

“ SUR LE RENFORCEMENT D'UN UPWELLING ÉQUATORIAL ”

par H. ROTSCIHI et F. JARRIGE*

RÉSUMÉ

En octobre 1966, dans le Pacifique occidental, le renforcement de la composante est de l'alizé à l'équateur a entraîné une accélération du mouvement ascendant des eaux subsuperficielles. Après un coup de vent de trois jours, la teneur en phosphate dans les soixante premiers mètres avait pratiquement doublé et les eaux de surface étaient plus lourdes. Les distributions observées du nitrate et de la densité impliquent des vitesses verticales très supérieures à celles évaluées en régime permanent.

SUMMARY

In October 1966 an intensification of the east component of the trade wind at the equator in the western Pacific has reinforced the upwelling of the subsurface waters. After the wind had blown for three days, the phosphate concentration in the upper sixty meters had practically doubled and the surface water was heavier. The observed distributions of nitrate and density imply a vertical speed much higher than that which has been evaluated in a steady state circulation.

Dans la partie occidentale du Pacifique équatorial, le refroidissement superficiel provoqué à l'équateur par un upwelling a rarement été observé jusqu'à présent (YAMANAKA, ANRAKU, MORITA, 1965) et (YOSHIDA, NITANI, SUSUKI, 1959), sauf à 150° E en début d'année (KNAUSS, 1960). Les distributions moyennes mensuelles de la température superficielle indiquent cependant une extension possible jusqu'à 170° E de l'upwelling équatorial, mais en février seulement (RODEN, 1963).

Au cours de la croisière BORA 4 du N/O « Coriolis » qui se déroula en octobre 1966 le long du méridien 170° E, de 20° S à 4° N, une occasion inattendue fut offerte d'assister au renforcement d'un upwelling équatorial et de préciser quelque peu les conditions météorologiques entraînant une accélération du déplacement vers le haut des eaux subsuperficielles. La même station équatoriale comportant 20 échantillonnages jusqu'à 500 m de profondeur fut occupée à 85 heures d'intervalle, respectivement le 2 octobre à 07.00 heure locale et le 5 octobre à 20.00 heure locale, la première terminant une coupe de 20° S à l'équateur et la seconde débutant une coupe de l'équateur à 4° N complétée d'une coupe de 4° N à 4° S. La fin de la première coupe fut exécutée avec des vents locaux modérés de l'ordre de 3-5 m/sec venant de l'est-sud-est ; le 2 octobre ils se sont ren-

* Centre O.R.S.T.O.M. de Nouméa.

forcés jusqu'à 7-8 m/sec en tournant légèrement vers l'est et ils se sont maintenus en force et en direction jusqu'au 7 octobre, alors que, faisant route vers le nord, le navire avait atteint la latitude de 2°00 N ; après cette date et jusqu'à la fin du travail le vent a progressivement tourné au sud en s'affaiblissant. Il y a donc eu, pendant une période de 5 jours, un renforcement sensible de la composante est du vent, en zone équatoriale, tel qu'il a été observé localement à bord du « Coriolis ».

Cette modification du régime météorologique s'est traduite de manière substantielle dans de nombreuses distributions superficielles. C'est ainsi qu'entre les deux stations équatoriales du 2 et du 5 octobre, la température enregistrée au thermographe a baissé de près de 1,0° C ; le refroidissement équatorial lié au mouvement ascendant des eaux subsuperficielles qui était marqué par une différence d'à peine 0,5° C entre la température à 3°30 S et celle à l'équateur, le devint par

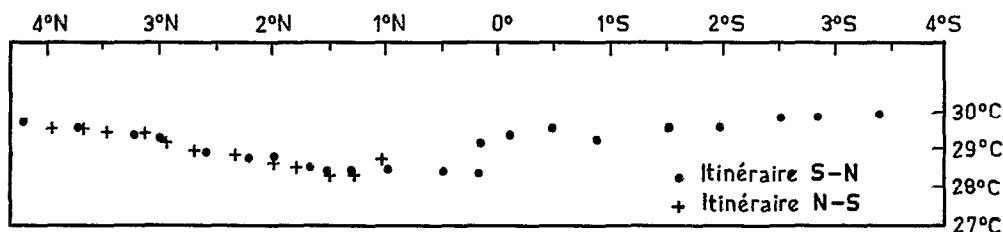


Fig. 1. — Température superficielle observée le long du méridien 170° E au cours de la croisière BORA 4 du N/O « Coriolis ».

une différence de 1,5° C entre l'équateur et 4° N ; la température resta minimale jusque vers 2° N (fig. 1). Ce refroidissement que l'on note également à une profondeur de 20 m a persisté jusqu'au 10 octobre c'est-à-dire trois jours après que les vents eurent tourné au sud en s'affaiblissant. Par la suite, la couche superficielle s'est réchauffée très rapidement.

L'upwelling ainsi mis en évidence a entraîné un enrichissement des eaux de surface en nitrate et en phosphate, ainsi que leur alourdissement comme le montrent les distributions verticales observées aux stations 13 du 2 octobre et 14 du 5 octobre (fig. 2) ; ces distributions indiquent de plus qu'à la reprise des travaux à l'équateur l'intensification de l'upwelling n'affectait de façon

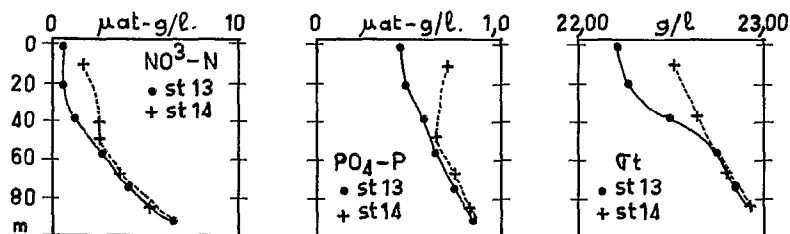


Fig. 2. — Distribution verticale à l'équateur, le 2 octobre station 13 et le 5 octobre station 14 du phosphate, du nitrate et de sigma-t.

notable guère plus que les premiers soixante mètres dans lesquels au 2 octobre la quantité de phosphate dans une colonne de 1 m² de base était de 70 mat-g alors que le 5 octobre, avec 130 mat-g elle avait pratiquement doublé. Les distributions verticales du phosphate et du nitrate le long de 170° E dans la zone équatoriale font apparaître clairement un enrichissement des eaux de l'hémisphère nord (fig. 3).

En l'absence de mesures directes de courants il est difficile d'évaluer les vitesses verticales, d'autant plus qu'il s'agit d'un régime essentiellement transitoire. Cependant, dans l'hypothèse où l'on admet que la vitesse induite par le renforcement de la composante est du vent à l'équateur

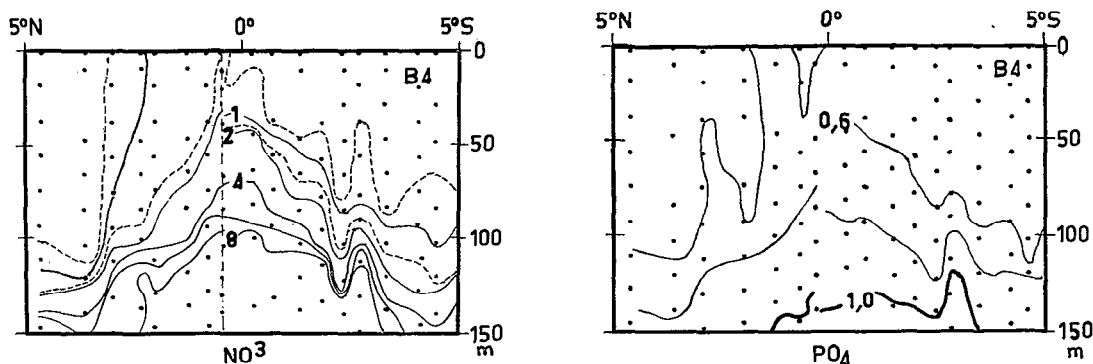


Fig. 3. — Distribution verticale entre 5° N et 5° S, du phosphate et du nitrate; concentrations exprimées en mat-g/m³.

fut constante pendant le coup de vent et avait atteint sa valeur d'équilibre très rapidement et si l'on considère que l'épaisseur de la couche perturbée a cru de façon linéaire du 2 au 5 octobre, on peut évaluer la vitesse verticale et la vitesse de propagation de l'upwelling à partir de la diminution de la profondeur de diverses isolignes. En effet, si Δt est le temps séparant deux mesures indiquant une variation Δz de la profondeur d'une isoligne qui était initialement à z mètres, si w est la vitesse verticale constante dans le temps et V_z la vitesse de propagation vers le bas de l'upwelling, on peut écrire :

$$\Delta t = z/V_z + \Delta z/w$$

L'application de cette équation à deux isolignes conduit à un système de deux équations à deux inconnues w et V_z . Les changements intervenus dans la distribution verticale à l'équateur du nitrate donnent une vitesse verticale w de $6 \cdot 10^{-2}$ cm/sec ou 52 m/jour, la vitesse de propagation vers le bas de l'upwelling V_z étant de $1,7 \cdot 10^{-2}$ cm/sec ou 15 m/jour. Les variations de la densité conduisent à une vitesse verticale w de $4 \cdot 10^{-2}$ cm/sec ou 35 m/jour et à une vitesse de propagation de l'upwelling V_z de 15 m/jour identique à celle trouvée avec le nitrate. Si l'on admet au contraire que l'épaisseur z de la couche perturbée par l'upwelling est une fonction exponentielle du temps, de la forme $z = z_0 (1 - e^{-mt})$, le même raisonnement appliqué à la remontée des diverses isolignes de la distribution du nitrate conduit à des valeurs de w comprises entre $3 \cdot 10^{-2}$ cm/sec et $1 \cdot 10^{-2}$ cm/sec. Tous ces chiffres sont basés sur une remontée de l'ordre de 30 m des eaux situées à une profondeur d'une quarantaine de mètres et de l'ordre de 10 m pour celles situées vers 50 m.

Ce mode de calcul de la vitesse verticale conduit à des valeurs 10 à 100 fois supérieures à celles évaluées en régime permanent, dans le Pacifique oriental (KNAUSS, 1966). Néanmoins, elles représentent une moyenne inférieure au maximum atteint et elles indiquent un ordre de grandeur qui pourrait être acceptable dans un régime transitoire de formation d'un upwelling.

En effet, le calcul de la concentration moyenne finale du nitrate dans les soixante premiers mètres à l'équateur, dans l'hypothèse où l'épaisseur de la couche perturbée par l'upwelling augmente de 15 m par jour, conduit à une valeur de 1,75 mat-g/m³ compte non tenu de la consommation de nitrate par la photosynthèse; la concentration moyenne observée fut de 2,2 mat-g/m³. La différence implique que l'une au moins des deux vitesses w et V_z est supérieure aux valeurs trouvées.

De même, dans l'hypothèse où la vitesse verticale fut constante pendant toute la durée du coup de vent et où l'épaisseur de la couche perturbée a atteint rapidement sa valeur définitive, il est aisé de montrer que, compte non tenu de la consommation biologique du nitrate par photosynthèse, la teneur en nitrate de la couche perturbée est une fonction exponentielle du temps. Elle a la forme $c = A - Ke^{-wt/z}$ où K est une constante fixée par la concentration initiale, w la vitesse verticale, z l'épaisseur de la couche perturbée et A le produit de z par la concentration du nitrate dans l'eau profonde enrichissant les couches de surface. La concentration initiale

totale du nitrate dans les soixante dix premiers mètres étant 70 mat-g/m², la concentration finale étant 130 mat-g/m² la vitesse verticale constante est égale à 9 10⁻³ cm/sec.

En outre, lorsque l'on analyse l'évolution de la concentration à une profondeur donnée, l'on montre aisément que $\delta c/\delta t = w \delta c/\delta z$; entre l'observation initiale et l'observation finale, en ne considérant que les valeurs moyennes, on peut écrire $\bar{w} = \Delta c/t (\delta \bar{c}/\delta z)$ où Δc est la variation de la concentration pendant le temps t et $\delta \bar{c}/\delta z$ la pente moyenne de la courbe $c = f(z)$. L'application de cette équation aux deux distributions du nitrate respectivement les 2 et 5 octobre conduit à une vitesse de 9 10⁻² cm/sec à 10 m qui n'est plus que 3 10⁻² cm/sec à 20 m, 1 10⁻² cm/sec à 30 m et 0,3 10⁻² cm/sec à 50 m ; la valeur moyenne, pour la couche 0-60 m est 2 10⁻² cm/sec.

Plus généralement, à partir de la distribution initiale et de la distribution finale d'un sel nutritif, et en admettant qu'à une profondeur donnée la concentration est une fonction simple du temps, on peut obtenir une expression analytique de la concentration, fonction à la fois de z et de t et qui peut servir à évaluer avec plus de précision $\delta c/\delta z$ et $\delta c/\delta t$ et par conséquent w . Dans l'hypothèse où la concentration à un niveau donné est une fonction exponentielle du temps, le calcul a indiqué une vitesse w qui croît en fonction du temps et décroît avec la profondeur et dont l'intensité est comprise entre 0 et 10 10⁻² cm/sec. Néanmoins, il peut paraître arbitraire de détailler ces calculs lorsque l'on ne dispose pas d'observations intermédiaires définissant la variation de la concentration avec le temps ; l'on est alors limité à l'élaboration de modèles théoriques entre lesquels tout choix est impossible.

Notons enfin que dans le cas similaire d'un upwelling côtier s'étant développé en 76 heures et ayant entraîné une remontée de 20 m des eaux situées vers une profondeur de 30 m (SMITH, PATTULO, LANE, 1966), différents modes de calcul basés sur le transport Ekman, la conservation de la salinité, le budget thermique et la remontée des isopycnes ont tous conduit à une vitesse verticale de l'ordre de 7-8 10⁻³ cm/sec. Le calcul de la vitesse basé sur l'hypothèse d'une propagation linéaire vers le bas de l'upwelling, appliquée au cas de cet upwelling a donné une vitesse verticale de 7 10⁻³ cm/sec.

Les valeurs calculées de w et V_z conduisent donc à une interprétation acceptable des distributions observées et il apparaît qu'un upwelling pas très actif associé à un vent de 3-5 m/sec s'est considérablement renforcé jusqu'à une intensité au moins égale à 10⁻² cm/sec lorsque la composante est de ce dernier a atteint une force comprise entre 5 et 10 m/sec ; il s'est rapidement atténué lorsque le vent est tombé. Cette observation confirme des évaluations antérieures de force de vent nécessaire au maintien d'une circulation d'ouest à l'équateur (RODEN, 1962) et (NEUMANN, 1960) et elle souligne l'importance du vent dans la création d'une circulation verticale à l'équateur dans le Pacifique occidental. L'upwelling peut donc y avoir une fréquence plus grande qu'on ne le pensait.

BIBLIOGRAPHIE

- KNAUSS (J.A.), 1960. — *Deep Sea Res.*, 6, 4, pp. 265-286.
 KNAUSS (J.A.), 1966. — *J. Mar. Res.*, 24, 2, pp. 205-240.
 NEUMANN (G.), 1960. — *Deep Sea Res.*, 6, 4, pp. 328-335.
 RODEN (G.I.), 1962. — *Geofisica Internacional*, 2, 4, pp. 77-91.
 SMITH (R.L.), PATTULO (J.G.) et LANE (R.K.), 1966. — *J. Geophys. Res.*, 71, 4, pp. 1135-1140.
 YAMANAKA (H.), ANRAKU (N.) et MORITA (J.), 1965. — *Rep. Nankai Regional Fish. Res. Lab.*, 22, pp. 35-70.
 YOSHIDA (S.), NITANI (H.) et SUZUKI (N.), 1959. — *Hydro. Bull. Mar. Saf. Board. Japan*, 59, pp. 1-30.