

UPWELLING ET DÔME DANS LE PACIFIQUE TROPICAL OCCIDENTAL : DISTRIBUTIONS PHYSICO-CHIMIQUES ET BIOMASSE VÉGÉTALE

CLAUDE OUDOT ET BRUNO WAUTHY

Océanographes, O.R.S.T.O.M., B.P. A 5, Nouméa-Cedex (Nouvelle-Calédonie)

RÉSUMÉ

Les distributions des variables physico-chimiques observées durant la campagne MINEPO (1973) sont présentées et interprétées en fonction du modèle modifié et adapté de circulation méridienne équatoriale proposé par CROMWELL. La répartition de la production primaire met clairement en évidence, outre l'upwelling équatorial, une importante zone productive associée à un dôme au sud de l'Équateur. Un important déplacement méridien des grands traits de structure hydrologique est relevé à court terme. L'étude du nitrile dans le champ de densité montre l'importance de la circulation méridienne en zone équatoriale et permet de distinguer différents stades, dans le temps et l'espace, de formation de ce sel. Les anomalies de distributions verticales des sels nutritifs (inversions), en particulier de nitrate, sont interprétées physiquement et biochimiquement.

ABSTRACT

The distributions of physicochemical observations collected during the MINEPO cruise (1973) are given and interpreted according to the modified theoretical model of meridional equatorial circulation proposed by CROMWELL. The repartition of primary production points out, besides the equatorial upwelling, an important productive area associated with a doming south of the Equator. An important meridional short-term shift of the hydrological features is noticed. The study of nitrite distribution in the field of density shows the importance of the equatorial meridional circulation and allows to discern various stages, in time and space, of the formation of this salt. The anomalies of vertical distributions of nutrients (inversions), particularly nitrate, are discussed physically and biochemically.

1. Introduction.

Il est communément admis depuis CROMWELL (1953) que dans les parties centrales et occidentales de l'Océan Pacifique Équatorial la production des eaux ne saurait être due à une advection de sels nutritifs depuis le secteur oriental bordant le continent sud-américain, siège d'enrichissements continus sous l'effet de phénomènes d'upwelling. Le régime des alizés dans le Pacifique central est suffisamment constant dans le temps et puissant pour entretenir une divergence des eaux de surface à l'Équateur

qui induit un upwelling, source de matières nutritives nécessaires à toute production primaire.

Jusqu'aux travaux du Centre O.R.S.T.O.M. de Nouméa, la présence d'un upwelling équatorial à l'ouest de 180° E n'apparaissait pas comme un des traits caractéristiques de la région : la force d'entraînement des alizés semblait trop faible pour provoquer un upwelling permanent qui puisse créer un refroidissement équatorial accompagné d'une augmentation des teneurs en sels nutritifs.

Sur onze croisières transéquatoriales le long du méridien 170° E, réparties sur une période de deux

ans et demi (novembre 1965 - mai 1968) neuf ont révélé l'existence d'un refroidissement équatorial. L'upwelling qui engendre ce refroidissement est rarement axé sur l'Équateur : on le trouve tantôt au nord, tantôt au sud. Ce décalage par rapport à l'Équateur, parfaitement illustré par CROMWELL (1953), résulte du régime des vents alizés soufflant sur la région, du secteur nord-est ou sud-est suivant la saison, et s'accompagne d'une circulation méridienne qui revêt un intérêt particulier pour la zone (OUDOT, RUAL et WAUTHY, 1972).

Dès les premières observations échelonnées le long du méridien 170° E entre 20° S et 4° N, de fortes concentrations de nitrite relevées au voisinage d'une zone de convergence, au sommet de la thermocline dans une couche bien oxygénée, ont retenu l'attention des chercheurs intrigués par l'origine de ce sel. La zone de convergence située approximativement à 5° S, est la limite entre le Contre-Courant Équatorial Sud (C.C.E.S.), courant de retour dessalé portant à l'est vers 10° S (JARRIGE, 1968) et le Courant Équatorial (C.E.), au nord de ce dernier, transportant vers l'ouest une production organique engendrée par l'upwelling équatorial. L'explication la plus communément acceptée pour les fortes teneurs en nitrite associées à la couche euphotique de l'océan ouvert considère le nitrite comme un stade intermédiaire de la formation de nitrate (RILEY et SKIRROW, 1965). Mais si des bactéries nitrifiantes oxydant l'ammoniaque ont bien été mises en évidence dans la couche euphotique (BRANDHORST, 1959 - CARLUCCI et Mc NALLY, 1969 - WADA et HATTORI, 1971), des bactéries dénitrifiantes engagées dans la réduction du nitrate ont été également signalées (PAGES, 1972 - HATTORI et WADA, 1971). Récemment des auteurs japonais (MIYAZAKI, WADA et HATTORI, 1973) utilisant des techniques d'analyse isotopique à l'azote marqué (N 15) ont montré que les activités potentielles pour la production de nitrite à partir de nitrate et d'ammoniaque sont du même ordre, dans les eaux peu profondes de la baie de Sagami. Ainsi le problème de l'origine du nitrite présent dans la couche superficielle (0-200 mètres) des océans, dont la résolution pourrait faire grandement avancer l'hypothèse de la reminéralisation de la matière organique dans la couche superficielle proposée par MENZEL et RYTHER (1970), reste entier.

Le nitrite, bien que connu pour son instabilité chimique relative, revêt par ailleurs un certain intérêt hydrologique : associé à un maximum de salinité il reflète une partie de la circulation zonale et méridienne. (WOOSTER, CHOW et BARRETT, 1965 - HISARD et PITON, 1969 - HATTORI et WADA, 1971 - OUDOT, HISARD et VOITURIEZ, 1969). La question de la continuité par advection de la couche d'accumulation de nitrite relevée à la latitude de la conver-

gence sud équatoriale sur pratiquement toute l'étendue du Pacifique, est posée.

En s'appuyant sur les résultats acquis au cours des nombreuses croisières accomplies par le N. O. CORIOLIS dans le Pacifique Occidental et principalement de la croisière ÉPONITE (août-septembre 1970) une hypothèse fût avancée sur la dynamique de la reminéralisation de la matière organique en zone équatoriale (OUDOT, RUAL et WAUTHY, 1972). Sous l'effet des vents alizés soufflant du secteur nord-est sur l'Équateur, les eaux froides et riches « upwellées » au nord de l'Équateur s'enfoncent à la latitude de la zone frontale du sud de l'Équateur, sous les eaux chaudes et homogènes de surface. Au cours de l'écoulement zonal et méridien la matière organique produite à la suite de l'upwelling est soumise au cycle progressif de la minéralisation illustré par la rencontre des fortes teneurs de nitrite

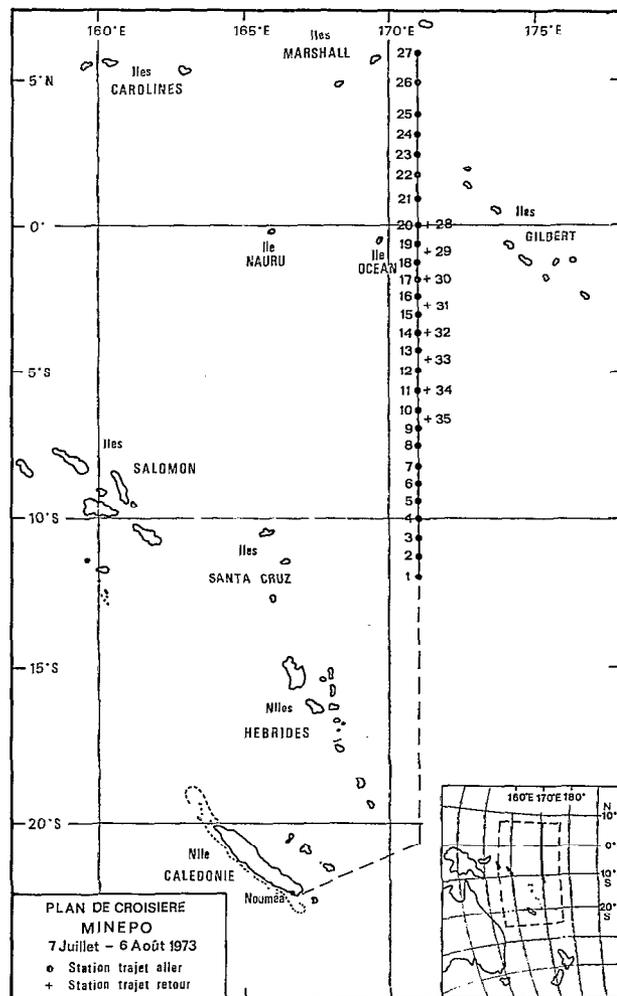


Fig. 1. — Position des stations effectuées par le N. O. LE NOROIT lors de la croisière MINEPO (1973).

puis de nitrate au voisinage de la convergence sud. Ce stock de sels nutritifs peut être utilisé pour alimenter un upwelling au sud de l'Équateur induit par des alizés de sud-est et renforcer la fertilité équatoriale. C'est dans le but de vérifier cette hypothèse dans d'autres conditions hydrologiques et de l'étayer si possible, qu'a été programmée la croisière MINEPO.

2. Plan de la croisière et méthodes.

La croisière MINEPO réalisée en juillet-août 1973 à bord du N. O. LE NOROIT présente deux phases d'exécution (fig. 1) :

- la première, la plus importante, consiste en un trajet méridien de 12° S à 6° N entrecoupé de stations hydrologiques et courantométriques espacées de 40 milles.
- la seconde, plus courte, avec un trajet méridien limité à 0° - 7° S, jalonné de stations hydrologiques et courantométriques tous les degrés.

L'intervalle de temps qui sépare les deux passages à l'Équateur est de huit jours et à 7° S de quinze jours.

Chaque station hydrologique conduit à un échantillonnage serré entre 0 et 200 mètres (20 niveaux suivant le trajet aller et 24 niveaux sur le trajet retour) au moyen de bouteilles Niskin 1,7 l (entièrement en PVC). Les déterminations de salinité, oxygène, ammoniacque, nitrite, nitrate, phosphate, silicate, azote et phosphore organique dissous et de pigments chlorophylliens sont réalisées à bord, immédiatement après la récolte des échantillons. En outre, les filtres qui ont servi à recueillir la matière particulée sont stockés pour l'analyse ultérieure au laboratoire de l'azote et du phosphore organique particulaire.

Les mesures de température, salinité et oxygène sont faites suivant les techniques classiques : respectivement thermomètres à renversement (fabrication japonaise YOSHINO), salinomètre à induction Autolab, méthode de WINKLER avec titrage potentiométrique automatique de l'iode libéré. Les sels nutritifs sont dosés automatiquement en adaptant à l'Auto Analyzer Technicon II les méthodes manuelles classiques : méthode de KOROLEFF (1969) pour l'ammoniacque, méthode de BENSCHNEIDER et ROBINSON (1952) pour le nitrite, méthode de WOOD, ARMSTRONG et RICHARDS (1967) pour le nitrate,

méthode de MURPHY et RILEY (1962) pour le phosphate, et méthode de BREWER et RILEY (1966) pour le silicate. 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 HIA 0,45 μ (STRICKLAND et PARSONS, 1968).

La détermination de l'azote et du phosphore organique dissous a lieu suivant la technique d'irradiation ultra-violette (lampe à vapeur de mercure 450 W) d'échantillons d'eau filtrée sur des filtres en fibre de verre Gelman type A (ARMSTRONG et TIBBITS, 1968). Cette même technique d'irradiation U. V est appliquée pour doser l'azote et le phosphore organique particulaire. En outre, des mesures d'extinction de la lumière à 260 nm, en cuve de 10 cm, ont été exécutées (à l'aide d'un spectrophotomètre Beckman DU2) sur les échantillons d'eau de mer filtrée en vue d'apprécier globalement la matière organique dissoute M.O.D. (ARMSTRONG et BOALCH, 1961). Les résultats de matière organique dissoute et particulaire seront présentés dans une autre publication en préparation.

Les observations courantométriques sont effectuées au moyen de deux courantomètres Hydro-Products modèle 501 B et les résultats sont donnés relativement à une couche de référence choisie à 500 m et supposée immobile (MAGNIER *et al.*, 1973).

Les observations météorologiques sont celles rapportées par la passerelle pendant le déroulement de la campagne.

3. Résultats d'observation (trajet aller).

3.1. CONDITIONS EN SURFACE.

L'analyse de la distribution des vents régnant sur la zone équatoriale pendant la croisière se résume en une opposition assez nette de part et d'autre de l'Équateur (fig. 2, a) :

- vent de secteur sud-est au nord de l'Équateur,
- vent de nord-est au sud,
- convergence à 3° N et vers 5°-7° S.

Sachant qu'il existe un temps de réponse entre la cause (vent) et l'effet (courant) plus ou moins long mais non négligeable, on est frappé par le bon accord entre la météorologie (fig. 2, a) et la circulation de surface (fig. 2, b), tout au moins dans la bande équatoriale proprement dite 4° N - 4° S. La divergence dynamique (1), au sein du C.E. est légèrement au

(1) On convient d'appeler « divergence dynamique » la divergence des composantes méridiennes du courant par opposition à « divergence hydrologique » qui est la manifestation au plan hydrologique (refroidissement thermique par exemple) de la divergence dynamique et qui est souvent décalée par rapport à cette dernière.

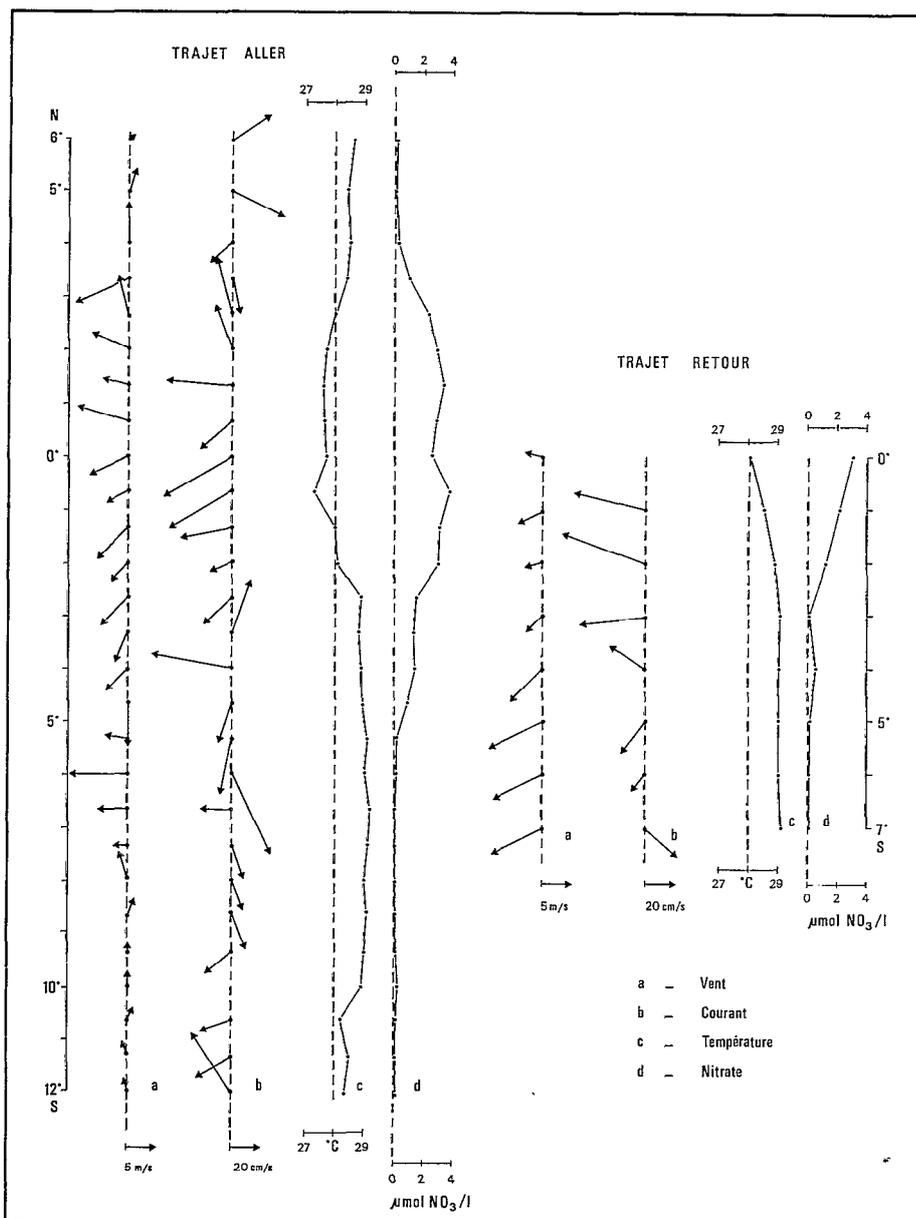


Fig. 2. — Distribution des vents (a), des courants (b), de la température (c) et de la teneur en nitrate (d) à la surface de la mer au cours des trajets aller et retour de la croisière MINEPO (1973).

nord de l'Équateur, ainsi que la divergence des composantes méridiennes du vent. Les flux est (C.C.E.N. au nord de 5° N et C.C.E.S. de 6° à 9° S) ne suivent pas exactement l'entraînement par le vent observé : ce sont en effet des courants de retour, de la masse d'eau accumulée sur la bordure occidentale de l'océan, qui s'écoulent dans une zone où les alizés plus faibles offrent une résistance moindre.

La situation hydrologique et ses conséquences

(distribution des sels nutritifs) montrent par contre le déphasage évoqué plus haut entre la cause et l'effet. L'upwelling ou divergence hydrologique, repéré en premier lieu par la distribution horizontale de la température (fig. 2, c) est situé légèrement au sud de l'Équateur. On note vers 10° S un léger refroidissement, qui sera commenté plus tard lors de la présentation de la coupe de distribution verticale de la température.

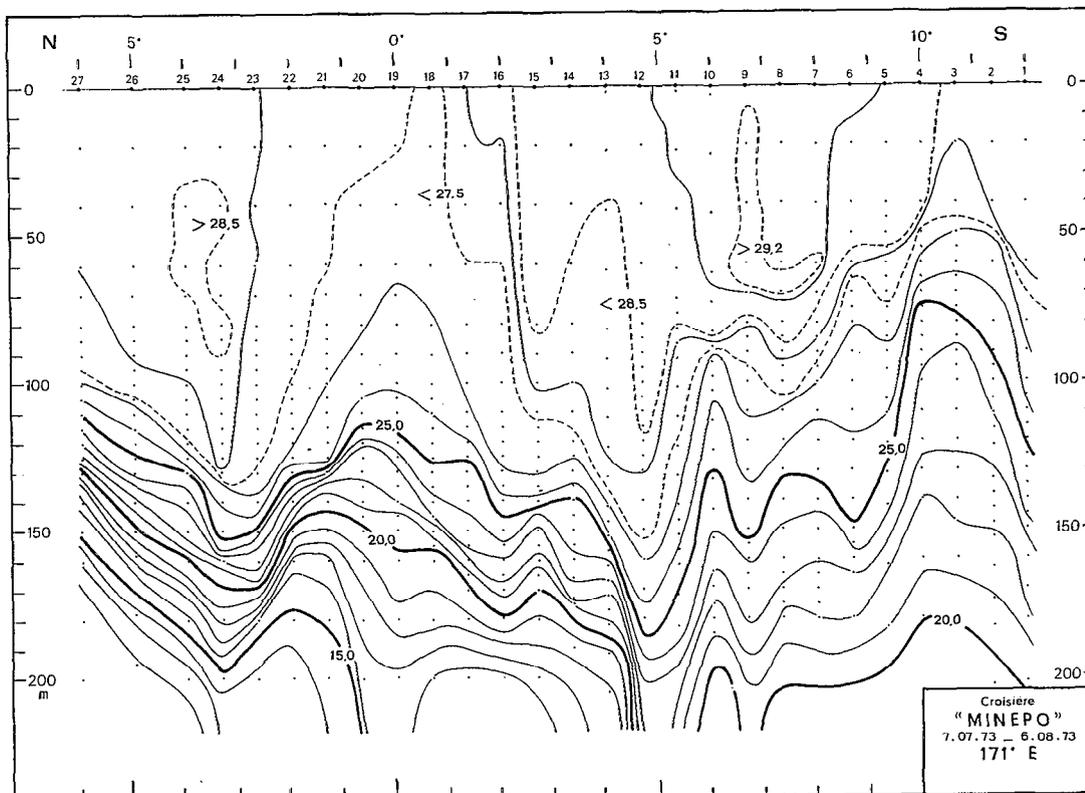


Fig. 3. — Distribution verticale de la température (°C) au cours du trajet aller.

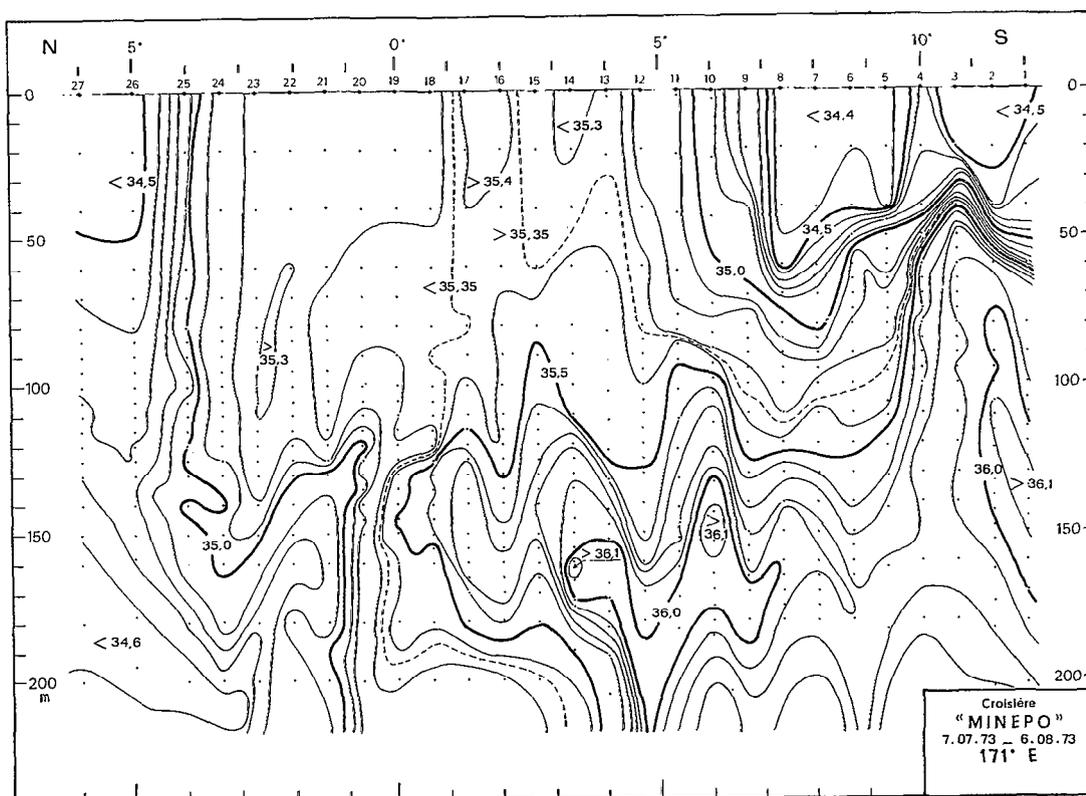


Fig. 4. — Distribution verticale de la salinité (‰) au cours du trajet aller.

La distribution des sels nutritifs à la surface de la mer (fig. 2, d) est l'image fidèle de la répartition des températures et des courants :

- l'axe de l'upwelling (maximum de nitrate) est légèrement au sud de l'Équateur,
- la zone d'enrichissement liée à l'upwelling équatorial est bordée par des zones épuisées en nitrate (teneurs inférieures à $0,10 \mu\text{mol/l}$),
- au voisinage de 10°S le très léger enrichissement sera confirmé par la distribution verticale du nitrate.

3.2. DISTRIBUTIONS VERTICALES ET MÉRIDIENNES DES PROPRIÉTÉS PHYSICO-CHIMIQUES.

Dans la couche de surface (0-100 mètres) les structures thermique (fig. 3) et haline (fig. 4) illustrent la présence d'un upwelling intense qui affecte la bande équatoriale de 3°N à 2°S . Le front halin à $3^\circ\text{-}4^\circ \text{N}$, frontière entre deux épaisses couches homogènes en température et salinité, et plus particulièrement la zone d'inversions de température ($T > 28,5 \text{ }^\circ\text{C}$) marquent la convergence entre une masse d'eau chaude et dessalée au nord et une autre

plus froide et plus salée à l'Équateur. En reprenant la terminologie de GRIFFITHS (1965) et pour schématiser la structure différente au nord de l'Équateur par rapport au sud, nous qualifierons cette limite de « front convergent ». Au sud de l'Équateur un même front halin se retrouve à $6^\circ\text{-}7^\circ \text{S}$, accompagné également d'une zone d'inversions de température ($T > 29,2 \text{ }^\circ\text{C}$). En outre une zone frontale thermique à 2°S vient compliquer la situation hydrologique : le gradient thermique méridien dû à l'upwelling équatorial et lié à la divergence des eaux de surface est appelé par analogie « front divergent ».

En subsurface (en dessous de 100 mètres) le trait caractéristique est l'affrontement à l'Équateur d'une masse d'eau dessalée d'origine nord et de la masse d'eau salée de l'hémisphère sud, elle-même scindée en deux noyaux de salinité supérieure à $36,0 \text{ }^\circ\text{‰}$. Au voisinage de 10°S , les isothermes aussi bien que les isohalines révèlent la présence d'un dôme prononcé entre 50 et 150 mètres de profondeur.

Les distributions verticales de sels nutritifs, à l'image de celle du nitrate (fig. 5), confirment les grands traits de structure définis précédemment. Outre l'enrichissement superficiel consécutif à l'upwelling équatorial limité par les zones frontales

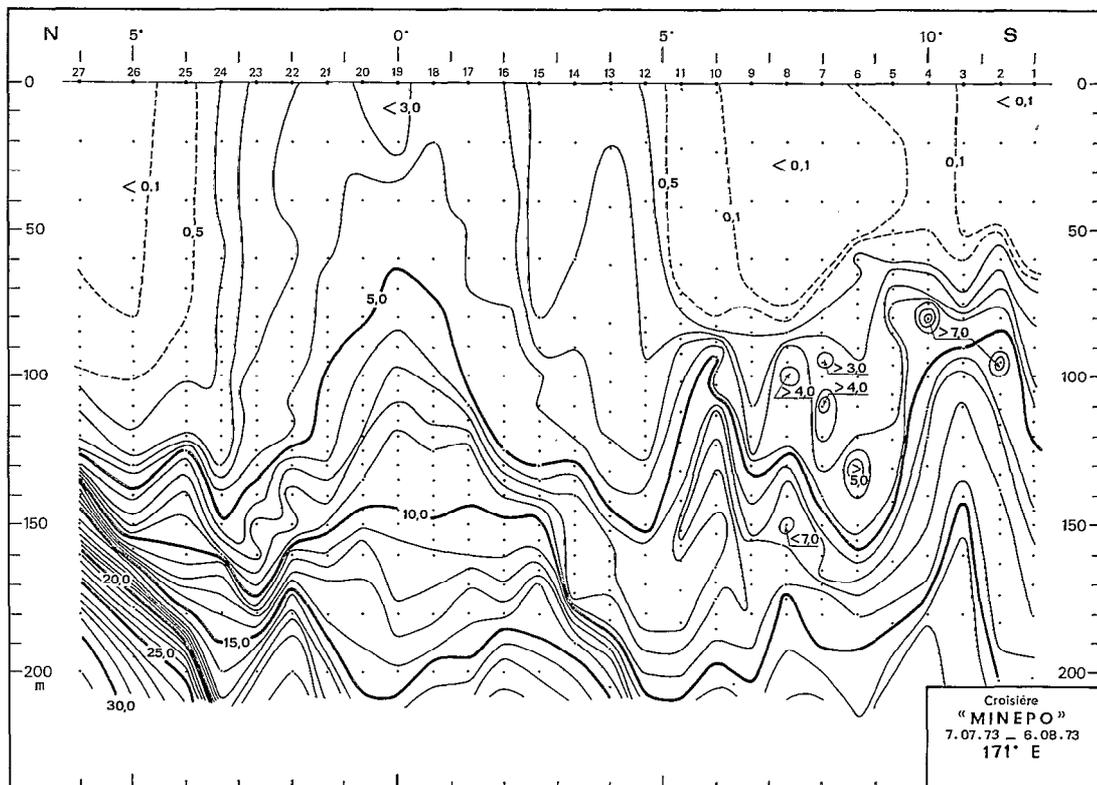


Fig. 5. — Distribution verticale du nitrate ($\mu\text{mol/l}$) au cours du trajet aller.

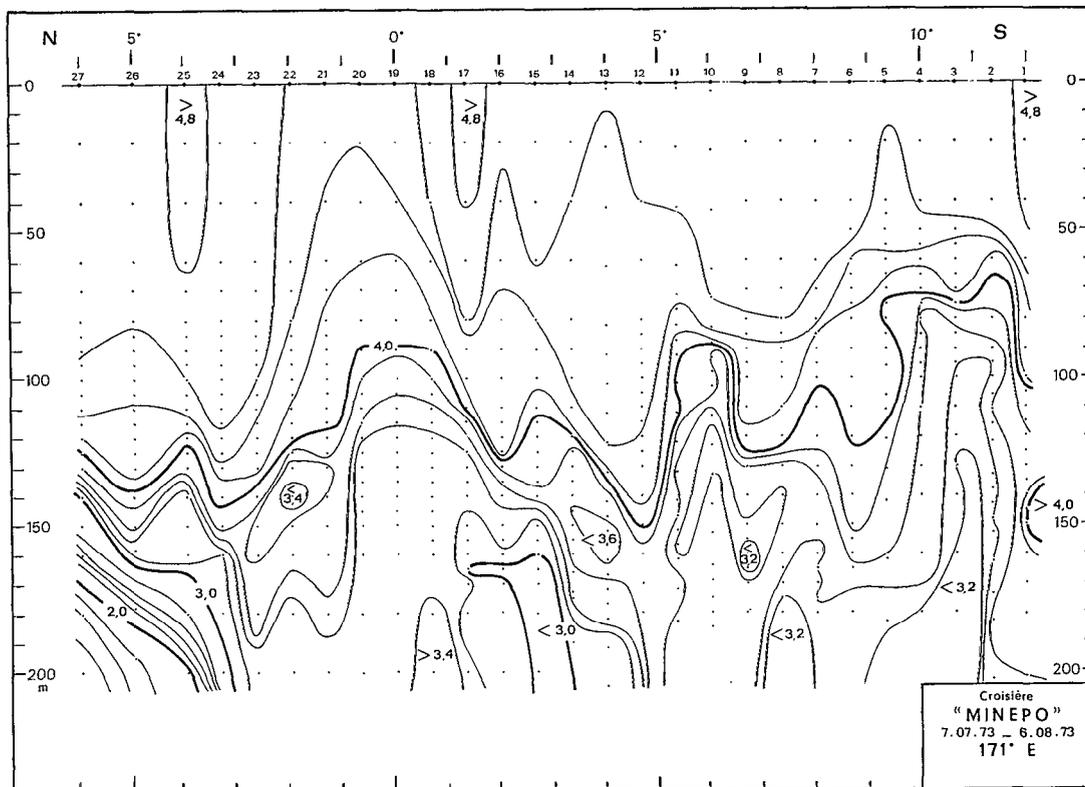


Fig. 6. — Distribution verticale de l'oxygène (ml/l) au cours du trajet aller.

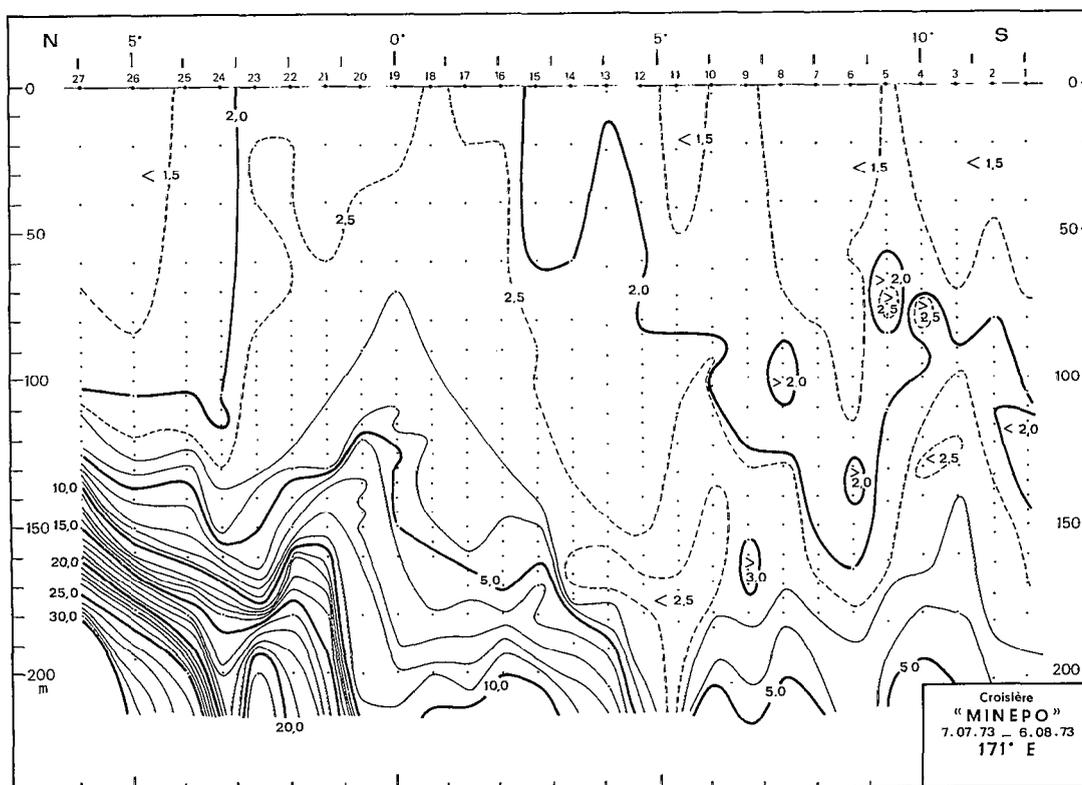


Fig. 7. -- Distribution verticale du silicate ($\mu\text{mol/l}$) au cours du trajet aller.

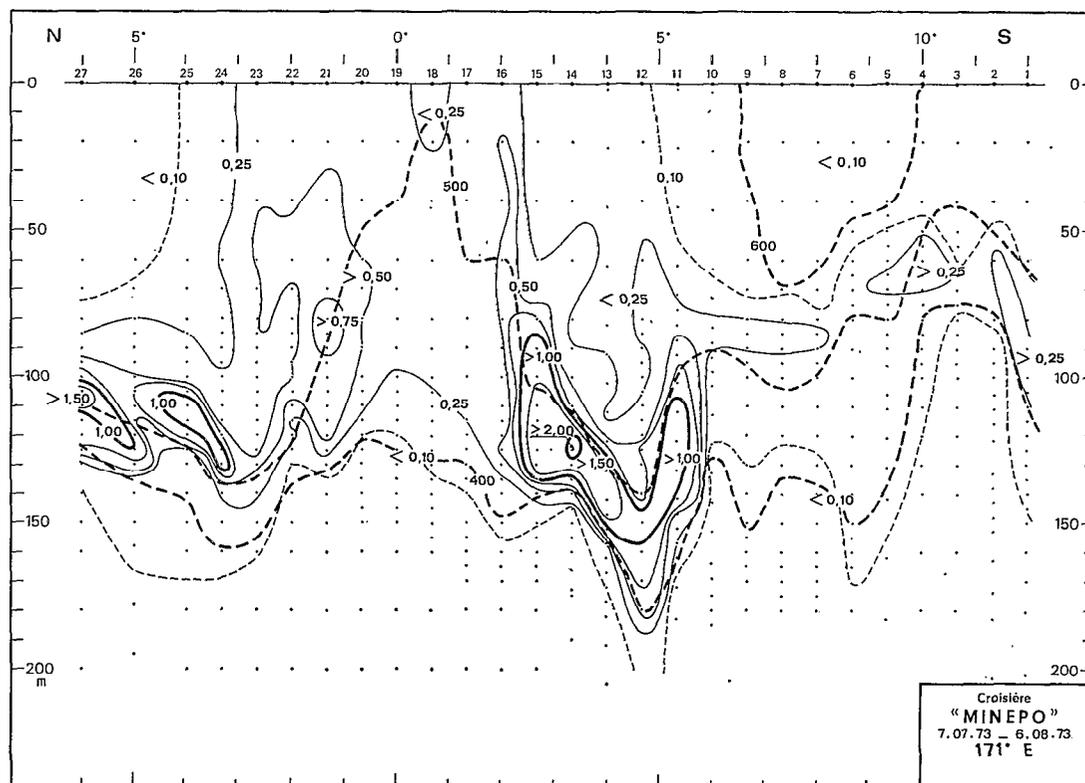


Fig. 8. — Distribution verticale du nitrite ($\mu\text{mol/l}$) au cours du trajet aller (en tirets : lignes isanostériques en cl/t).

à 3° N et 5° S et celui subsurface consécutif au dôme à 10° S (et à un degré moindre à 6° S) les traits saillants de la distribution verticale des sels nutritifs sont les maxima (noyaux isolés au sud et inversions au nord) liés aux zones de convergence. La distribution de l'oxygène (fig. 6) fournit une nouvelle illustration de la structure hydrologique définie précédemment (upwelling — convergences — dôme). Il est des traits particuliers propres au silicate (fig. 7) qu'il convient de souligner. Si la distribution méridienne en subsurface du nitrate, entre 3° S et 3° N, est à peu près symétrique par rapport à l'Équateur il n'en va pas de même pour le silicate. Parallèlement à celle de la salinité, avec laquelle la corrélation inverse a été reconnue antérieurement (COLIN *et al.*, 1971), la distribution du silicate marque l'affrontement en subsurface à l'Équateur d'une eau originaire du Nord dessalée et riche en silice et d'une eau originaire du sud salée et pauvre en silice.

Le nitrite est connu pour présenter une distribution verticale différente des autres sels nutritifs. La couche d'accumulation de nitrite entre 2° S et 6° S (fig. 8), encore appelée « poche à nitrite », avec des teneurs dépassant $2 \mu\text{mol NO}_2/\text{l}$ est caractéristique de la zone de convergence sud. Toutefois cette eau

riche en nitrite est reprise dans un mouvement ascendant d'alimentation de l'upwelling équatorial à la latitude du front divergent décrit précédemment à 2° S. Au voisinage de la convergence nord il existe également une couche d'accumulation qui est cependant moins nette (nous n'en apercevons vraisemblablement qu'une partie) et plus complexe (les deux noyaux supérieurs à $1 \mu\text{mol NO}_2/\text{l}$ sont sur des surfaces isanostériques différentes). Les fortes teneurs à 1° - 2° N appartiennent à l'eau salée qui constitue la bordure sud du front convergent de 3° N.

3.3. DISTRIBUTION DE LA PRODUCTION PRIMAIRE.

La répartition de la biomasse végétale illustrée par les distributions de chlorophylle *a* et de phaeophytine (fig. 9 et 10) suit la distribution des critères hydrologiques à un point tel que les limites inférieures (isolignes $0,1 \text{ mg/m}^3$) reflètent parfaitement le tracé des lignes isanostériques indicatrices des mouvements d'upwelling et de convergence. En surface il est confirmé une fois de plus que la seule zone riche en phytoplancton est celle de l'upwelling équatorial.

Le trait nouveau et important est la mise en évidence de façon aussi nette de la forte biomasse

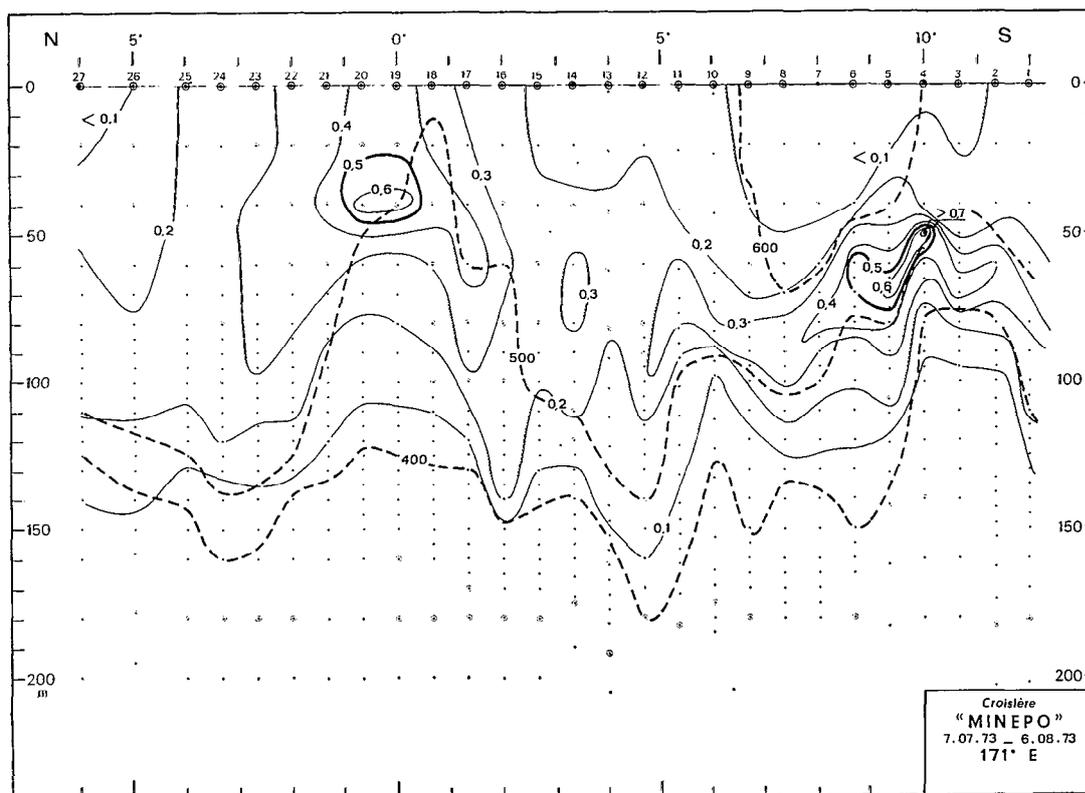


Fig. 9. — Distribution verticale de la chlorophylle *a* (mg/m^3) au cours du trajet aller (en tirets : lignes isanostériques en cl/t ; les points entourés d'un cercle représentent les mesures de chlorophylle *a*).

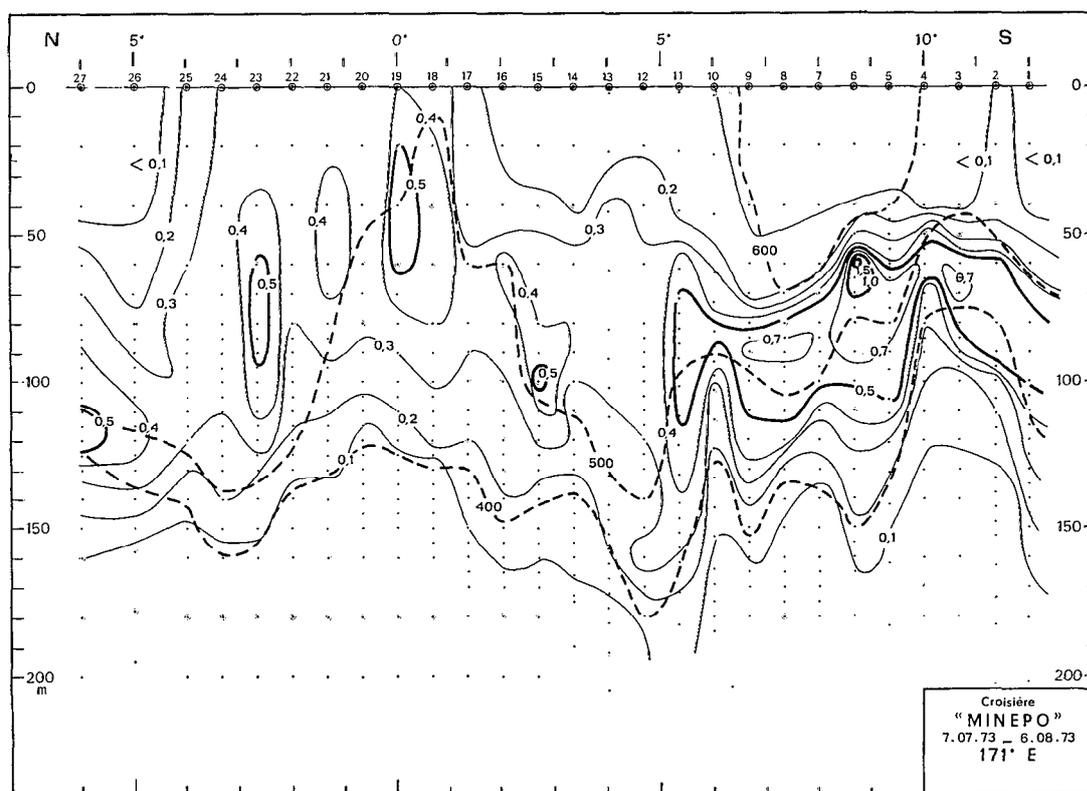


Fig. 10. — Distribution verticale de la phaeophytine (mg/m^3) au cours du trajet aller (en tirets : lignes isanostériques en cl/t ; les points entourés d'un cercle représentent les mesures de phaeophytine).

végétale subsuperficielle dans la région du dôme vers 10° S, déjà signalée par LE BOURHIS et WAUTHY (1969). Les teneurs en Chl. *a* sont aussi fortes qu'à l'Équateur et celles en phaeophytine dépassent largement celles relevées dans l'upwelling équatorial. Les pigments chlorophylliens s'accumulent au voisinage de 10° S dans un eau plus légère (550 cl/t) qu'à l'Équateur (500 cl/t). La couche de forte production associée au dôme est limitée verticalement par la présence d'une couche homogène et chaude en surface, contrairement à celle de l'Équateur; elle se développe donc largement dans le sens méridien. Son extension méridienne peut être également renforcée par le déplacement méridien du dôme, comme en témoigne l'existence d'un dôme secondaire à 6° S (fig. 5).

Il faut souligner qu'il existe des accumulations de phaeopigments en absence de Chl. *a*, en particulier à la latitude des convergences nord et sud, là où se trouvent des teneurs élevées en nitrite.

4. Interprétation des distributions méridiennes.

Les structures hydrologiques décrites précédemment s'expliquent aisément par les courants observés dans la région considérée. De 3° N à 6° S en surface, le courant Équatorial (C.E.) s'écoule vers l'ouest, bordé au nord par le Contre Courant Équatorial Nord (C.C.E.N.) et au sud par le Contre Courant Équatorial Sud (C.C.E.S.) (fig. 11). Aux limites nord et sud du C.E. se trouvent les fronts convergents hydrologiques définis précédemment. C'est dans ce flux ouest, où se développe un upwelling intense, que l'on relève les plus fortes teneurs en sels nutritifs (fig. 5) et en chlorophylle (fig. 9) : la distribution de cette dernière propriété à l'Équateur est à l'image du flux ouest.

En subsurface, le Sous Courant Équatorial (S.C.E.), ou Courant de CROMWELL, coulant à l'est le long de l'Équateur, induit une convergence des eaux nord et sud aux propriétés différentes (MONTGOMERY et STROUP, 1962 - TSCHUCHYA, 1968) qui est illustrée par le front de salinité (fig. 4) et de silicate (fig. 7). Cette convergence peut également rendre compte de la position différente du front halin en subsurface par rapport à celui en surface où l'eau salée remontée par l'upwelling diverge vers le nord et vers le sud.

À 10° S, sous l'action conjuguée du C.C.E.S coulant vers l'est, au nord, et du C.E.S (Courant Équatorial Sud) coulant vers l'ouest, au sud, se développe un dôme subsuperficiel dont le rôle important a été signalé lors de la discussion de la distribution des sels nutritifs et des pigments chlorophylliens.

Le C.C.E.S est constitué d'une eau fortement dessalée ($S < 34,4\text{‰}$) originaire de la région à forte pluviosité au nord des Iles Salomon (JARRIGE, 1968 — DONGUY, OUDOT et ROUGERIE, 1970), tandis que le C.E.S transporte une eau salée dérivée de l'Eau Subtropicale du Pacifique Sud (E.S.P.S). Bien que la présence du C.C.E.S en subsurface n'ait pas été mise en évidence par les mesures de courants, son influence se manifeste par la scission du maximum de salinité de l'E.S.P.S en deux noyaux ($S > 36,0\text{‰}$). La position en latitude du dôme liée à l'emplacement du C.C.E.S, lui-même très variable au cours du temps (JARRIGE, 1968), n'est pas fixe. La remontée des isolignes de température, de salinité et de nitrate à 6° S (station 10) est vraisemblablement la marque d'un ancien dôme (ou l'amorce d'un nouveau) correspondant à une position du C.C.E.S plus proche de l'Équateur. Il existe en outre vers 3° S un petit flux est (fig. 11) associé à une dessalure superficielle montrant la variabilité méridienne du C.C.E.S. Durant la croisière ÉPONITE (1970) le dôme se situait à 8° S.

Les teneurs maximales en nitrate (fig. 5) au sud de la convergence sud, révélées pour la première fois durant ÉPONITE (1970), furent un argument en faveur de l'hypothèse de minéralisation avancée après cette croisière. Les mêmes anomalies de distribution verticale se retrouvent au nord (stations 22 et 23) sous une forme atténuée (inversions), car la structure verticale des masses d'eau est telle, qu'au sud les maxima de nitrate sont au-dessus du maximum de salinité (minimum de nitrate) tandis qu'au nord ils sont au-dessus d'une masse d'eau d'origine plus profonde donc riche en substances nutritives. Les indices de minéralisation (maxima de sels nutritifs) au nord sont d'ailleurs confirmés par un minimum d'oxygène à 2° N (fig. 6).

La distribution de l'ammoniaque, dont la source majeure est liée au métabolisme de la matière vivante est difficile à interpréter. Les imprécisions inhérentes à l'analyse de ce sel ne nous permettent pas de présenter une distribution des teneurs d'ammoniaque sur l'ensemble de la coupe 12° S-4° N. Cependant, de nos résultats d'analyses, il ressort principalement que les plus fortes teneurs sont relevées à 10° S, au voisinage du dôme, parallèlement à celles de phaeophytine, soulignant ainsi l'importance du broutage de la biomasse végétale dans la région du dôme. La croisière ÉPONITE (1970) avait déjà révélé les plus fortes teneurs près du sommet du dôme. La distribution de la matière organique dissoute évaluée sous forme d'azote et de phosphore est un peu à l'image de celle des pigments chlorophylliens en ce sens que l'eau subsuperficielle ramenée vers la surface sous l'effet de l'upwelling et du dôme est plus pauvre que l'eau environnante.

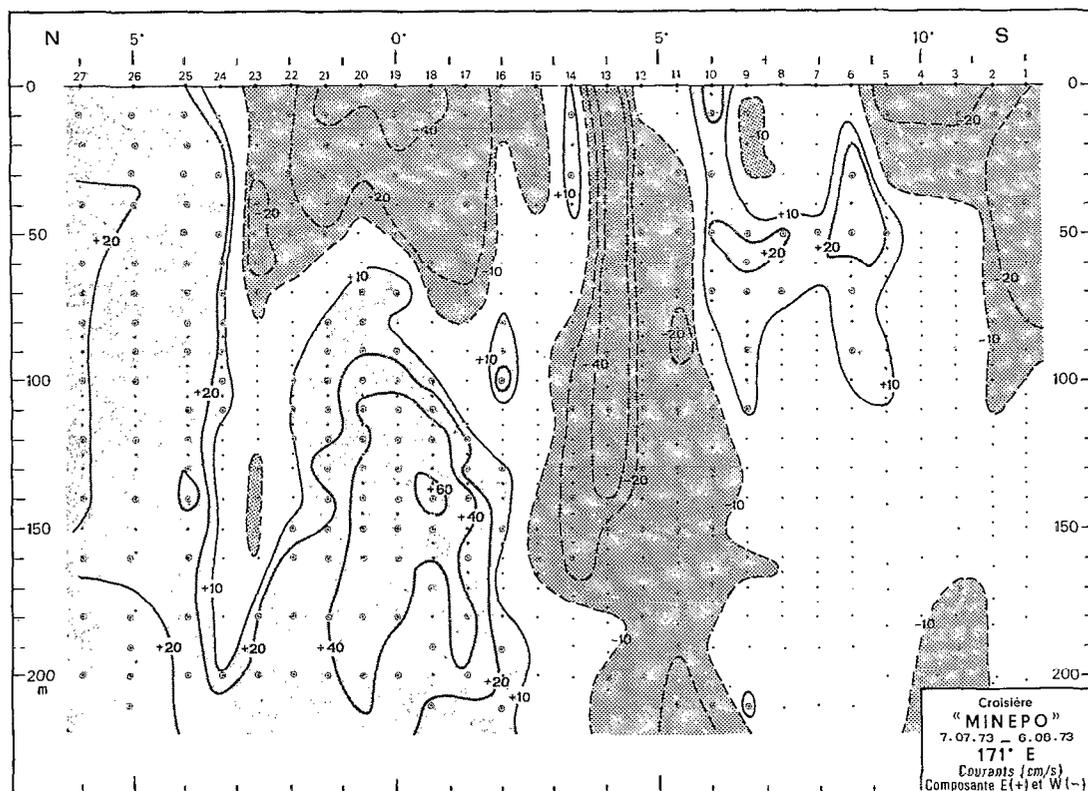


Fig. 11. — Distribution verticale des composantes zonales de courant au cours du trajet aller (les points entourés d'un cercle représentent les mesures de courant).

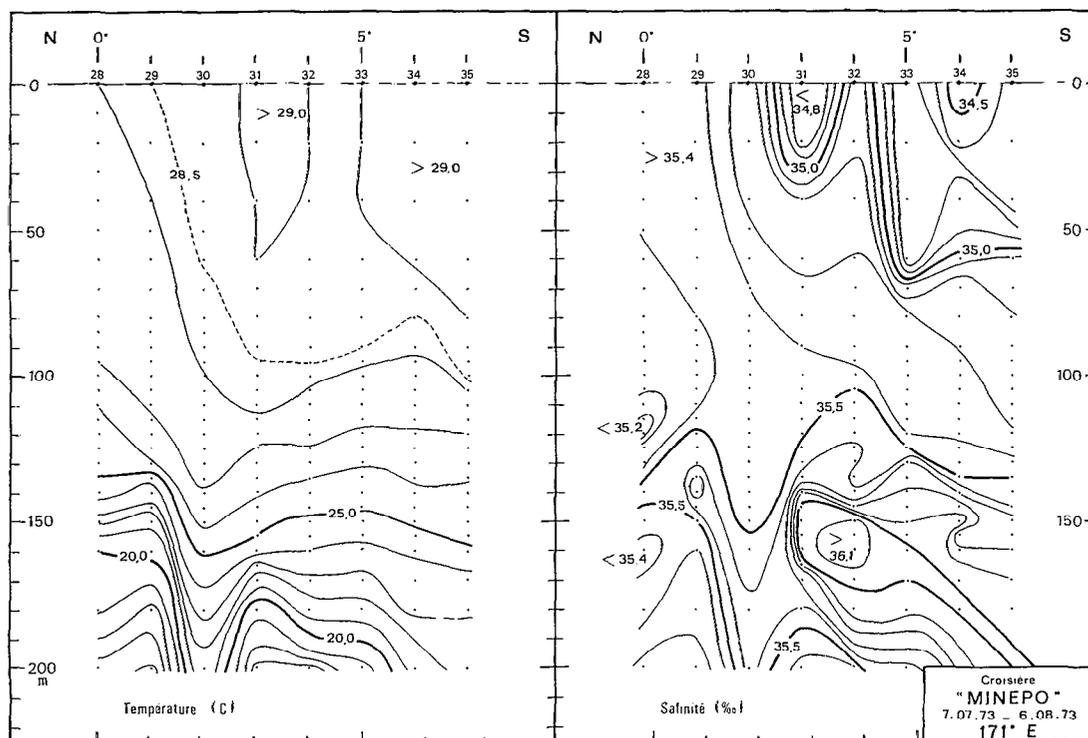


Fig. 12. — Distributions verticales de la température et de la salinité au cours du trajet retour.

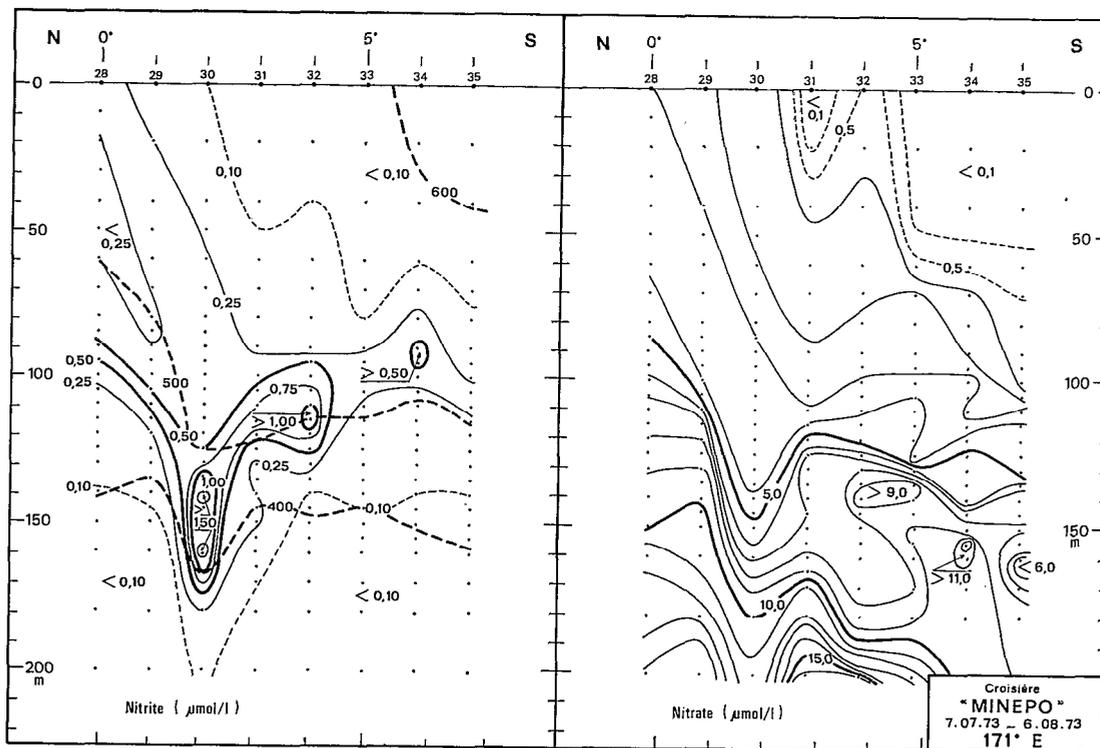


Fig. 13. — Distributions verticales du nitrite (en tirets : lignes isanostériques en cl/t) et du nitrate au cours du trajet retour.

5. Variations temporelles à court terme (8 à 15 jours).

Lors du trajet retour la circulation de surface n'est plus en accord parfait avec la situation météorologique (fig. 2) : entre 0° et 3° S, alors que les vents continuent à souffler du secteur nord-est, le courant porte à l'ouest-nord-ouest et non plus au sud-sud-ouest. La comparaison des distributions des variables physico-chimiques à l'aller et au retour (fig. 12) est en accord avec le déplacement des eaux de surface vers le nord qu'on peut attendre de la nouvelle circulation superficielle :

— la masse d'eau de surface homogène et chaude ($T > 29^{\circ} \text{C}$), épuisée en nitrate (fig. 2, d et 13), s'étale largement vers le nord jusqu'à 3° S (elle s'arrête à 5° S à la coupe aller). Le refroidissement maximum lié à l'upwelling n'apparaît plus au sud de l'Équateur.

— à l'Équateur les effets de l'eau salée du sud sont plus ressentis et la salinité dépasse 35,40 ‰ en surface. Le front de salinité sud ($S = 35,00 \text{ ‰}$) s'est déplacé d'au moins un degré vers le nord.

La salinité de la petite poche d'eau superficielle dessalée à 3° S a baissé d'environ 0,5 ‰. Plutôt que de dériver d'une intensification locale de la

pluviosité, cette dessalure est plus probablement le résultat d'un renforcement d'un flux est (observé par les mesures directes à l'aller mais non au retour) qui expliquerait aussi la présence d'une convergence à sa bordure nord, vers 2° S; en effet à la station 30, la salinité varie de moins de 0,1 ‰ de 70 à 150 m. La distribution des sels nutritifs (fig. 13) reflète le prolongement en subsurface de cette convergence vers 2° S et la disparition de celle observée vers 5° S à l'aller. Les noyaux isolés de nitrate observés à l'aller apparaissent liés à la position de la convergence subsuperficielle : au retour les plus septentrionaux sont au voisinage de 4° S, au lieu de 6° S à l'aller. Le déplacement méridien apparent des masses d'eau entrevu en surface est donc ressenti en subsurface également. Cependant, d'après la distribution méridienne de la salinité à la profondeur du maximum (fig. 12), il semble que le déplacement méridien en subsurface soit limité, car le front $S = 36,0 \text{ ‰}$ reste fixe au voisinage de 3° S. Il ne faut pas oublier qu'en zone équatoriale les mouvements zonaux étant beaucoup plus intenses que les mouvements méridiens le Sous Courant Équatorial s'oppose efficacement à l'avancée vers le nord du maximum de salinité de l'E.S.P.S.

La modification la plus frappante et la plus

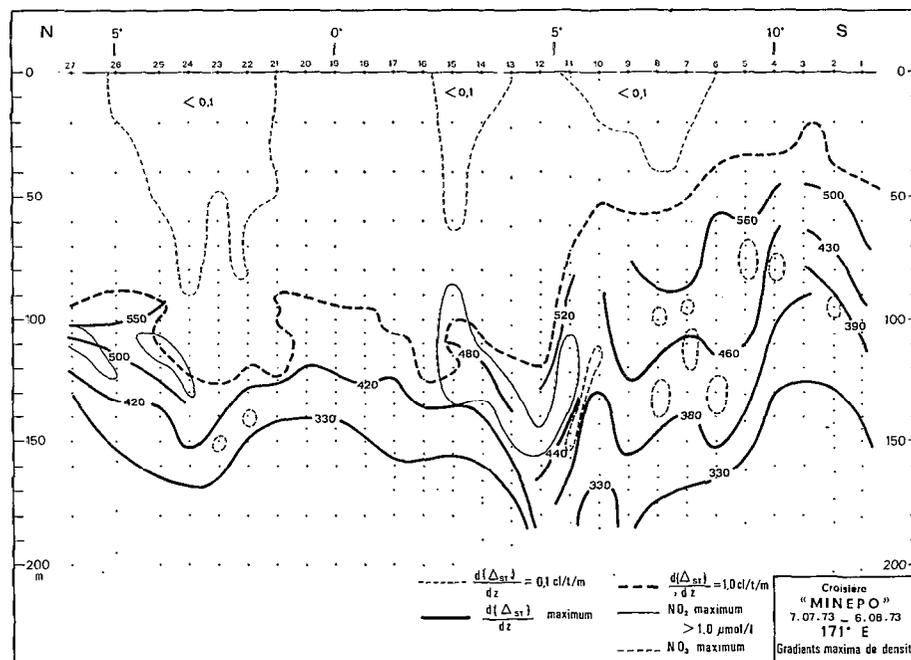


Fig. 14. — Distribution verticale du gradient de densité au cours du trajet aller. Les nombres affectant les lignes continues épaisses représentent l'anomalie thermostérique en cl/t du niveau de gradient maximum de densité.

intéressante est sans doute l'amenuisement de la « poche à nitrite » qui se réduit essentiellement à un noyau localisé au creux de la convergence (fig. 13). Le rétrécissement de la couche d'accumulation de nitrite dans un intervalle de temps assez court (une douzaine de jours) soulève le problème de sa continuité zonale à petite échelle (de l'ordre de quelques degrés) et par conséquent de sa cinétique de formation et de disparition. Une des causes possibles de sa disparition peut être recherchée dans l'alimentation de l'upwelling par l'eau riche en nitrite comme en témoigne le gradient vertical de nitrite analogue à celui de salinité.

6. Structures verticales et champ de densité.

La structure verticale de la pycnocline dans la région considérée est complexe, principalement de part et d'autre de la bande équatoriale, siège de l'upwelling. Toutefois, entre 5° N et 5° S, le gradient vertical de densité (fig. 14) est relativement constant et faible (inférieur à 1,0 cl/t/m) dans les 100 premiers mètres.

Sur l'ensemble de la coupe 12° S-6° N il est possible de dégager une certaine continuité de la valeur absolue de la densité aux maxima de gradients verticaux. La figure 14 fait par ailleurs clairement ressortir qu'il existe au voisinage de la surface

isanostrérique 330 cl/t un plancher continu de densité ($d(\Delta\sigma_t)/dz$) de l'ordre de 4 à 6 cl/t/m, créé au sud de

l'Équateur par le maximum de salinité et au nord par un gradient thermique engendré par l'eau de type nord dessalée mais froide. Dans la zone interfrontale 3° N-3° S, où la circulation verticale est la plus intense, les gradients les plus superficiels disparaissent et il ne reste que deux niveaux de gradient maximum s'opposant aux échanges verticaux; le gradient supérieur, de l'ordre de 6 à 8 cl/t/m, correspond à la surface isanostrérique 420 cl/t, sommet de la thermocline. Cependant c'est à la latitude des zones frontales que la couche homogène superficielle est la plus épaisse; le gradient vertical de densité est alors inférieur à 0,1 cl/t/m.

Dans une couche d'eau subsuperficielle, l'arrivée d'une masse d'eau qui a plongé à une zone frontale modifie la structure hydrologique de la région et notamment renforce les gradients verticaux de densité des couches supérieures et inférieures. La multiplication des maxima du gradient de densité, en dehors de la bande équatoriale, peut donc être considéré comme le reflet de plongées successives de masses d'eau aux critères hydrologiques différents acquis au moment du passage en surface, ou d'une suite de remontées d'eau sous l'effet du dôme plus ou moins actif, entre 5° et 10° S.

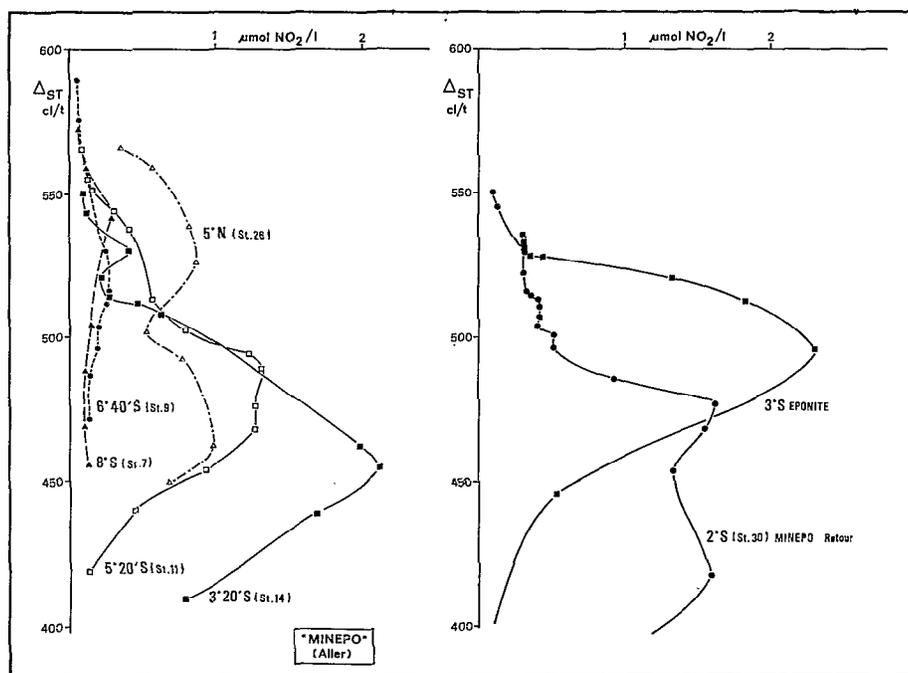


Fig. 15. — Profils verticaux de nitrite en fonction de la densité lors des croisières MINEPO (1973) et ÉPONITE (1970).

En plusieurs occasions (OUDOT, HISARD et VOITURIEZ, 1969 - OUDOT, RUAL et WAUTHY, 1972) on a montré que la distribution du nitrite est dictée par le champ de densité : la couche d'accumulation (teneur supérieure à $1,0 \mu\text{mol NO}_2/\text{l}$ est toujours prise entre deux maxima du gradient de densité. La figure 14 le confirme aussi bien au nord qu'au sud de l'Équateur, suggérant que la distribution du nitrite est plus sujette aux mouvements méridiens que verticaux. La distribution du nitrate est similaire dans la mesure où l'on rencontre des noyaux à teneurs maximales intercalés entre des barrières de densité (fig. 14).

L'étude de la distribution verticale du nitrite en fonction de la densité et de la position du maximum de nitrite dans le champ de densité va nous permettre de distinguer différentes époques de formation de la « poche à nitrite » (fig. 15). La densité à la couche d'accumulation sud observée durant MINEPO est nettement supérieure à celle rencontrée habituellement et en particulier au cours d'ÉPONITE. En effet lors de la campagne ÉPONITE (1970) la teneur maximale ($2,30 \mu\text{mol/l}$) à 3°S est relevée à 495 cl/t , tandis que la valeur maximale de nitrite de toute la croisière MINEPO ($2,12 \mu\text{mol/l}$) observée à la station 14 se trouve à environ 450 cl/t ; à la station 30 (retour) le maximum inférieur ($1,60 \mu\text{mol/l}$) approche même 420 cl/t . Mais lorsqu'on considère la bordure sud de cette couche d'accumulation

(stations 11-9-7) on constate que les teneurs maximales tout en décroissant intéressent des eaux plus légères. D'une manière plus générale nos observations antérieures le long du méridien 170°E ont montré que le nitrite s'accumule à des densités très variables au cours du temps.

La densité de la couche d'accumulation de nitrite découle de celle de la masse d'eau qui atteint la surface lors de l'établissement de l'upwelling et qui est le siège d'une intense production organique, progressivement dégradée au cours de la plongée à la convergence. À une longitude donnée, suivant la force de l'upwelling, des eaux de densité plus ou moins élevée atteignent la surface de la mer. D'autre part plus la masse d'eau renfermant le nitrite a atteint la surface loin vers l'est, là où l'upwelling plus intense est capable d'amener des eaux lourdes en surface, plus le nitrite sera associé à une densité élevée. Enfin, les particules organiques entraînées dans la plongée des eaux productives auront tendance à sédimenter et seront arrêtées à des profondeurs différentes suivant d'une part la structure verticale de densité de la région, d'autre part leur propre densité. Toutes ces raisons peuvent donc rendre compte des variations de densité et de profondeur de la couche d'accumulation de nitrite qui peuvent servir à évaluer l'âge relatif du nitrite : plus la densité de la couche d'accumulation est élevée, plus la couche de nitrite est ancienne car

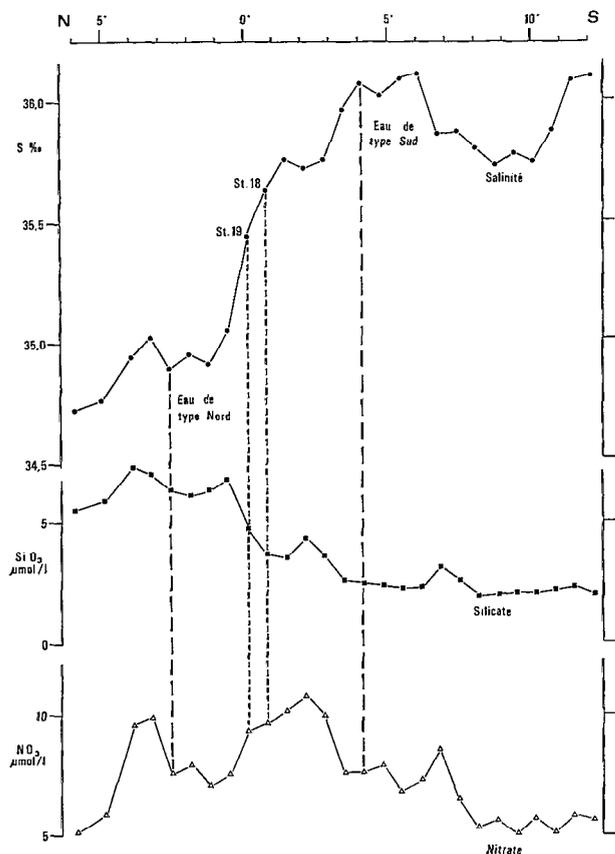


Fig. 16. — Distributions méridiennes de la salinité, du silicate et du nitrate sur la surface isanostérique 360 cl/t, au cours du trajet aller de la croisière MINEPO (1973).

formée plus à l'est; le nitrite le plus récent est sans doute celui de la couche qui s'étale au sud de la zone frontale à 6° S, le plus ancien étant celui qui participe à l'upwelling vers 2° S (comparaison entre les trajets aller et retour).

En ce qui concerne la couche d'accumulation au nord de l'Équateur on peut également dégager une structure double (fig. 15 : station 26) illustrant deux époques de formation différentes : le maximum supérieur appartenant au noyau le plus proche de la zone frontale est sans doute plus récent que le maximum inférieur.

7. Analyses isentropiques.

On admet en général que le déplacement des masses d'eau soustraites à l'influence des échanges océan-atmosphère est isentropique, d'où l'intérêt d'une étude de la distribution des variables hydrologiques sur des surfaces isopycnes ou isanostériques.

La distribution méridienne de la salinité sur la surface isanostérique 360 cl/t voisine du noyau de l'E.S.P.S. (fig. 16) montre clairement l'antagonisme des eaux fortement salées du sud de l'Équateur et faiblement salées du nord. Ces deux eaux-types entraînées dans un mouvement zonal se mélangent le long de l'Équateur dans le Courant de CROMWELL. La dessalure entre 7° et 10° S est l'empreinte du G.C.E.S qui partage en deux noyaux le maximum de salinité de l'E.S.P.S. Le petit maximum relatif, à la convergence nord (3° N), ne peut venir que du sud par l'intermédiaire de l'upwelling : ce passage du sel du sud au nord est par ailleurs suggéré par la forme des isohalines superficielles (fig. 4).

La distribution du silicate sur la même surface isanostérique est présentée pour mettre en parallèle sa dissymétrie par rapport à l'Équateur avec celle de la salinité. La teneur en silicate du S.C.E. (stations 18 et 19), comme la salinité, semble être le résultat du mélange de l'Eau de type Nord et de l'Eau de type Sud. Une évaluation du mélange quantitatif des deux eaux types donnant la salinité observée dans le Courant de CROMWELL montre, tableau I,

TABLEAU I

ΔST cl/t	Eau de type sud			Eau de type nord			Station 18 (0°40 S)				Station 19 (0°)					
	S ‰	SiO ₃ μmol/l	NO ₃ μmol/l	S ‰	SiO ₃ μmol/l	NO ₃ μmol/l	S ‰	SiO ₃ (μmol/l)		NO ₃ (μmol/l)		S ‰	SiO ₃ (μmol/l)		NO ₃ (μmol/l)	
								calculé	ob-servé	calculé	ob-servé		calculé	ob-servé	calculé	ob-servé
500	35.55	2.4	3.2	35.03	3.0	5.0	35.29	2.7	2.7	4.1	4.0	35.29	2.7	2.9	4.1	4.5
480	35.70	2.5	3.5	35.02	3.5	5.9	35.35	3.0	3.0	4.8	5.9	35.30	3.1	3.3	4.9	6.2
460	35.82	2.5	4.1	35.02	4.0	6.6	35.30	3.5	3.4	5.7	7.6	35.24	3.6	3.5	5.9	7.2
440	35.90	2.5	4.9	35.02	4.5	7.1	35.36	3.7	3.8	6.2	8.5	35.24	4.0	4.0	6.6	8.5
420	35.95	2.5	6.1	35.02	5.0	7.5	35.31	3.7	3.6	6.8	9.4	35.25	4.4	4.6	7.2	9.1
400	36.00	2.6	6.8	34.92	5.0	7.5	35.62	3.4	3.4	7.0	9.5	35.24	4.3	5.1	7.3	9.1
380	36.04	2.6	7.2	34.92	5.7	7.4	35.61	3.8	3.8	7.3	9.5	35.33	4.6	5.0	7.3	9.1
360	36.07	2.6	7.6	34.86	6.4	7.6	35.63	4.0	3.7	7.6	9.7	35.44	4.6	4.8	7.6	9.4
340	36.12	2.2	7.2	34.85	7.0	8.4	35.61	4.1	4.0	7.7	9.9	35.47	4.7	4.8	7.8	9.7
320	36.08	2.4	7.2	34.82	7.8	9.0	35.58	4.6	4.2	7.9	10.1	35.51	4.8	4.7	8.0	10.1

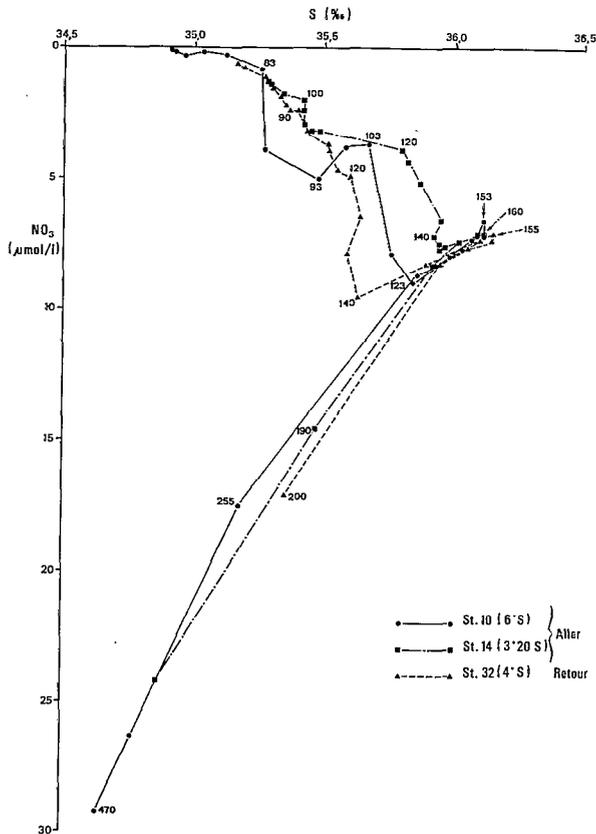


Fig. 17. — Diagramme salinité-nitrate à trois stations de la croisière MINEPO (1973).

qu'entre les anomalies thermostériques 500 et 320 cl/t, salinité et silicate se comportent de façon similaire comme des propriétés conservatrices, alors qu'il en va tout autrement du nitrate.

Cette différence entre deux sels nutritifs tels que silicate et nitrate apparaît déjà sur les profils verticaux : le gradient vertical de silicate est beaucoup plus faible que celui de nitrate dans les 150 premiers mètres, notamment dans la région sud-équatoriale (fig. 5 et 7). Cette différenciation est le résultat d'une redissolution moins rapide de la silice par rapport à la reminéralisation de l'azote organique, dans la couche superficielle des océans. On peut donc admettre dans notre cas que le silicate, beaucoup moins sujet que les autres sels nutritifs aux transformations biochimiques puisse être considéré comme une propriété conservatrice.

La distribution méridienne du nitrate sur 360 cl/t (fig. 16) fait ressortir quant à elle la richesse du Courant de CROMWELL, la pauvreté relative de l'E.S.P.S. et deux maxima au voisinage des zones frontales sud et nord. Le maximum vers 6° S a déjà été discuté, le maximum vers 4° N coïncide, avec

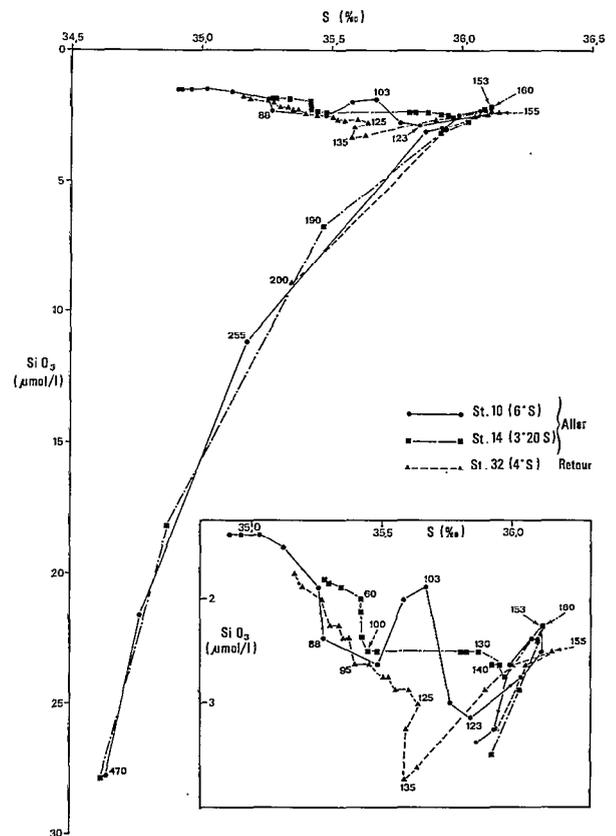


Fig. 18. — Diagramme salinité-silicate à trois stations de la croisière MINEPO (1973).

celui de salinité qui vient du sud de l'Équateur par l'intermédiaire de l'upwelling.

8. Diagrammes Salinité-Nitrate, Salinité-Silicate et Salinité-Température.

Les maxima de sels nutritifs situés au-dessus du maximum de salinité peuvent avoir des causes physiques découlant de la structure hydrologique et des causes chimiques impliquant des transformations liées au cycle biochimique de la production océanique.

Trois stations caractéristiques de l'E.S.P.S. pour lesquelles le diagramme S-NO₃ fait très nettement ressortir les maxima de nitrate (fig. 17) sont retenues pour illustrer cela. Dans le plan S-NO₃ les caractéristiques des noyaux de nitrate sont très proches de celles de l'eau sous-jacente au maximum de salinité, suggérant ainsi qu'ils soient le résultat d'un mélange de l'eau superficielle avec de l'eau subsuperficielle plus riche en sels nutritifs. Le diagramme S-SiO₂ (fig. 18) peut conduire à la même

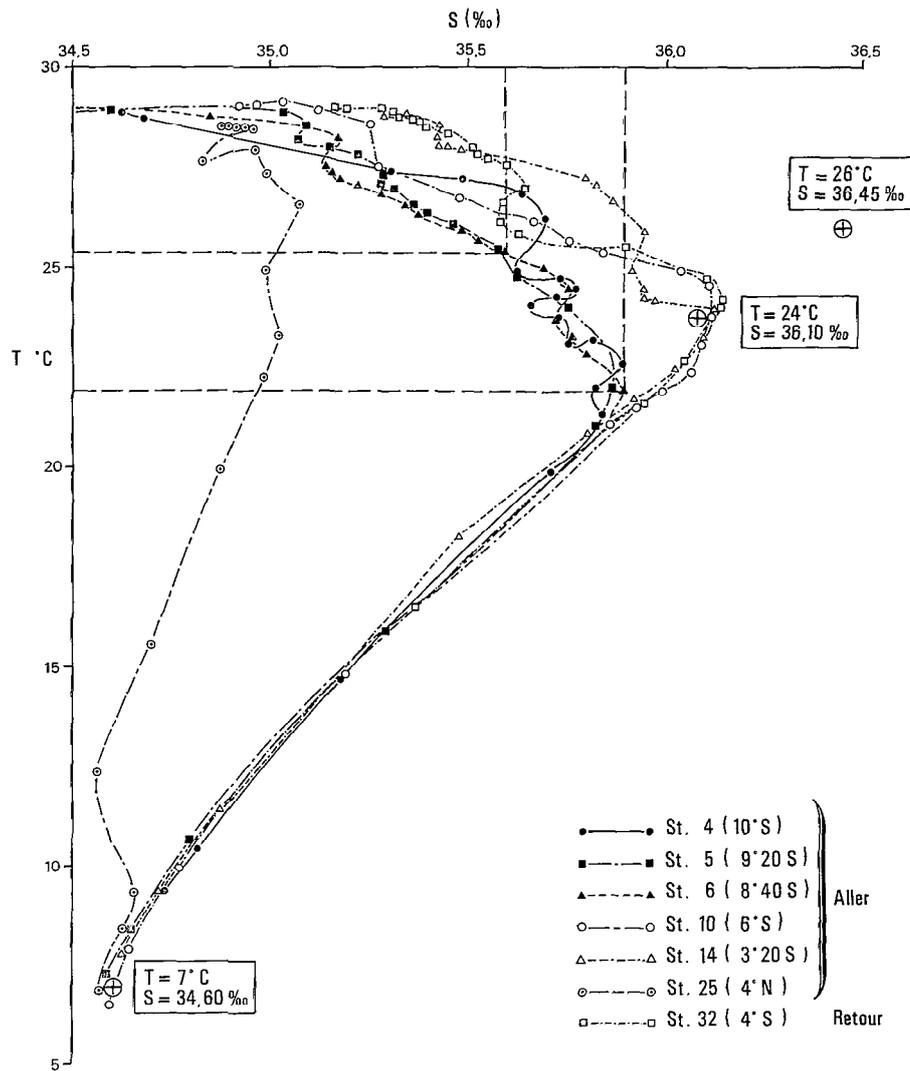


Fig. 19. — Diagramme température-salinité à 7 stations de la croisière MINEPO (1973).

hypothèse d'ordre hydrologique pour expliquer la présence de noyaux à teneurs maximales en silicate.

Mais il existe des maxima de gradient de densité (fig. 14) qui limitent les mouvements verticaux et isolent les fortes teneurs en sels nutritifs (noyaux de nitrate) des couches plus profondes et plus riches. Cependant, il peut y avoir rupture des barrières de densité, en particulier au voisinage du dôme, permettant ainsi un mélange entre les couches superficielles et subsuperficielles.

Seul un diagramme T.S permet de rendre compte réellement des possibilités de mélange physique des masses d'eau. Sur la figure 19 sont rassemblées les stations caractéristiques de l'E.S.P.S (10-14-32)

et du C.C.E.S (4-5-6). Le point représentatif de l'E.S.P.S à 170° E ($T = 24\text{ }^{\circ}\text{C}$, $S = 36,10\text{ }_{\text{‰}}$) est sur la ligne de mélange entre l'E.S.P.S à sa source dans le Pacifique Central ($T = 26\text{ }^{\circ}\text{C}$, $S = 36,45\text{ }_{\text{‰}}$) et l'Eau Antarctique Intermédiaire (E.A.I) dessalée et riche en sels nutritifs ($T = 7\text{ }^{\circ}\text{C}$, $S = 34,60\text{ }_{\text{‰}}$). Dans le C.C.E.S les points représentatifs du maximum de salinité, également sur la droite de mélange précédente, indiquent une proportion plus grande d'eau intermédiaire; les diagrammes des stations 4-5-6 indiquent statistiquement par ailleurs un mélange d'une eau subsuperficielle ($T = 25,05\text{ }^{\circ}\text{C}$, $S = 35,60\text{ }_{\text{‰}}$) avec l'E.S.P.S. enrichie par rapport aux eaux adjacentes ($T = 22\text{ }^{\circ}\text{C}$, $S = 35,90\text{ }_{\text{‰}}$); l'eau ré-

sultat de ce mélange et située au dessus du maximum de salinité est par conséquent enrichie en sels nutritifs par rapport aux eaux adjacentes. Lorsqu'un déplacement méridien du C.C.E.S entraîne le remplacement de cette eau enrichie par une eau adjacente, avant que le mélange latéral soit achevé, il apparaît des noyaux isolés riches correspondants à ceux observés. Ce schéma est confirmé par le fait que le silicate en subsurface étant considéré comme une propriété conservative, les noyaux de silicate (fig. 7) associés à ceux de nitrate ne peuvent être que le résultat d'un mélange avec l'E.S.P.S. enrichie.

9. Modèle de distribution de nitrate.

Dans la couche des 200 premiers mètres de la zone 12° S-6° N, les masses d'eau qui rendent compte des distributions des diverses propriétés observées au sud de 2° S et au-dessus du maximum de salinité sont respectivement (fig. 19) :

- l'eau chaude et dessalée superficielle,
- l'eau du maximum de salinité dérivée de l'E.S.P.S, en subsurface,
- l'eau équatoriale née de l'upwelling, qui plonge au niveau de la zone frontale sud et s'écoule vers le sud entre les deux eaux précédentes.

Au nord de l'Équateur, la structure est semblable, à ceci près que l'eau du maximum de salinité est remplacée par l'eau de type nord dessalée et riche en sels nutritifs (fig. 19). Ce mélange physique rend-il bien compte du schéma précédent.

L'utilisation des diagrammes T.S pour le calcul des proportions de mélange de masses d'eau dont les propriétés sont susceptibles de modifications lors d'un passage en surface est sujette à caution. La forme bombée de la partie supérieure des diagrammes T.S pour les stations les plus proches de l'Équateur (fig. 19) peut être considérée comme l'effet d'un réchauffement consécutif au passage en surface. Cet effet thermique expliquerait qu'un certain nombre de points T.S soient en dehors du triangle de mélange. En conséquence, il est jugé préférable de considérer un triangle de mélange S-SiO₂, le silicate étant assimilé, pour les raisons exposées antérieurement, à une propriété conservative dans la tranche d'eau considérée; il permet de corriger la contribution de l'E.S.P.S enrichie au mélange des eaux superficielles et subsuperficielles. Les caractéristiques retenues pour les « eaux primaires », sommets du triangle de mélange, sont consignées dans le tableau II.

TABLEAU II

	Eau dessalée de surface (nord et sud)	Eau équatoriale de surface (nord et sud)	Eau du maximum de salinité (sud)	Eau du minimum de salinité (nord)
S‰.....	34.35	35.30	36.12	34.53
SiO ₂ μmol/l.....	1.2	2.8	2.0	20.0
NO ₃ μmol/l.....	0,0	4.2	5.9	22.0

Connaissant la contribution de chaque « eau primaire » (sous forme de pourcentage) à la formation de la masse d'eau considérée on peut calculer la teneur en nitrate de cette dernière.

Les résultats sont consignés sous forme d'une coupe de distribution verticale des écarts entre les valeurs calculées et les valeurs observées (fig. 20). Ce mode de représentation fait clairement ressortir des plages d'écarts négatifs qu'on peut supposer être représentatifs d'une certaine reminéralisation (la teneur en nitrate observée est supérieure à celle déduite d'un mélange physique). Les écarts négatifs sont situés en subsurface, dans les zones de convergence nord et sud au voisinage des fortes teneurs en nitrite et au niveau des noyaux à teneurs fortes en

nitrate et faibles en oxygène. Les écarts positifs (la teneur en nitrate observée est inférieure à celle calculée) sont répartis dans la couche superficielle, à la latitude des zones frontales et au sommet du dôme : c'est-à-dire dans des eaux où le nitrate a été consommé et non renouvelé. Ainsi donc l'enrichissement des couches subsuperficielles par mélange avec l'E.S.P.S enrichie ne suffit pas pour rendre compte des fortes valeurs de nitrate au-dessus du maximum de salinité.

C'est sur la base de résultats semblables mais déduits d'un modèle T.S., qu'après ÉPONITE (OUDOT, RUAL et WAUTHY, 1972) il fût admis que les noyaux de sels nutritifs au sud de la « poche à nitrite » étaient le résultat d'une oxydation biochi-

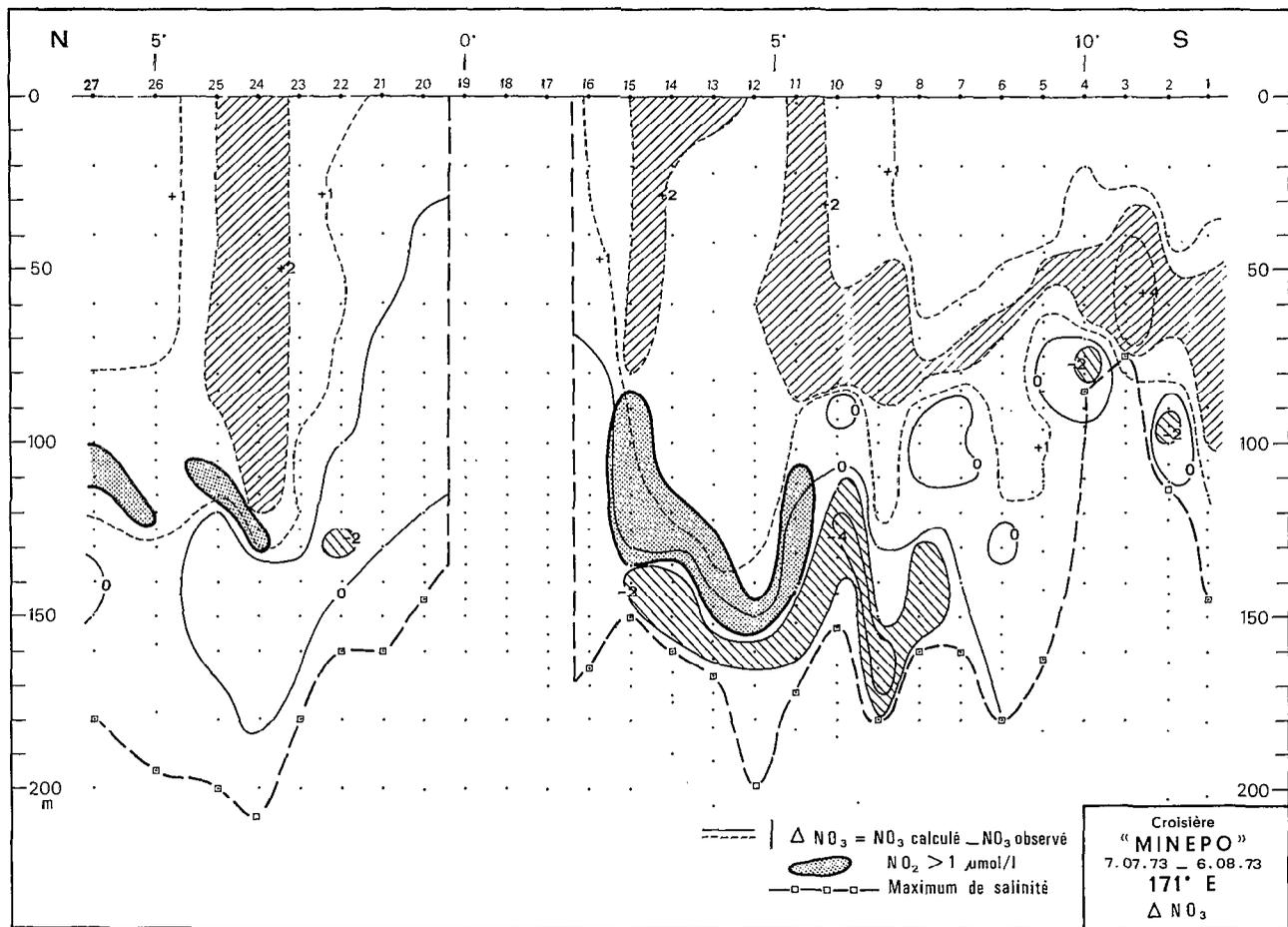


Fig. 20. — Distribution verticale des écarts entre les valeurs calculées et les valeurs observées de nitrate au cours du trajet aller (les aires en pointillés représentent les couches d'accumulation de nitrite).

mique de la matière organique. Nous devons préciser après MINEPO que les noyaux de nitrate ne sont pas uniquement le reflet d'une minéralisation de la matière organique azotée mais également le résultat de processus physiques induits par la présence d'un contre-courant. De plus MINEPO révèle qu'au niveau de la convergence nord où les conditions hydrologiques sont bien différentes de celles décrites au sud (absence du maximum de salinité — empreinte plus nette du C.C.E.N que du C.C.E.S) les mêmes excès de sels nutritifs sont présents à proximité de la couche d'accumulation de nitrite. Nous avons ainsi la confirmation que les traits de structure qui illustrent les stades successifs du processus de la minéralisation de la matière organique sont directement reliés à la plongée des eaux équatoriales très productives de part et d'autre de l'upwelling.

10. Discussion.

Les résultats de la croisière ÉPONITE (1970) nous

avaient conduits à avancer une hypothèse sur le rôle de la circulation méridienne dans les distributions de sels nutritifs au sud de l'Équateur.

Le modèle théorique de circulation méridienne de CROMWELL indique, lorsque des alizés de nord-est soufflent sur la région équatoriale, une divergence des eaux de surface et un upwelling au nord de l'Équateur, une plongée des eaux au sud au niveau de la zone de convergence. Dans ces conditions, qui sont celles rencontrées durant la croisière ÉPONITE (1970), la matière organique produite lors de l'établissement de l'upwelling se trouve entraînée dans un mouvement vers le sud tout en étant soumise au processus de dégradation et de minéralisation. L'azote organique donne naissance en premier lieu à l'ammoniaque qui est rapidement consommée par le phytoplancton. Une partie cependant est oxydée en nitrite et donne naissance à une couche d'accumulation. Le nitrite est oxydé à son tour et disparaît progressivement au profit

du nitrate. Mais la situation météorologique à l'Équateur est sujette à des modifications plus ou moins fréquentes et il était possible d'envisager ce qui pourrait se produire, le vent de sud-est succédant au vent de nord-est. La divergence déplacée alors au sud de l'Équateur ferait remonter vers la surface les sels nutritifs, en particulier le nitrite, accumulés antérieurement au sud. La production organique née de cette phase d'upwelling serait entraînée vers le nord dans le mouvement de plongée des eaux au niveau de la zone frontale nord et donnerait naissance à des distributions particulières de sels nutritifs au nord de l'Équateur.

Bien que la croisière MINEPO se soit déroulée à la même saison que la croisière ÉPONITE (respectivement en juillet 1973 et août-septembre 1970) la structure hydrologique méridienne en zone équatoriale (upwelling) était inversée par rapport à l'Équateur et en évolution rapide comme en fait foi la comparaison des distributions des paramètres à l'aller et au retour de la campagne. Grâce à cette situation hydrologique nouvelle la validité de notre hypothèse a pu être testée complètement. Selon notre schéma de circulation la divergence hydrologique ou upwelling au sud de l'Équateur, pendant MINEPO, « puisait » le nitrite accumulé dans la « poche » sud comme en témoigne la cheminée où la concentration est supérieure à $0,5 \mu\text{mol NO}_2/\text{l}$ à 2°S (fig. 8). Dix jours plus tard lors du trajet retour la « poche » était considérablement rétrécie et il est probable que nous observâmes alors la fin de la couche d'accumulation qui a alimenté l'upwelling sud équatorial. Les maxima de sels nutritifs (nitrate) résultat de la minéralisation de la production organique équatoriale se rencontrent à des latitudes très variables depuis 10°S jusqu'à 3°S , endroit où ils peuvent, comme le nitrite, être appelés à jouer un rôle dans l'effet fertilisant de l'upwelling.

Simultanément l'eau équatoriale de surface plonge au nord de l'Équateur en créant une zone frontale très nette à 3°N . L'indice d'une « poche » nord se profile sous la couche homogène superficielle nord-équatoriale, et bien que nos observations présentes et passées ne nous permettent pas de cerner exactement l'importance de cette couche d'accumulation de nitrite au nord de l'Équateur, cette dernière pourrait être moins accentuée que la couche sud. Malgré l'absence au nord de maximum de salinité pour renforcer la stabilité et assurer une aussi spectaculaire accumulation de nitrite, le plancher de densité est présent comme au sud (fig. 14). L'association de la poche nord à un flux est permanent (C.C.E.N) pourrait plutôt être la condition différente qui s'opposerait au plein épanouissement de la « poche à nitrite » nord.

La symétrie du modèle de circulation méridienne

par rapport à l'Équateur suivant le régime des vents est vérifiée de plus par les inversions dans les profils verticaux de sels nutritifs (nitrate-phosphate) et d'oxygène relevées aussi bien à proximité de la convergence nord que de la convergence sud. L'ensemble de nos croisières le long du méridien 170°E nous avait induits à penser que le balancement des vents alizés dans le Pacifique Équatorial Occidental pourrait avoir un rythme saisonnier : alizés de nord-est en hiver (croisière CYCLONE 2 en février 1967) et alizés de sud-est en été (croisière CYCLONE 6 en août 1967). Il n'en est rien : ce balancement, irrégulier, peut se produire beaucoup plus fréquemment et accélérer ainsi le cycle d'utilisation des sels nutritifs en zone équatoriale.

Le dôme à 10°S , dont l'activité est illustrée par les fortes concentrations de pigments chlorophylliens relevées entre 10°S et 5°S peut jouer un rôle non négligeable dans la production organique accumulée au niveau de la convergence sud. Contrairement à ce qui est observé dans l'upwelling, la biomasse végétale associée au dôme est cantonnée en subsurface mais elle n'en est pas moins importante et réelle bien que la présence du dôme soit très variable dans le temps et dans l'espace. La présence de concentrations élevées de nitrate reminéralisé (écarts négatifs) au voisinage du sommet du dôme (fig. 20) laisse supposer que ce dernier peut favoriser l'utilisation des produits de dégradation de la production organique équatoriale en les ramenant vers la surface; lors de son affaissement en revanche il peut renforcer la poche à nitrite par apport de matière organique. La production organique dans le dôme sud serait supportée d'une part par les sels nutritifs issus de la production organique équatoriale (production de régénération), d'autre part par des sels nutritifs plus profonds issus d'un mélange avec l'eau sous-jacente au maximum de salinité (production nouvelle) (DUGDALE et GOERING, 1967). D'après nos résultats (fig. 20) la régénération contribuerait au maximum pour 30 à 40 % à la distribution du nitrate dans la couche de reminéralisation, soit environ pour la moitié du reste (60 à 70 %) qui représente l'apport par mélange avec l'E.S.P.S. enrichie.

La distribution verticale de la matière organique dissoute dans le Pacifique Équatorial Occidental s'accorde avec la théorie de MENZEL selon laquelle les substances organiques sont rapidement dégradées et minéralisées dans la couche supérieure des océans. En même temps que les sels nutritifs la matière organique libère d'autres principes chimiques, tels que les oligoéléments qui sont indispensables au développement de la vie marine. Selon la théorie de MENZEL, ces derniers seraient contenus dans la couche de surface (200 premiers mètres) et beaucoup moins abondants dans l'eau subsuperficielle

sous-jacente pourtant riche en sels nutritifs, ramenée vers la surface sous l'action de l'upwelling et dans une certaine mesure du dôme. Cela pourrait expliquer la répartition de la production primaire abondamment étalée sur les versants de l'upwelling ou du dôme plutôt que dans l'eau subsuperficielle ramenée vers la surface.

11. Conclusions.

La croisière MINEPO nous donne l'occasion de vérifier le bien fondé de l'influence de la circulation méridienne sur les distributions particulières de sels nutritifs de part et d'autre de l'Équateur. Une divergence hydrologique au sud de l'Équateur associée à un front convergent au nord rendent compte de l'épuisement de la couche d'accumulation sud de nitrite qui alimente l'upwelling. Les traits particuliers des distributions de sels nutritifs mises en évidence au sud de l'Équateur après la croisière ÉPONITE sont relevés également au nord. Le balancement de la circulation méridienne principale dans la couche de surface, en zone équatoriale, portant tantôt vers le nord tantôt vers le sud, pourrait être beaucoup plus aléatoire et fréquent dans le temps qu'on ne l'avait envisagé primitivement. La modification de la structure hydrologique au cours de la campagne nous permet d'évaluer le déplacement méridien apparent des grands traits de structure à environ deux degrés en une douzaine

de jours. L'examen de la distribution du nitrite dans le champ de densité a permis de distinguer les différents niveaux d'accumulation de la couche à nitrite.

A la limite entre le G.C.E.S et le C.E.S. il existe un dôme dont l'activité et l'impact sur la production primaire en zone équatoriale ont été sous-estimés jusqu'à présent. Le rôle de ce dôme s'accorde bien avec le modèle théorique de circulation méridienne que nous avons proposé antérieurement. Suivant l'importance du G.C.E.S les sels nutritifs, produit de la dégradation de la matière organique synthétisée après apparition de l'upwelling équatorial et accumulée le long de la convergence sud d'une part et résultats d'un mélange avec les couches subsuperficielles d'autre part, peuvent supporter la croissance du phytoplancton dans le dôme sud. Cette production organique peut à son tour renforcer la poche à nitrite et le stock de sels nutritifs liés à la convergence.

Le modèle théorique de circulation méridienne proposé par CROMWELL, qu'illustrent nos résultats dans le Pacifique Occidental avec ce qu'il implique dans la redistribution de la production organique équatoriale, s'inscrit dans le cadre plus général de la théorie de MENZEL de recyclage de la matière organique dans la couche supérieure des océans. La répartition de la production primaire et de la matière organique dissoute dans la région prospectée est en faveur d'une telle théorie.

BIBLIOGRAPHIE

- ARMSTRONG (F. A. J.) et BOALCH (G. T.), 1961. — The ultraviolet absorption of sea water. *J. Mar. Biol. Ass. U. K.*, vol. 41 : 591-597.
- ARMSTRONG (F. A. J.) et TIBBITTS (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.
- BENSCHNEIDER (K.) et ROBINSON (R. J.), 1952. — A new spectrophotometric method for the determination of nitrite in sea water. *J. Mar. Res.*, vol. 11, n° 1 : 87-96.
- BRANDHORST (W.), 1959. — Nitrification and denitrification in the eastern tropical north Pacific. *J. Cons. International. Explor. Mer*, vol. 25 : 3-20.
- BREWER (P. G.) et 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.
- CARLUCCI (A. F.) et McNALLY (P. M.), 1969. — Nitrification by marine bacteria in low concentrations of substrates and oxygen. *Limnol. Oceanogr.*, vol. 14 : 736-739.
- COLIN (C.), HENIN (C.), HISARD (Ph.) et OUDOT (C.), 1971. — Le Courant de Cromwell dans le Pacifique Central en février 1970. *Cah. O.R.S.T.O.M., sér. Océanogr.*, vol. 9, n° 2 : 167-186.
- CROMWELL (T.), 1953. — Circulation in a meridional plane in the central equatorial Pacific. *J. Mar. Res.*, vol. 12, n° 2 : 196-213.
- DONGUY (J. R.), OUDOT (C.) et ROUGERIE (F.), 1970. — Circulation superficielle et subsuperficielle en mer du Corail et à 170° E. *Cah. O.R.S.T.O.M., sér. Océanogr.*, vol. 8, n° 1 : 3-20.
- DUGDALE (R. C.) et GOERING (J. J.), 1967. — Uptake of new and regenerated forms of nitrogen in primary productivity. *Limnol. Oceanogr.*, vol. 12, n° 2 : 169-206.

- GRIFFITHS (R. C.), 1965. — A study of oceanic fronts off Cape San Lucas, Lower California. U. S. Fish and Wildlife Serv. Sc. Rep. n° 499, 54 p.
- HATTORI (A.) et WADA (E.), 1971. — Nitrite distribution and its regulating processes in the equatorial Pacific Ocean. *Deep Sea Res.*, vol. 18, n° 6 : 557-568.
- HISARD (Ph.) et PITON (B.), 1969. — La distribution du nitrite dans le système des courants équatoriaux de l'Océan Pacifique à 170° E. *J. Cons. Inter-nation. Explor. Mer.*, vol. 32, n° 3 : 303-317.
- JARRIGE (F.), 1968. — On the eastward flow of water in the western Pacific south of the Equator. *J. Mar. Res.*, vol. 26, n° 3 : 286-289.
- KOROLEFF (F.), 1969. — Direct determination of ammonia in natural waters as indophenol blue. *ICESCM 1969/C* : 9, 4 pp. (mimeo).
- LE BOURHIS (J.) et WAUTHY (B.), 1969. — Quelques aspects de la distribution de la production primaire le long du méridien 170° E entre 20° S et 5° N. *Cah. O.R.S.T.O.M., sér. Océanogr.*, vol. 6, n° 4 : 83-93.
- MAGNIER (Y.), ROTSCHI (H.), RUAL (P.) et COLIN (C.), 1973. — Equatorial circulation in the western Pacific. *Prog. in Oceanography*, vol. 6, B. Warren ed., Pergamon Press.
- MENZEL (D. W.) et RYTHER (J. H.), 1970. — Distribution and cycling of organic matter in the Ocean. *Univ. Alaska Symposium of organic matter in natural waters*, 1968, 625 p.
- MERLE (J.), ROTSCHI (H.) et VOITURIEZ (B.), 1969. — Zonal circulation in the tropical western south Pacific in « *Perspectives in Fisheries Oceanography* » Jap. Soc. Fish. Oceanogr. : 91-98.
- MIYAZAKI (T.), WADA (E.) et HATTORI (A.), 1973. — Capacities of shallow waters of Sagami Bay for oxydation and reduction of inorganic nitrogen. *Deep Sea Res.*, vol. 20, n° 6 : 571-577.
- MURPHY (J.) et RILEY (J. R.), 1962. — A modified simple solution method for the determination of phosphate in natural waters. *Anal. Chim. Acta*, vol. 27 : 31-36.
- MONTGOMERY (R. B.) et STROUP (E. D.), 1962. — Equatorial waters and currents at 150° West in July-August 1952. *Johns Hopkins Oceanogr. Stud. n° 1*, The Johns Hopkins Press, Baltimore, 68 p.
- OUDOT (C.), HISARD (P.) et VOITURIEZ (B.), 1969. — Nitrite et circulation méridienne à l'Équateur dans l'Océan Pacifique Occidental. *Cah. O.R.S.T.O.M., sér. Océanogr.*, vol. 7, n° 4 : 67-82.
- OUDOT (C.), RUAL (P.) et WAUTHY (B.), 1972. — Mineralisation south of the Equator in relation to equatorial fertility. *International Symposium on Oceanography of the South Pacific 1972*, Wellington, New Zealand 524 p.
- PAGES (J.), 1972. — *Rap. Sci. Croisière EPONITE, N° 48* — rap. multigraphié Centre O.R.S.T.O.M., Nouméa, 103 p.
- RILEY (J. P.) et SKIRROW (G.), 1965. — *Chem. Oceanogr.* — vol. 1, Academic Press, London and New York, 712 p.
- STRICKLAND (J. D. H.) et PARSONS (T. R.), 1968. — A practical handbook of sea water analysis. *Fish. Res. Board. Canada, Bull.* 167, 311 p.
- TSUCHIYA (M.), 1968. — Upper waters of the intertropical Pacific Ocean. *Johns Hopkins Oceanogr. Stud. n° 3*, The Johns Hopkins Press, Baltimore, 50 p.
- WADA (E.) et HATTORI (A.), 1971. — Nitrite metabolism in the euphotic layer of the central North Pacific Ocean. *Limnol. Oceanogr.*, vol. 16 : 766-772.
- WOOD (E. D.), ARMSTRONG (F. A. J.) et 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.) et BARRETT (I.), 1965. — Nitrite distribution in Peru current waters. *J. Mar. Res.*, vol. 23 : 210-221.