

LE CONTRE-COURANT DE CROMWELL ET LA DISTRIBUTION VERTICALE DE QUELQUES PROPRIÉTÉS PHYSICO-CHIMIQUES DES EAUX ÉQUATORIALES

par L. LEMASSON* et B. PITON**

RÉSUMÉ

Le contre-courant de Cromwell crée dans les couches subsuperficielles qu'il traverse une homogénéisation de la distribution verticale de certaines propriétés, telles que l'oxygène dissous, le phosphore minéral dissous et le gradient de densité; on a pu alors mettre en évidence le sous-courant par l'étude des gradients verticaux de distribution de ces propriétés entre les îles Galapagos et 160° E. La profondeur de la limite supérieure ainsi déterminée varie de 130 mètres dans la partie occidentale de l'océan Pacifique à 30 mètres au large des îles Galapagos; l'épaisseur moyenne de la couche influencée par le contre-courant est de 250 mètres environ. Les résultats obtenus (pente moyenne de la couche à vitesse maximum voisine de $1,4 \cdot 10^{-5}$) à l'aide de ces critères de détermination concordent avec les résultats antérieurs.

ABSTRACT

The Cromwell counter-current involves in the superficial layers an homogenisation of the vertical distribution of some properties such as dissolved oxygen, dissolved inorganic phosphate and density gradient; so it was possible to outline the under-current by means of vertical gradients of distribution between Galapagos Islands and 160° E. The depth of the upper boundary decreases from 130 meters in the western part of the Pacific Ocean to 30 meters in the vicinity of Galapagos Islands; the mean depth of the layer influenced by the undercurrent is about 250 meters. The results (mean slope of the maximum velocity layer near $1,4 \cdot 10^{-5}$) which were obtained on this basis agree with the previous results.

* Océanographe physicien au Centre de Recherches Océanographiques d'Abidjan.

** Océanographe physicien au Centre O.R.S.T.O.M. de Nosy-Bé.

INTRODUCTION

Le contre-courant de Cromwell a été étudié à l'aide de mesures directes de la vitesse de déplacement des masses d'eau et décrit par CROMWELL et al. (1954), KNAUSS (1960-1961-1963) et MONTGOMERY et STROUP (1962). Ces auteurs ont montré que la zone influencée par ce courant est le siège de forts mélanges verticaux qui y provoquent une homogénéisation de certaines propriétés physiques et chimiques.

De novembre 1964 à mars 1965, le navire de recherches « *Coriolis* » du Centre O.R.S.T.O.M. de Nouméa a effectué la croisière océanographique « *Alizé* » dans le Pacifique, au cours de laquelle 74 stations hydrologiques ont été occupées au voisinage immédiat de l'équateur et à moins de 1° de part et d'autre, entre les îles Galapagos et le nord des îles Salomon. Les données obtenues ont permis de déterminer les limites d'extension verticale de la couche soumise à l'action du contre-courant de Cromwell, ainsi que l'influence de celui-ci sur le maximum de salinité subtropical.

1. MISE EN ÉVIDENCE DE L'INFLUENCE DU CONTRE-COURANT DE CROMWELL SUR LA DISTRIBUTION VERTICALE DE L'OXYGÈNE, DU PHOSPHORE MINÉRAL DISSOUS ET DU GRADIENT DE DENSITÉ.

Lorsqu'on étudie la distribution verticale de certaines propriétés physiques et chimiques des eaux superficielles et subsuperficielles le long de l'équateur, on observe la présence de deux gradients verticaux de distribution encadrant une couche où les variations des propriétés sont plus faibles.

L'étude de ces variations pour l'oxygène, le phosphate et le gradient de densité a été effectuée à quatre stations caractéristiques de la croisière *Alizé* (tableau 1).

TABLEAU 1
Position des stations

Station	Latitude	Longitude
02	00° 52 S	092° 11 W
14 A	00° 21 S	124° 40 W
29 A	00° 20 S	162° 38 W
37 A	00° 03 S	170° 48 W

Les courbes de répartition verticale de ces propriétés (fig. 1) mettent en évidence l'existence de deux augmentations de gradient qui permettent de délimiter une couche dont la limite supérieure est nettement définie, tandis que la limite inférieure est moins caractérisée. Cette couche correspond à la zone influencée par le contre-courant de Cromwell.

En effet, le contre-courant qui est associé à la couche de discontinuité caractérisée par la thermocline et un fort gradient vertical d'oxygène dissous, est le siège d'intenses mouvements turbulents qui entraînent une homogénéisation des masses d'eau. Ceci provoque d'une part un affaiblissement des gradients verticaux de distribution des températures, sels nutritifs et oxygène dissous par rapport aux régions proches de l'équateur (mais non traversées par le contre-courant), d'autre part l'apparition d'un faible gradient vertical de ces mêmes propriétés dans la partie inférieure de la couche, où la turbulence est moins forte par suite de la diminution de la vitesse.

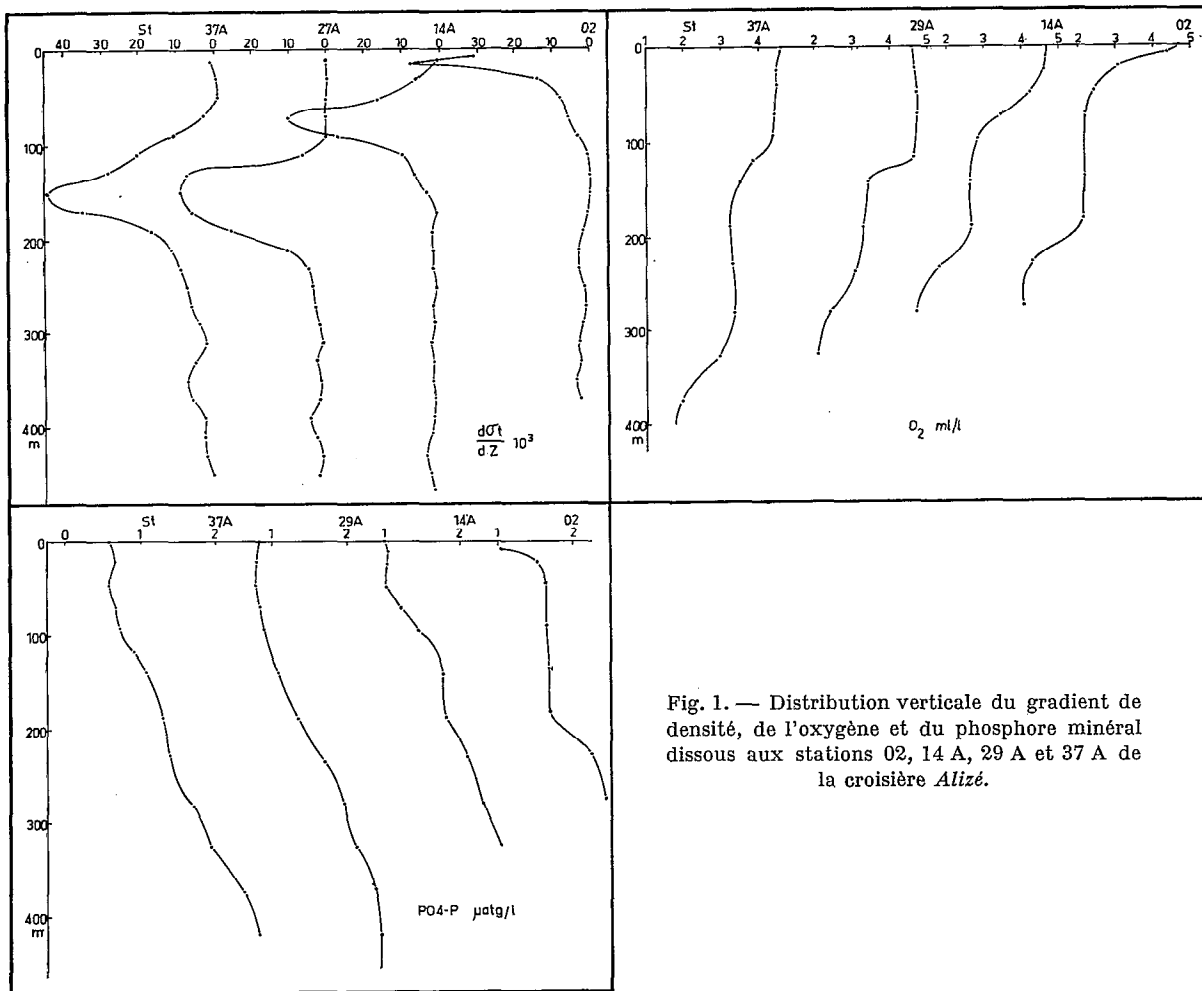


Fig. 1. — Distribution verticale du gradient de densité, de l'oxygène et du phosphore minéral dissous aux stations 02, 14 A, 29 A et 37 A de la croisière *Alizé*.

Il est alors possible de caractériser les limites d'influence du sous-courant par des couches dans lesquelles on observe ces deux gradients verticaux. La couche supérieure est en réalité pratiquement confondue avec la couche à vitesse maximale qui est un peu plus profonde d'une vingtaine de mètres environ.

La limite inférieure devient beaucoup moins nette lorsque l'on va vers l'ouest ; en effet, dans la partie occidentale du Pacifique, les variations en fonction de la profondeur de la teneur en sels nutritifs sont beaucoup plus importantes qu'à l'est, et masquent en quelque sorte l'homogénéisation due au contre-courant de Cromwell. Pour le phosphate, à la station 14 A effectué au voisinage de 92° W , la concentration passe de $1,25 \mu\text{atg/l}$ à $1,95 \mu\text{atg/l}$ entre les limites supérieure et inférieure du contre-courant, alors qu'à la station 37 A située à 171° E cette même concentration croît de $0,90 \mu\text{atg/l}$ à $2,15 \mu\text{atg/l}$; dans le premier cas, l'augmentation de concentration est de $0,70 \mu\text{atg/l}$ alors que dans le second, elle devient égale à $1,25 \mu\text{atg/l}$, soit un accroissement de 56 %.

2. DISTRIBUTION ZONALE DES LIMITES SUPÉRIEURE ET INFÉRIEURE DU CONTRE-COURANT DE CROMWELL.

Les critères physico-chimiques de détermination des limites supérieure et inférieure ayant été ainsi définis, il a été possible de caractériser la zone influencée par le courant de Cromwell pour chacune des stations effectuées le long de l'équateur.

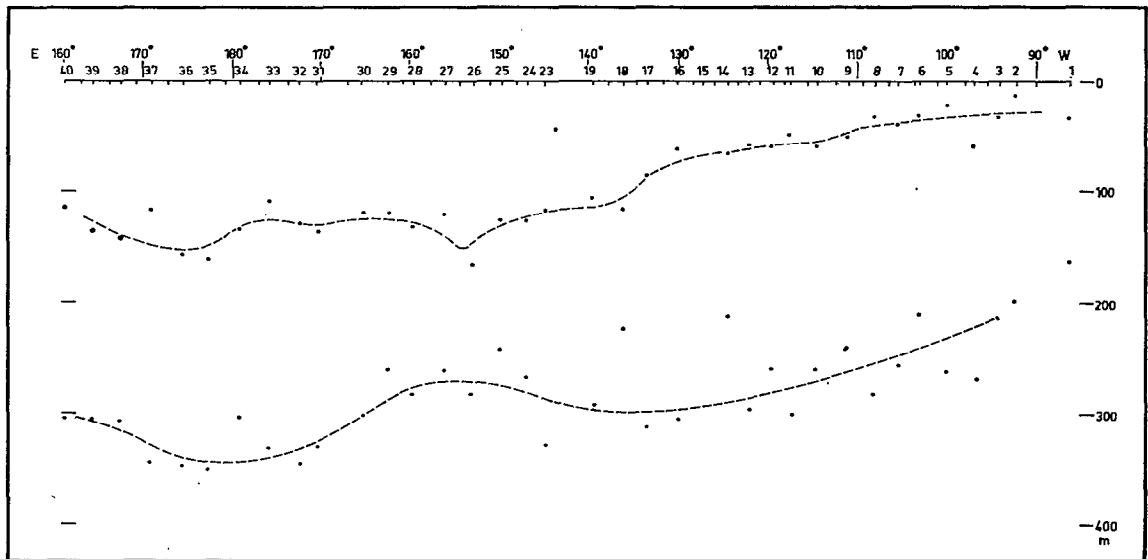


Fig. 2. — Croisière *Alizé*. Profondeurs du gradient maximum d'oxygène.

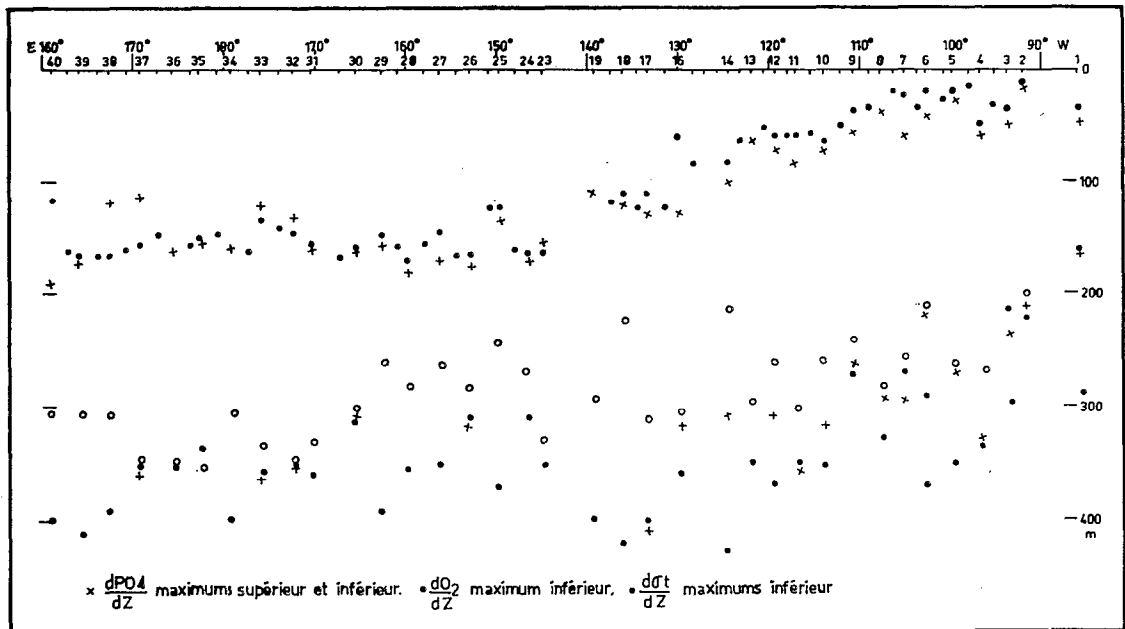


Fig. 3. — Croisière *Alizé*. Profondeurs des gradients maximums de la densité, de l'oxygène et du phosphore minéral dissous.

De toutes les propriétés physiques et chimiques étudiées, la distribution de l'oxygène semble être celle qui définit le mieux les eaux du système du contre-courant ; cette caractéristique avait déjà été signalée par KNAUSS (1960). Les profondeurs des limites obtenues à partir des variations de la concentration de l'oxygène ont été rassemblées dans le tableau 2 et représentées figure 2 ; celles calculées à partir de la distribution verticale du phosphore minéral dissous et du gradient de densité sont représentées figure 3.

TABLEAU 2

Profondeurs en mètres des limites supérieure Z1 et inférieure Z2 de la zone influencée par le contre-courant de Cromwell, d'après la répartition verticale de l'oxygène.

Station	Z1	Z2	Station	Z1	Z2	Station	Z1	Z2	Station	Z1	Z2
01	35	165	10 A	60	235	23	110	325	32	128	344
02	15	202	11 A	48	300	24 A	123	262	33 A	110	330
3 A	32	214	12 A	58	260	25 A	125	243	34 A	133	300
4 A	60	270	13 A	58	295	26 A	160	280	35 A	160	350
5 A	24	262	14 A	65	210	27 A	120	260	36 A	155	240
6 A	33	212	16 A	60	305	28 A	130	283	37 A	115	340
7 A	40	255	17 A	85	270	29 A	115	155	38 A	140	305
8 A	33	282	18 A	115	220	30 A	123	300	39 A	132	304
9 A	48	240	19	105	285	31	135	330	40	115	304

La figure 2 fait apparaître que la profondeur de la limite supérieure définie au moyen de l'oxygène est voisine de 130 mètres entre 160° E et 145° W ; elle diminue progressivement vers l'est pour atteindre 30 mètres au large des Galapagos.

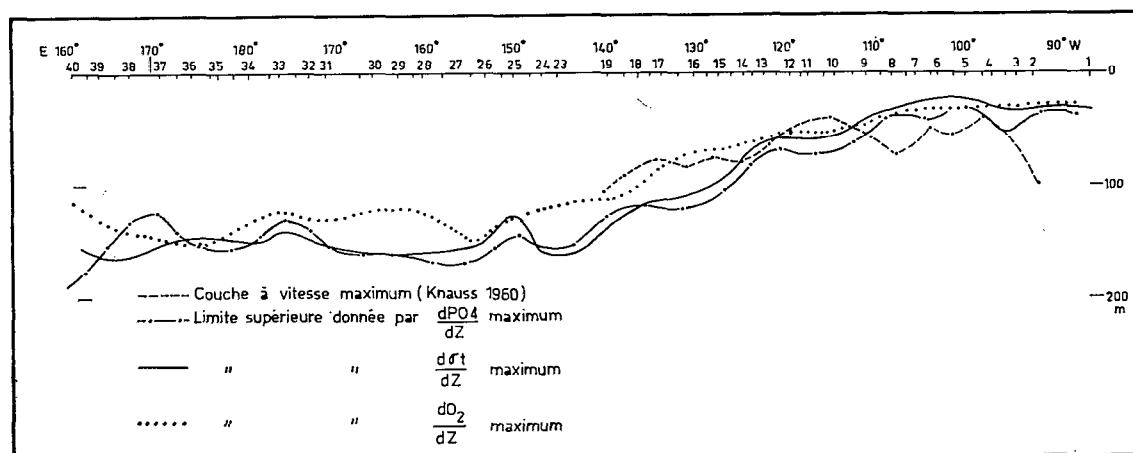


Fig. 4. — Croisière Alizé. Profondeurs des gradients maximums de la densité, de l'oxygène et du phosphore minéral dissous.

La profondeur de la limite inférieure présente des variations importantes d'une station à l'autre ; elle oscille autour d'une profondeur moyenne de 330 mètres, de 160° E jusqu'à 170° W. A l'est de 170° W jusqu'à 145° W, cette limite semble quelque peu imprécise et pourrait être située à une profondeur voisine de 270 mètres. A l'est de 140° W la profondeur moyenne diminue et passe de 310 mètres à 140° W à 200 mètres au large des îles Galapagos.

D'après les distributions du phosphore minéral dissous et du gradient de densité, la limite supérieure suit en gros les mêmes variations zonales de profondeur que celles effectuées par le gradient d'oxygène ; les limites inférieures données par ces deux propriétés, tout en variant d'une station à l'autre, sont à une profondeur inférieure à celle donnée par l'oxygène. Si l'on utilise le critère $\frac{dO^2}{dz}$, l'épaisseur moyenne de la couche influencée par le contre-courant de Cromwell le long de l'équateur de 160° E à 86° W serait d'environ 250 mètres. La figure 4 fait en outre apparaître que la limite supérieure définie par la répartition de l'oxygène est en général, entre 125° W et 170° W, située à 40 mètres au-dessus des limites déterminées par la répartition des autres propriétés ; à l'est de 125° W, les limites données par les trois critères sont pratiquement confondues.

3. REMARQUES SUR L'ÉTUDE PHYSICO-CHIMIQUE DU CONTRE-COURANT DE CROMWELL ET COMPARAISON AVEC LES ÉTUDES ANTÉRIEURES.

3.1. Pente du contre-courant de Cromwell et maximum de salinité.

Lors de l'expédition « *Dolphin* » effectuée en 1958, entre 140° W et 90° W, KNAUSS (1960) a calculé que la couche centrale du contre-courant, qui est aussi par définition la couche à vitesse maximum, avait une pente moyenne de $1,3 \cdot 10^{-5}$. Toutefois, entre ces deux longitudes, la pente n'est pas régulière ; entre 140° W et 155° W, elle atteint une valeur maximale voisine de $2,2 \cdot 10^{-5}$ (fig. 4).

La couche superficielle à maximum de salinité provenant du sud et composée d'eau subtropicale du Pacifique Central aborde l'équateur et est prise en écharpe par le contre-courant de Cromwell ; celui-ci constitue une barrière à l'extension dans l'hémisphère nord de ce maximum,

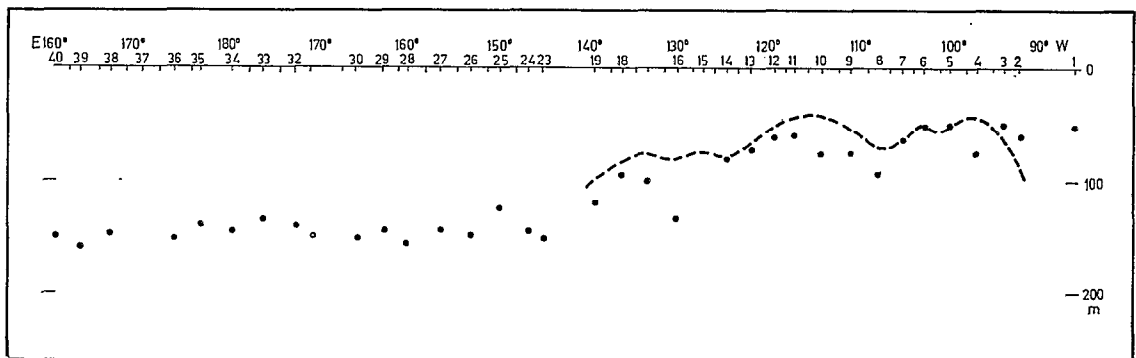


Fig. 5. — Croisière *Alizé*. Profondeur du maximum de salinité sub-superficiel (*Alizé*, 1966). Couche à vitesse maximum (KNAUSS, 1960).

ce qui apparaît dans le gradient horizontal de salinité relativement élevé existant à l'équateur et au sud de celui-ci (MONTGOMERY et STROUP, 1962 — KNAUSS, 1960 — Croisières BORA, 1966 — AUSTIN et RINKEL, 1957). Cette langue d'eau salée entretient une forte salinité tout au long du courant de Cromwell ; en effet, la profondeur de la couche centrale de ce maximum est proche de celle de la limite supérieure précédemment définie le long de l'équateur (fig. 5). La pente de

cette couche, nulle de 160° E à 140° W, est voisine de $1,4 \cdot 10^{-5}$ de 140° W aux îles Galapagos ; elle augmente entre 140° W et 116° W, comme augmente celle de la limite supérieure de la couche influencée par le contre-courant et a une valeur voisine de $2,4 \cdot 10^{-5}$. Ces résultats sont comparables à ceux obtenus lors de la croisière « *Dolphin* ».

3.2. Stabilité.

La stabilité a été calculée pour des tranches successives de 20 mètres à partir de la formule approchée $E = 10^4 \cdot \frac{d\sigma}{dz}$ (SVERDRUP et al., 1942).

Les valeurs du maximum ont été représentées en fonction de la longitude sur la fig. 6.

La valeur moyenne de ce maximum de stabilité décroît de l'ouest aux îles Galapagos ; à l'ouest de 110° W, les valeurs calculées sont voisines de 5, alors qu'à l'est de 110° W, $(\frac{d\sigma}{dz})_{\max}$ a une valeur moyenne de 3, avec des variations allant de 2 à 4. Ces chiffres sont comparables à ceux calculés par KNAUSS (1961) qui, entre 1° S et 1° N, donne des valeurs oscillant entre 2 et 4.

On peut noter en outre que la valeur moyenne du maximum de stabilité le long de l'équateur décroît légèrement d'ouest en est, alors que dans l'ensemble du Pacifique intertropical, celle-ci croît dans cette même direction (KNAUSS, 1963).

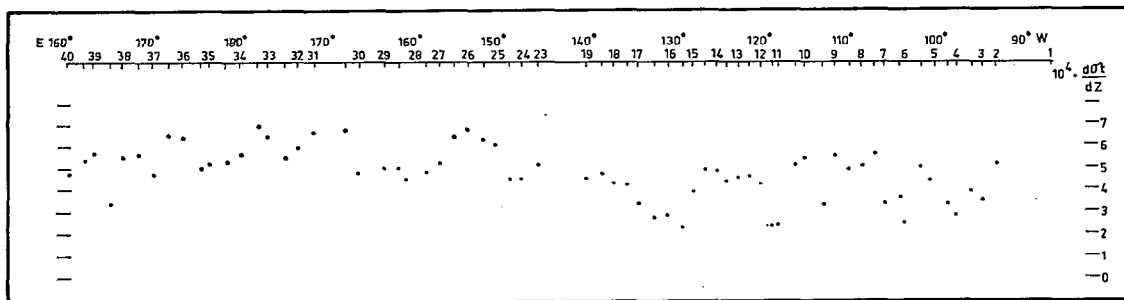


Fig. 6. — Croisière *Alizé*. Maximum de stabilité ($10^4 \frac{d\sigma}{dz}$)

3.3. Pente des isanostères.

Les isanostères 200, 250 et 300 cl/t, situées dans le contre-courant de Cromwell, ont des pentes voisines entre 160° E et 145° W. Ces pentes deviennent identiques et égales à $1,87 \cdot 10^{-5}$ à l'est de 140° W, ce qui est un peu supérieur à la pente moyenne donnée par les gradients maximums ($1,4 \cdot 10^{-5}$).

En effet, l'anomalie de volume spécifique passe de 250 cl/t environ au voisinage de 140° W à 300 cl/t près des îles Galapagos dans la couche définie par $\frac{d\sigma}{dz}$ maximum. Cette couche, proche de la veine à vitesse maximum, étant une bonne représentation de la limite supérieure des eaux influencées par le sous-courant, on peut donc dire que celui-ci a un écoulement isentropique (la variation de l'anomalie de volume spécifique y est relativement faible de l'ouest à l'est).

TABLEAU 3
Pentes des isanostères dans le contre-courant de Cromwell

cl/tonne	200	250	300
160° E-145° W	0,8 . 10 ⁻⁵	0,7 . 10 ⁻⁵	0,65 . 10 ⁻⁵
140° W- 92° W	1,87 . 10 ⁻⁵	1,87 . 10 ⁻⁵	1,87 . 10 ⁻⁵

Les isanostères sont représentées figure 7 où elles sont comparées schématiquement à la limite supérieure moyenne du courant de Cromwell précédemment définie.

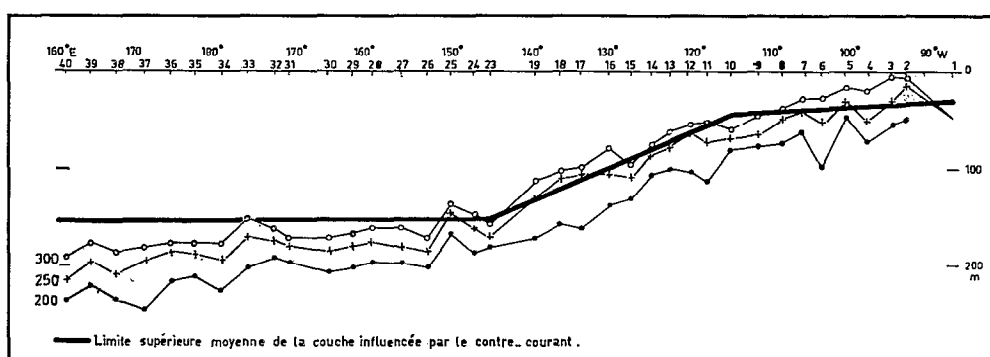


Fig. 7. — Croisière *Alizé*. Distribution des isanostères 300, 250 et 200 cl/tonne.

CONCLUSION

La zone influencée par le contre-courant de Cromwell est caractérisée par une homogénéisation des propriétés physico-chimiques due à de forts mélanges verticaux ; les limites supérieure et inférieure de cette couche d'une épaisseur moyenne de 250 mètres, peuvent donc être déterminées en longitude par l'examen des gradients verticaux de distribution de quelques propriétés.

En effet, les critères physico-chimiques tels que stabilité, sels nutritifs (phosphate, nitrate...), oxygène dissous sont de bons traceurs permettant de bien délimiter la zone de forte turbulence du sous-courant équatorial. Ce procédé ne permet évidemment qu'une étude qualitative du phénomène, mais les renseignements qu'il apporte sont nécessaires si l'on veut entreprendre une étude quantitative du sous-courant.

BIBLIOGRAPHIE

- AUSTIN (T. S.) et RINKEL (M. O.), 1957. — Variations in upwelling in the equatorial Pacific. Proceedings of the ninth Pacific science congress of the Pacific Science Association, 16, pp. 67-71.
- « BORA », 1966. — Croisières Océanographiques du Centre O.R.S.T.O.M. de Nouméa (non publié).
- CROMWELL (T. R.), MONTGOMERY (R. B.) et STROUP (E. D.), 1954. — Equatorial undercurrent in Pacific Ocean revealed by new methods. *Science*, 119, pp. 648-649.
- KNAUSS (J. A.), 1960. — Measurements of the Cromwell current. *Deep sea Res.*, 6, 4, pp. 265-286.
- KNAUSS (J. A.), 1961. — The structure of the Pacific Equatorial countercurrent. *J. Geophys. Res.*, 66, 1, pp. 143-155.
- KNAUSS (J. A.), 1963. — Equatorial current systems. *The Sea*, 2. Hill, M. N. (ed), Interscience publishers, New York, pp. 235-252.
- MONTGOMERY (R. B.) et STROUP (E. D.), 1962. — Equatorial waters and currents at 150° W in July-August 1952. *The John Hopkins oceanographic studies*, 1, 68 p.
- ROTSCHI (H.), HISARD (Ph.), LEMASSON (L.), MAGNIER (Y.), NOËL (J.) et PITON (B.), 1966. — Résultats des observations physico-chimiques de la croisière *Alizé*, 56 p. (non publié).
- SVERDRUP (H. V.), JOHNSON (M. W.) et FLEMING (R. H.), 1946. — *The oceans, their physics, chemistry and general biology*. Prentice-Hall, Inc, New York, 1087 p.