pacific Ocean. *Deep Sea Res.*, vol. 18 : 557-568.
- HISARD (P.) & PITON (B.), 1969. — La distribution du nitrite dans le système des courants équatoriaux de l'Océan Pacifique à 170° E. *J. Cons. Perm. Int. Explor. Mer*, vol. 32 : 303-317.
- HISARD (P.), MERLE (J.) & VOITURIEZ (B.), 1970. — The equatorial undercurrent at 170° E in March and April 1967. *J. Mar. Res.*, vol. 28 : 281-303.
- KOROLEFF (F.), 1969. — Direct determination of ammonia in natural waters as indophenol blue. *ICESCM 1969/C* : 9, 4 pp. *mulligr.*

- MAGNIER (Y.), ROTSCHI (H.), RUAL (P.) & COLIN (C.), 1973. -- Equatorial circulation in the western Pacific. *Progr. in Oceanography*, vol. 6. B. Warren ed., Pergamon Press : 29-46.
- MURPHY (J.) & RILEY (J. P.), 1962. -- A modified simple solution method for the determination of phosphate in natural waters. *Anal. Chim. Acta*, vol. 27 : 31-36.
- OUDOT (C.), 1978. -- Continuité zonale et circulation méridienne du maximum de nitrite dans le Pacifique tropical sud-ouest. II. -- Interprétation : un aspect de la régénération des sels nutritifs. *Cah. O.R.S.T.O.M., sér. Océanogr.*, vol. XVI, n° 3-4 : 363-376.
- OUDOT (C.), HISARD (P.) & VOITURIEZ (B.), 1969. -- Nitrite et circulation méridienne à l'équateur dans le Pacifique Occidental. *Cah. O.R.S.T.O.M., sér. Océanogr.*, vol. VII, n° 4 : 67-82.
- OUDOT (C.), RUAL (P.) & WAUTHY (B.), 1972. -- Mineralization south of the Equator in relation to equatorial fertility. *Int. Symp. Oceanogr. South Pac.*, February 1972, Wellington, New Zealand, Abstracts : 27-29.
- OUDOT (C.) & WAUTHY (B.), 1976. -- Upwelling et dôme dans le Pacifique tropical occidental : distributions physico-chimiques et biomasse végétale. *Cah. O.R.S.T.O.M., sér. Océanogr.*, vol. XIV, n° 1 : 27-48.
- OUDOT (C.) & WAUTHY (B.), 1978. -- Adaptation d'un chromatographe en phase gazeuse pour le dosage en mer des gaz dissous : azote, oxygène et gaz carbonique total. *Cah. O.R.S.T.O.M., sér. Océanogr.*, vol. XVI, n° 1 : 89-102.
- ROTSCHI (H.), JARRIGE (F.), MERLE (J.), RUAL (P.), 1969. -- Résultats des observations physico-chimiques de la croisière DIADÈME du N.O. CORIOLIS. *O.R.S.T.O.M., Centre de Nouméa*, Rapp. 34 : 16 p. (mulligr.).
- ROTSCHI (H.), HISARD (P.) & JARRIGE (F.), 1972. -- Les eaux du Pacifique occidental à 170° E entre 20° S et 4° N. Coupes et cartes dressées par les Océanographes du Centre O.R.S.T.O.M. de Nouméa. *Trav. et Doc. O.R.S.T.O.M.*, n° 19 : 113 p.
- ROTSCHI (H.) & WAUTHY (B.), 1973. -- Hydrologie et dynamique dans le Pacifique occidental tropical, en relation avec les mécanismes de fertilisation. *Bull. Mus. Nat. Hist. Nat., Paris*, 3^e sér., n° 147 : 65-81.
- STRICKLAND (J. D. H.) & PARSONS (T. R.), 1968. -- A practical handbook of sea water analysis. *Fish. Res. Board Canada*, Bull. 167, 311 p.
- TAKAHASHI (T.), WEISS (R. F.), CULBERSON (C. H.), EDMOND (J. M.), HAMMOND (D. E.), WONG (C. S.), LI YU-HUI & BAINBRIDGE (A. E.), 1970. -- A carbonate chemistry profile at the 1969 GEOSECS intercalibration station in the Eastern Pacific Ocean. *J. Geophys. Res.*, vol. 75 : 7648-7666.
- TSUCHIYA (M.), 1968. -- Upper waters of the intertropical Pacific Ocean. *The Johns Hopkins Oceanogr. Studies*, n° 4, 50 p.
- WAUTHY (B.), 1975. -- Equatorial upwelling originality (Pacific Ocean). *13th Pacific Science Congress*, Vancouver, Canada.
- WOOD (E. D.), ARMSTRONG (F. A. J.) & RICHARDS (F. A.), 1967. -- Determination of nitrate in sea water by cadmium-copper reduction to nitrite. *J. Mar. Biol. Ass. U. K.*, vol. 47 : 23-31.
- WOOSTER (W. S.), CHOW (T. J.) & BARRETT (L.), 1965. -- Nitrite distribution in Peru Current waters. *J. Mar. Res.*, vol. 23 : 210-211.