

VARIATIONS SAISONNIÈRES A L'ÉQUATEUR DANS LE GOLFE DE GUINÉE

PH. HISARD

Océanographe physicien O.R.S.T.O.M. B.P. V18, Abidjan

RÉSUMÉ

Alors qu'en été et en automne (de l'hémisphère boréal), la zone équatoriale de l'océan Atlantique, dans le golfe de Guinée, a un niveau de production comparable à celui des zones océaniques les plus productives, en hiver et au printemps, les mécanismes d'enrichissement sont très affaiblis et le potentiel biologique des eaux équatoriales approche celui des eaux tropicales oligotrophes. Les données recueillies de 1962 à 1973 à l'équateur, aux environs de 5°W, permettent de décrire l'évolution des structures hydrologiques qui accompagne les différents stades de développement de la production primaire. Au printemps quand la divergence équatoriale est peu marquée, la vitesse du Sous Courant Équatorial est la plus élevée (proche de 100 cm/s) et la salinité du noyau subsuperficiel qui lui est associée, est la plus forte (supérieure à 36,4 ‰); en été et en automne, lorsque les mécanismes d'enrichissement s'intensifient, l'intensité du Sous Courant Équatorial diminue et la valeur du maximum de salinité subsuperficiel est la plus faible (35,8 ‰). L'étude du gradient vertical de vitesse et celle du gradient vertical de densité suggèrent que les échanges verticaux turbulents sont importants en automne pour expliquer l'enrichissement des eaux équatoriales.

ABSTRACT

Seasonal variations at the equator in the gulf of Guinea. During the northern summer and autumn, the Atlantic Equatorial waters in the gulf of Guinea have a productivity level as high as this one of the most productive oceanic waters; during the northern winter and spring, however, the equatorial productivity is low, like this one of the tropical oligotrophic waters. Hydrological equatorial data collected from 1962 to 1973 at about 5°W, allow us to evidence the seasonal variations of the structures linked to the seasonal variations of the primary production. During the northern spring, when the equatorial divergence is weak, the velocity maximum of the Equatorial Undercurrent is stronger (nearly 100 cm/sec) and so is the salinity maximum of the subsurface core (36,4 ‰); during autumn, when the enrichment processes strengthen, the Equatorial Undercurrent velocity weakens and so does the subsurface salinity core (35,8 ‰). Studies of both the velocity and the density vertical gradients suggest that turbulent vertical exchanges are important to explain, in autumn, enrichment processes.

INTRODUCTION

L'importance des échanges verticaux dans une région se reflète généralement dans ses caractères hydrologiques et dans la richesse des eaux de la couche euphotique. Dans la région équatoriale Atlantique du golfe de Guinée, les structures hydrologiques présentent d'importantes variations saisonnières :

en été (de l'hémisphère boréal) le refroidissement équatorial est clairement exprimé, il est lié à l'éclatement de la thermocline; au printemps en revanche, il n'y a pas de refroidissement équatorial. Ce contraste est encore plus accentué à 50 m de profondeur (MAZEIKA, non publié; fig. 1). A ces différences de structure hydrologique sont associées des différences d'enrichissement des eaux de la couche

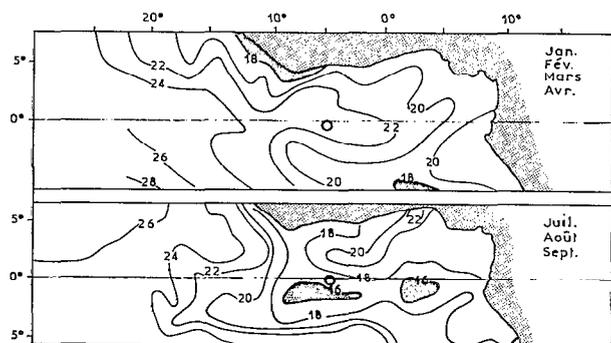


Fig. 1. — Distributions horizontales de la température à 50 m de profondeur dans le golfe de Guinée, de janvier à avril et de juillet à septembre (d'après Mazeika, non publié). Le rond central indique la position moyenne des stations utilisées dans l'article (tableau I).

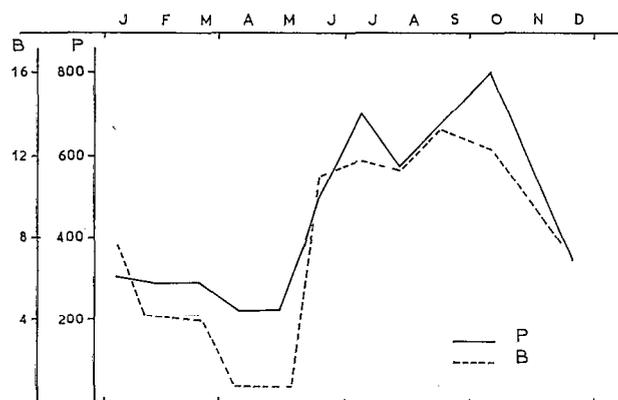


Fig. 2. — Variations annuelles de la production primaire (P) en $\text{mgC}/\text{m}^2/\text{jour}$ (trait plein) et de la biomasse de zooplancton (B) en millier de mg/m^2 (traits pointillés) dans le golfe de Guinée, le long de 10°W , entre 2°N et 5°S (d'après Chmir, 1971).

euphotique; le taux de production des eaux équatoriales varie fortement au cours de l'année (fig. 2) : de décembre à avril, les caractéristiques biologiques des eaux équatoriales sont celles d'eaux tropicales oligotrophes, tandis que de juin à novembre, une production de $700 \text{ mgC}/\text{m}^2/\text{jour}$ et une valeur élevée de la biomasse moyenne de zooplancton permettent, d'après la classification de STIEMANN-NIELSEN (1952), de ranger ces eaux dans la catégorie des eaux à productivité élevée. Ces observations témoignent de l'existence à l'équateur, en été et en automne, de mécanismes importants d'enrichissement alors qu'en hiver et au printemps ces méca-

nismes semblent très affaiblis (CEDIR et LOUTCHKINA 1971).

Ces mécanismes d'enrichissement sont sous la dépendance d'une part de la divergence équatoriale induite par les alizés, d'autre part, des échanges verticaux turbulents déterminés par le champ des courants et la distribution verticale de la densité dans la pycnocline. Nous nous proposons d'analyser l'évolution au cours de l'année, des structures hydrologiques à l'équateur, dans le golfe de Guinée et de voir dans quelle mesure l'existence du Sous Courant Équatorial conditionne, ainsi que l'a suggéré SCHEMAINDA (1965), un échange vertical de matière et d'énergie entre les couches d'eau de surface pauvres en sels nutritifs et les couches profondes riches.

VARIATIONS HYDROLOGIQUES A L'ÉQUATEUR, VERS 5°W .

Vingt et une stations hydrologiques ont été effectuées à l'équateur, vers 5°W , de 1962 à 1973; elles couvrent également les différentes saisons. Différents paramètres hydrologiques ont été relevés (tabl. 1) et moyennés par saisons (tabl. 2) : température de surface, salinité de surface, maximum de salinité subsuperficiel et sa profondeur, température à 50 m de profondeur, maximum de gradient vertical de densité de la pycnocline et sa profondeur, hauteurs dynamiques des surfaces 0 et 50 db par rapport à 500 db. La valeur exacte du maximum de salinité subsuperficiel n'est pas toujours bien déterminée car la densité verticale des observations est parfois insuffisante; lors des trois campagnes du N. O. « Capricorne », l'emploi d'une sonde à enregistrement continu a permis une définition précise de ce maximum qui se trouve à la profondeur du maximum de vitesse du Sous Courant Équatorial; la valeur même du maximum de salinité est importante à connaître car il semble exister une relation (déjà signalée par KHANAICHENKO et al., 1965) entre la valeur du maximum de salinité subsuperficiel et l'intensité de la vitesse du Sous Courant Équatorial (fig. 3). A l'exception des stations effectuées par le N. O. « Reine Pokou » (RP), toutes les stations ont comporté des mesures directes de courant (tabl. 3).

De janvier à mai-juin, les échanges verticaux semblent être faibles ainsi que le suggèrent les valeurs élevées de la température à 0 m et à 50 m de profondeur et le fait que la salinité des eaux de surface soit faible malgré la forte valeur (1) du maximum

(1) En juin 1968, la valeur de la salinité du maximum subsuperficiel était supérieure à $36,40 \text{ ‰}$ de 12°W à 1°W ; l'intensité maximum du Sous Courant Équatorial était voisine de 100 cm/s . Il s'agit là des valeurs les plus fortes que nous ayons relevées; elles sont à rapprocher des valeurs observées par KOLESNIKOV et al., (1971) lors de la campagne du N. O. « Akademik Vernadskii », effectuée en mars 1969 dans la partie orientale du golfe de Guinée à 0° - 4°E ; le maximum de salinité était supérieur à $36,40 \text{ ‰}$ et la vitesse maximum du Sous Courant était supérieure à 80 cm/s .

TABLEAU 1

Liste des stations utilisées, date, référence et position. Valeurs des différents paramètres hydrologiques : température de surface en °C (T° 0 m), salinité de surface en ‰ (S 0 m), maximum de salinité subsuperficiel en ‰ et sa profondeur en m (S max Zm), température à 50 m de profondeur en °C (T° 50), valeur du maximum de gradient vertical de densité en 100 Δσ_t calculé par tranches de 10 m (Gdt) et sa profondeur en m (Zm), hauteurs dynamiques en mm.dyn des surfaces 0 db et 50 db par rapport à la surface de référence 500 db (hauteurs moyennées entre 1° N et 1° S). - - Symboles des références des stations : CAP, « Capricorne », O.R.S.T.O.M. ; RP, « Reine Pokou », O.R.S.T.O.M., C.R.O. Abidjan ; GN, « Géronimo », U. S. Fish and Wildlife service ; ZV, « Zvezda », Atlant NIRO ; PAP, « Professor Albrecht Penck », Inst. Recherches Marines Rostok (RDA) ; CH, « Jean Charcot », C.N.E.X.O., campagne « Guinée 1 », O.R.S.T.O.M.

DATE	STATION	POSITIONS	T° 0m	S 0m	Smax	Zm	T° 50	Gdt	Zm	0 db	50 db
11/01/73	CAP 13	00°18' S-03°48' W	28,45	34,87	36,28	55	22,60	097	45	856	612
13/02/62	RP 386	00°03' N-04°18' W	27,63	34,71	35,97	50	25,18	108	45	901	643
25/03/63	RP 011	00°00' -04°02' W	28,64	34,52	36,23	47	24,17	081	45	874	622
04/03/64	RP 044	00°00' -04°02' W	29,17	34,16	36,15	49	21,28	165	35	900	633
20/03/63	GN 188	00°00' -04°00' W	28,77	35,00	36,26	67	24,72	113	55	914	651
06/05/63	ZV 185	00°30' S-05°00' W	29,70	33,49	36,18	49	24,79	152	15	917	651
20/05/64	PAP 33	00°04' N-04°10' W	27,50	34,75	35,96	50	18,15	188	25	735	513
23/05/63	RP 524	00°00' -04°02' W	28,88	34,07	35,82	51	24,06	159	35	969	676
14/06/68	CH 48	00°21' S-04°57' W	26,75	35,16	36,43	69	23,80	091	45	879	662
21/06/62	RP 429	00°00' -04°02' W	25,62	34,54	35,90	30	16,60	132	15	741	583
15/07/64	ZV 482	00°08' N-05°17' W	25,88	34,72	35,79	58	16,63	136	15	755	590
05/08/63	RP 546	00°01' S-04°09' W	25,89	33,89	35,75	48	17,53	212	25	800	599
18/08/65	ZV 120	00°00' -04°59' W	24,30	34,87	35,61	36	16,20	120	15	755	604
04/09/72	CAP 23	00°03' N-04°00' W	24,66	35,42	35,91	65	18,88	080	25		
12/09/65	ZV 158	00°00' -05°00' W	24,60	35,37	35,88	46	17,79	073	15	734	578
13/09/62	RP 448	00°02' N-04°01' W	24,70	35,21	35,90	69	21,30	091	45	855	654
27/09/65	ZV 220	00°00' -05°00' W	24,88	35,39	35,93	78	20,73	064	25	811	624
17/10/63	RP 583	00°04' N-03°55' W	27,00	35,08	35,97	68	22,33	091	45	904	673
18/10/65	ZV 264	00°33' S-05°00' W	25,28	35,43	35,82	55	19,56	065	45	795	612
08/11/62	RP 475	00°00' -04°02' W	26,19	35,99	35,95	74	24,32	071	55	883	681
14/11/71	CAP 14	00°45' N-04°00' W	25,70	35,29	35,86	45	19,00	120	35	812	620

TABLEAU 2

Valeurs moyennes par saison des paramètres hydrologiques à l'équateur vers 5° W ; cf. tableau 1 pour la signification des symboles

SAISON	T° C à 0 m	S ‰ à 0 m	S max	Z m	T° C à 50 m	Gdt	Z m	0 db	50 db
HIVER.....	28,55	34,60	36,15	55	23,85	120	45	900	640
PRINTEMPS.....	27,70	34,40	36,10	50	21,50	145	30	850	620
ÉTÉ.....	25,00	34,90	35,80	55	18,05	120	20	780	605
AUTOMNE.....	25,80	35,40	35,90	65	21,20	080	40	840	640

TABLEAU 3

Valeurs de l'intensité de la composante zonale maximum (positive vers l'est) du Courant Équatorial Sud à l'équateur vers 5° W (V₁, cm/s) et sa profondeur (Z₁, m) ; valeurs de l'intensité maximum de la composante zonale du Sous Courant Équatorial vers 5° W (V₂, cm/s) et sa profondeur (Z₂, m) ; valeurs du gradient vertical de vitesse rapportées à une épaisseur de 10 m.

Origine des données : (a) : « Capricorne », 7302 et 7107, O.R.S.T.O.M. ; (b) : « Zvezda », 14 et 15, Atlant NIRO ; (c) : « Géronimo », Equalant 3 et Gerard et al., 1965, U.S. Fish and Wildlife service ; (d) : « Professor Albrecht Penck », Inst. Recherches Marines Rostok (RDA) ; (e) : « Jean Charcot », campagne « Guinée 1 », O.R.S.T.O.M.

(1) et (2) : mesures rapportées à une surface de référence située à 215 m de profondeur ; ces valeurs sont probablement

respectivement surestimées et sous-estimées d'environ 20 cm/s (voir texte).

DATE	Courant		Sous Courant		10.(V ₂ -V ₁) Z ₂ -Z ₁
	Équatorial Sud		Équatorial		
	V ₁	Z ₁	V ₂	Z ₂	
Janvier 1973	-15	10	+67	45	23 (a)
Février 1965			+51	50	(b)
Mars 1964			+93	50	(c)
Mai 1964	-47 (1)	15	+59 (2)	51	30 (d)
Juin 1968	-62	20	+97	80	26 (e)
Août 1965	-36	10	+45	100	9 (b)
Septembre 1965	-8	10	+40	50	12 (b)
Septembre 1964	-34	0	+57	50	18 (c)
Octobre 1965	-4	10	+55	100	6 (b)
Novembre 1971	-69	10	+28	60	19 (a)

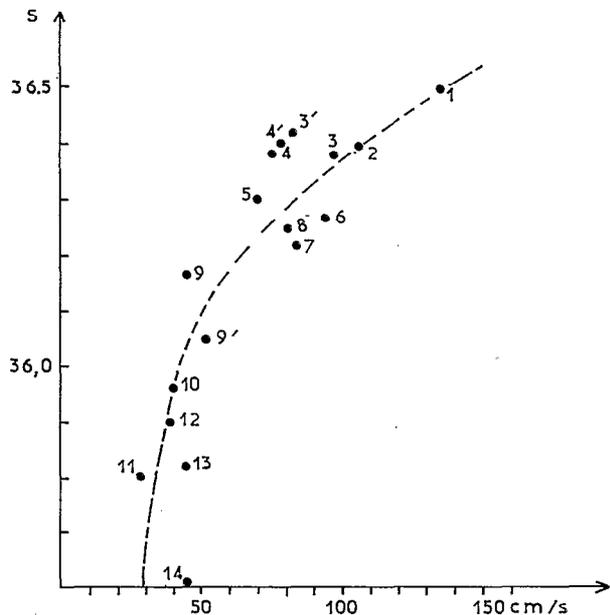


Fig. 3. — Relation entre l'intensité maximum du sous-courant équatorial (en abscisse, cm/s) et la valeur du maximum de salinité subsuperficiel qui lui est associée, le long de l'équateur dans l'océan Atlantique. Position, date et référence : 1 : 13°30' W, avril 1961, Metcalf et al., 1966 ; 2 et 3 : 7° et 8° W, juin 1968, Lemasson et al., 1969 ; 3' : 15°30' W, mars 1963, Neumann 1965 ; 4 : 29° W, mars 1963, « Crawford » ; 4' : 4° E, mars 1969, Kolesnikov et al., 1971 ; 5 : 29°30' W, novembre 1966, Brosin et Nehring 1968 ; 6 et 7 : 15° et 8° W, mars 1964, Rinkel et al., 1966 ; 8, 9 et 10 : 12°, 8° et 4° W, juin 1964, Schemainda 1967 ; 9' : 1° W, juin 1968, Lemasson et al., 1969 ; 11 : 4° W, novembre 1971, Lemasson et Rébert, sous presse ; 12, 13 et 14 : 5° W, août, septembre et octobre 1965, Doubravin 1970.

de salinité subsuperficiel vers 50 m de profondeur (fig. 4 a et b ; tabl. 1 et 2). De fait d'après les données de la campagne « Guinée 1 » du N. O. « Jean Charcot » (LEMASSON *et al.*, 1969) la teneur en phosphate et en nitrate, en juin 1968, dans la couche des 50 premiers mètres était faible (fig. 5). C'est la période où la productivité des eaux équatoriales est la plus faible (cf. fig. 2).

De juin à septembre, les températures à 0 m et à 50 m de profondeur diminuent fortement et le maximum de salinité subsuperficiel est érodé (fig. 4 a et b ; tabl. 1 et 2) suggérant l'amorce du développement des échanges verticaux. En juillet 1964 (Zv 482) la teneur en phosphate à 58 m de profondeur était de 0,68 $\mu\text{atg/l}$, cependant en surface les teneurs restaient faibles.

De septembre à novembre l'enrichissement est maximum ; la salinité des eaux de surface atteint sa valeur la plus forte et la différence entre la salinité de surface et la salinité du maximum subsuperficiel est minimum. Cependant la tempéra-

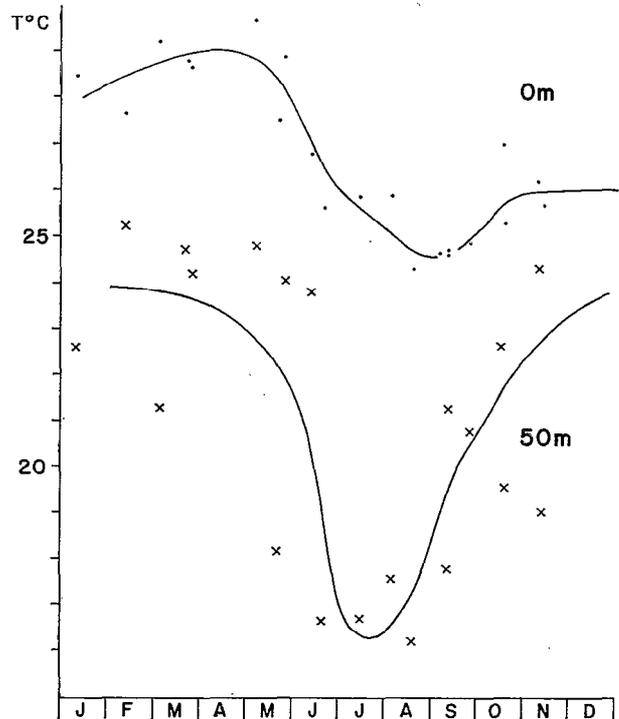


Fig. 4 a. — Variations annuelles de la température à 0 m et 50 m de profondeur à l'équateur, vers 5° W, d'après les données du tableau 1.

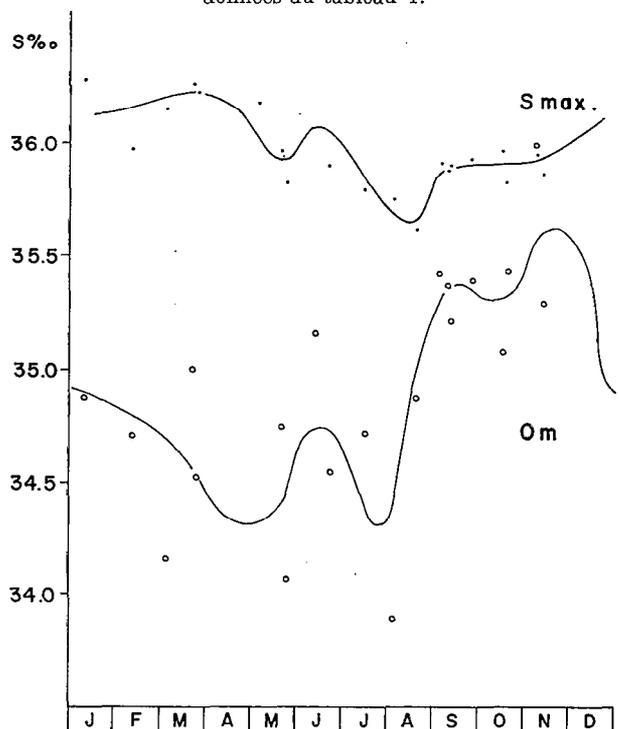


Fig. 4 b. — Variations annuelles de la salinité de surface (O) et de la salinité du maximum subsuperficiel (.) associée au sous-courant équatorial, à l'équateur, vers 5° W, d'après les données du tableau 1.

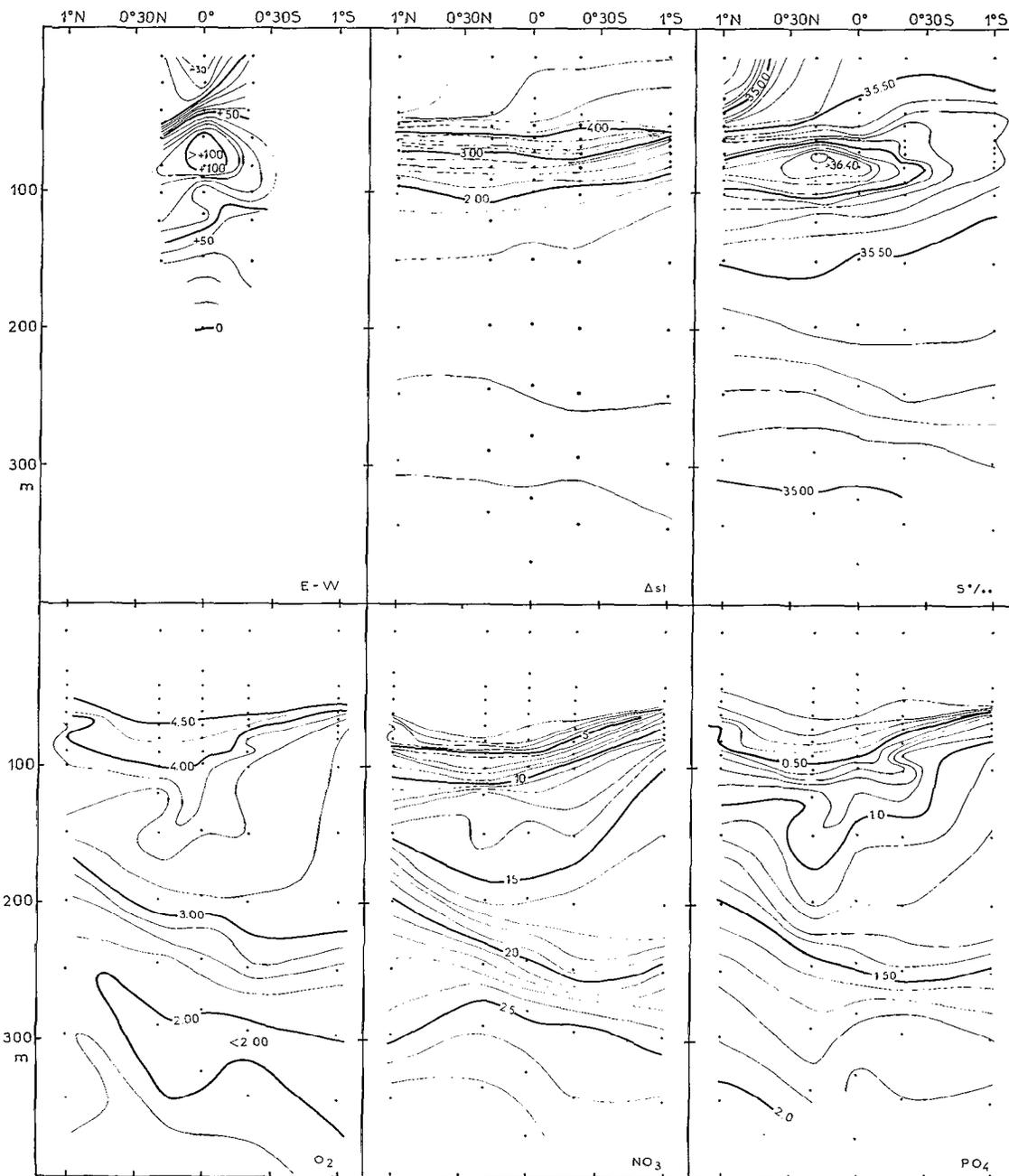


Fig. 5. — Distributions verticales à 7° W, entre 1° N et 1° S, de la composante zonale de la vitesse (en cm/s ; positif vers l'est), de l'anomalie thermostérique (en °C), de la salinité (‰), de l'oxygène (en ml/l), du nitrate et du phosphate (en μatg/l). Campagne « Guinée 1 » du « Jean Charcot », Lemasson et al., 1969.

ture à 0 m et à 50 m de profondeur remontent sensiblement. En novembre 1971 (campagne 7107 du N. O. « Capricorne ») la teneur en phosphate à 50 m de profondeur dépassait 0,80 μatg/l et

atteignait 0,35 μatg/l en surface. La productivité des eaux équatoriales atteint alors son niveau maximum (cf. fig. 2).

MÉCANISMES D'ENRICHISSEMENT À L'ÉQUATEUR.

Les mécanismes d'enrichissement à l'équateur peuvent être le fait d'une part d'échanges verticaux turbulents, d'autre part de la circulation verticale liée à la divergence équatoriale; éventuellement il peut y avoir transport advectif d'eaux riches dérivées du courant de Benguela.

(a) Les échanges verticaux turbulents sont liés à la valeur du gradient vertical de densité et à celle du gradient vertical de vitesse. En hiver le maximum du gradient vertical de densité est élevé, sa profondeur est de 45 m (tabl. 1 et 2); au printemps sa valeur est encore plus forte mais sa profondeur diminue (27 m); en été, il demeure élevé mais sa profondeur est minimale (23 m); ce n'est qu'en automne qu'il diminue nettement, sa profondeur étant de 40 m. Cette évolution suggère que les mouvements verticaux se produisent progressivement; dans un premier temps le gradient vertical de densité dans la pycnocline est intensifié, la pycnocline devient de moins en moins profonde; dans un deuxième temps elle est détruite puis ensuite elle se reformera plus profondément.

La valeur du gradient vertical de vitesse est moins bien connue car les mesures du Courant Équatorial Sud à l'équateur, en surface sont souvent peu précises. Les résultats des mesures de courant (tabl. 3) ont été obtenus par des méthodes diverses : les mesures faites à bord du N. O. « Géronimo » se réfèrent à l'observation de bouées à parachutes, l'une immergée à la profondeur du noyau de salinité maximum, l'autre à 500 m ou 800 m de profondeur; les mesures du N. O. « Zvezda » sont des mesures différentielles rapportées à une surface de référence située à 1.000 m de profondeur; celles du N. O. « Jean Charcot » et du N. O. « Capricorne » sont rapportées à 500 m de profondeur; en revanche les mesures du N. O. « Professor Albrecht Penck » sont rapportées à une surface de référence située à 215 m de profondeur seulement (SCHEMAINDA, 1967) et il semble qu'à cette profondeur d'après les autres données, le flux zonal soit d'au moins 20 cm/s (vers l'est).

La vitesse du Courant Équatorial Sud semble assez variable à l'équateur (tabl. 3; fig. 6) et son épaisseur est parfois très faible. Sa vitesse paraît plus élevée à la fin du printemps et à la fin de l'automne. Le Sous Courant Équatorial semble varier plus régulièrement; les plus fortes intensités sont observées au printemps (près de 100 cm/s) et les plus faibles en été et en automne (30 cm/s). Les valeurs les plus élevées du gradient vertical de vitesse s'observeraient ainsi en mai-juin (tabl. 3); elles correspondent au début du refroidissement des eaux équatoriales. Cependant à cette époque le

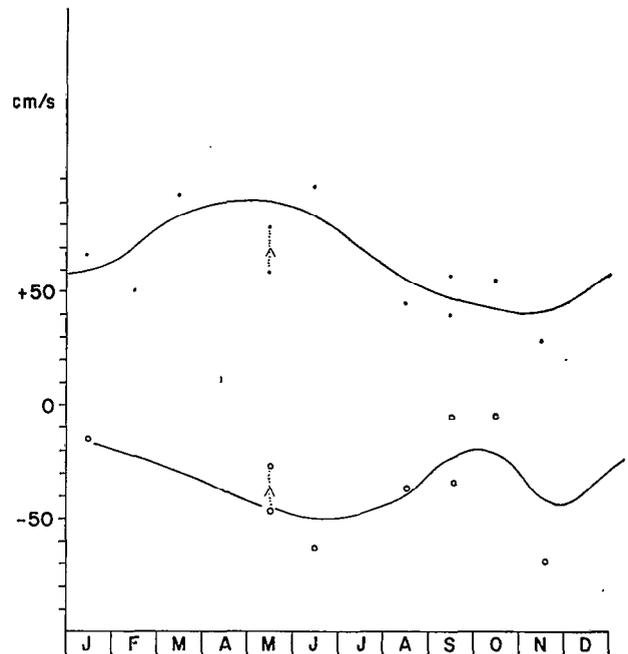


Fig. 6. — Variations au cours de l'année de l'intensité maximum du Sous Courant Équatorial (points noirs) et de l'intensité maximum du Courant Équatorial Sud à l'équateur (points clairs), vers 5° W, d'après les données du tableau 3. (Le déplacement des mesures de mai, d'une valeur de 20 cm/s (données du « Pr. A. Penck ») est justifié par le choix d'une surface de référence trop peu profonde; voir texte).

gradient vertical de densité étant élevé, l'effet des échanges verticaux turbulents devrait être limité. En automne en revanche, la forte atténuation du gradient vertical de densité et l'existence d'un gradient vertical de vitesse encore assez fort pourraient favoriser des échanges verticaux turbulents; c'est à cette saison que l'on observe l'enrichissement maximum en phosphate dans les couches superficielles et la plus forte productivité des eaux équatoriales.

(b) Le rôle de la divergence équatoriale dans la création d'une circulation verticale assurant l'enrichissement des eaux équatoriales ne semble devoir être important qu'en juin-juillet; ce n'est qu'à cette époque en effet, que l'influence des alizés de sud-est se fait sentir à l'équateur (fig. 7); la composante sud est parfois très importante ce qui tend à déplacer au sud de l'équateur le noyau de vitesse du Sous Courant et l'axe de la divergence équatoriale.

Un effet secondaire de l'intensification de la circulation verticale en été, semble être le ralentissement observé du Sous Courant Équatorial; en effet au printemps, lorsque la divergence équatoriale est la plus faible le Sous Courant Équatorial est le

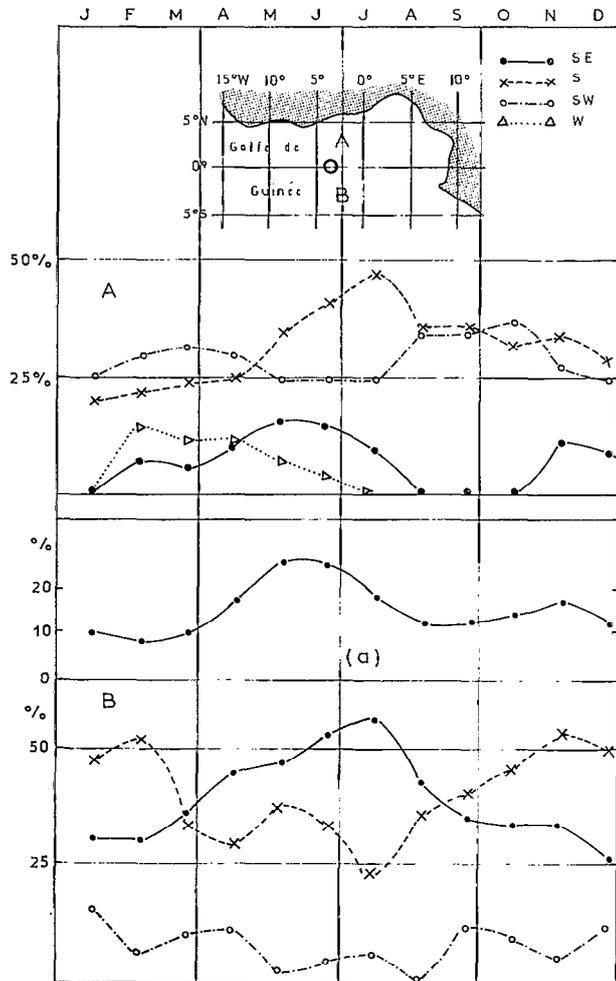


Fig. 7. — Variations annuelles du pourcentage d'observations de vent d'une même direction, dans la zone équatoriale du golfe de Guinée (A : carré Marsden 0011; B : carré Marsden 3001), d'après les roses de vent de Steigner et Ingham, 1971. La courbe (a) représente le pourcentage d'observations de vent de sud-est ayant une intensité supérieure ou égale à 10 nœuds.

plus intense (fig. 5), en revanche, en été, il y a un ralentissement net du Sous Courant; ce phénomène s'il est vérifié ultérieurement pourrait modifier certaines présentations théoriques de la dynamique du Sous Courant Équatorial qui associent étroitement divergence équatoriale et Sous Courant. Rappelons que dans l'océan Pacifique, à 140° W, les effets apparents de la divergence équatoriale étaient plus prononcés en septembre 1961 (température de surface : 23,4 °C) qu'en avril 1958 (température de surface : 27,0 °C) alors que dans le premier cas, le Sous Courant Équatorial avait un débit de deux fois inférieur à celui du mois d'avril (KNAUSS,

1966). Il semble d'ailleurs que l'on puisse déduire de l'ensemble des observations du Sous Courant dans l'océan Pacifique et dans l'océan Atlantique que l'intensité du Sous Courant est inversement proportionnelle à celle du vent d'Est (PHILANDER, 1973); cependant le ralentissement du Sous Courant lorsque les vents d'Est s'intensifient peut n'être dû qu'à l'augmentation du frottement entre le courant Ouest de surface plus développé et le Sous Courant; il se pourrait aussi que la relation « upwelling plus intense - Sous Courant plus faible » mette en cause la dynamique interne du Sous Courant; la connaissance des rapports existants entre l'upwelling équatorial et le Sous Courant Équatorial nécessite encore des investigations plus poussées.

(c) Le ralentissement du Sous Courant Équatorial lors de l'intensification des mécanismes d'enrichissement a été observé en juin 1968 dans le golfe de Guinée. De 10° W à 2° W, lors de la campagne « Guinée 1 » du N. O. « Jean Charcot », la situation hydrologique était stable à l'équateur; elle était caractérisée par un épuisement complet en sels nutritifs de la couche des 50 premiers mètres, une intensité élevée du Sous Courant (proche de 100 cm/s) et une valeur élevée du maximum de salinité subsuperficiel (36,4 ‰) (fig. 5 et 8); en revanche, en reprenant la description des structures équatoriales à 1° W, après un arrêt de 17 jours des observations, un enrichissement important en sels nutritifs (les teneurs en nitrate à 50 m de profondeur croissent de 0 à 5 µatg/l), une diminution de 100 cm/s à 55 cm/s de l'intensité du Sous Courant Équatorial associée à un relèvement de 80 à 50 m de profondeur du noyau de vitesse, une diminution de 36,4 ‰ à 36,1 ‰ de la salinité du noyau maximum subsuperficiel ainsi qu'une baisse de 25 °C à 20 °C de la température à 50 m de profondeur ont été observés (fig. 8). Le champ local de vent ne montrait pas de modifications importantes (vent du 180°; intensité : 12 nœuds, en moyenne), cependant la pression barométrique croissait sensiblement laissant supposer des modifications météorologiques dans une zone plus large. D'après le déplacement vertical des isopycnes entre 2° W et 1° W, nous avons estimé une vitesse verticale vers le haut d'au moins $1,8 \cdot 10^{-3}$ cm/s; MURTY et TAYLOR (1969) ont calculé une vitesse verticale identique, au sein du Sous Courant Équatorial Pacifique à 140° W; PALII (1971) avec un Sous Courant de 73 cm/s à 80 m de profondeur a trouvé une composante verticale de $7,2 \cdot 10^{-3}$ cm/s, à 27°30' W-35° W; à la suite du renforcement de la divergence équatoriale sous l'effet d'une intensification brusque du vent, ROTSCHI et JARRIGE (1968) ont estimé une vitesse verticale de $3 \cdot 10^{-2}$ à $1 \cdot 10^{-2}$ cm/s, à 170° E.

La diminution de l'intensité du Sous Courant

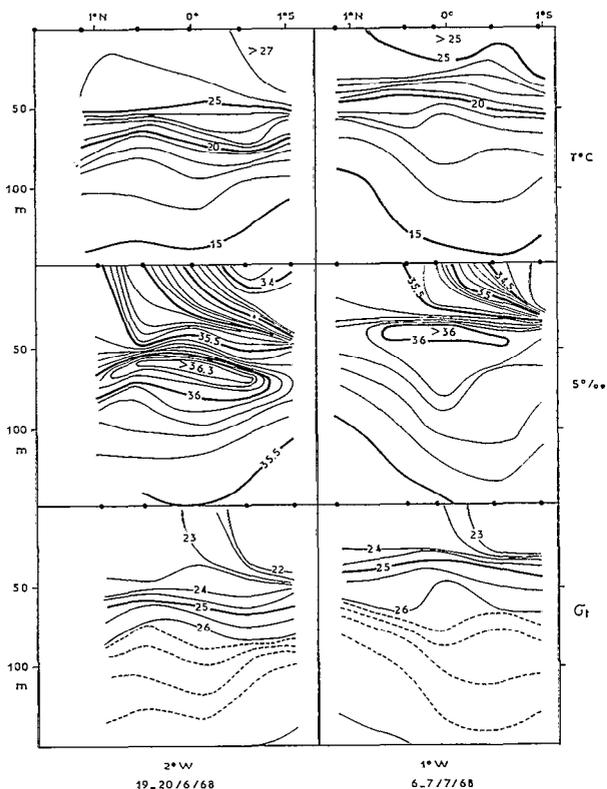


Fig. 8 a. — Distributions verticales à 2° W et à 1° W, entre 1° N et 1° S, de la température, de la salinité et de la densité.

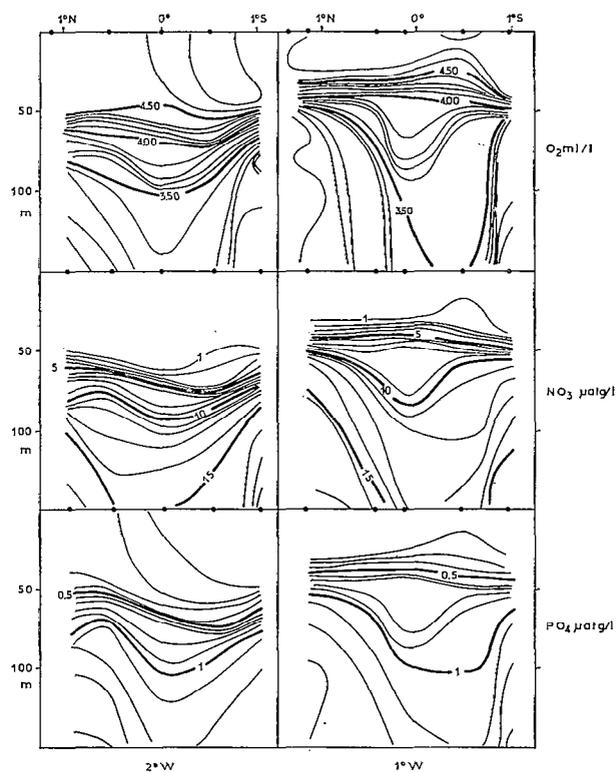


Fig. 8 b. — Distributions verticales à 2° W et à 1° W, entre 1° N et 1° S, de l'oxygène (en ml/l) du nitrate et du phosphate (en µatg/l)

Équatorial Atlantique observée en été, semble encore plus prononcée en automne (30 cm/s en novembre 1971); durant l'été, le déclenchement de la mousson de sud-ouest dans le golfe de Guinée provoque une accumulation d'eau le long des côtes occidentales d'Afrique; le changement de signe du gradient zonal de pression le long de l'équateur qui en résulte contrarie l'extension vers l'Est du Sous Courant et provoque son ralentissement (RINKEL *et al.*, 1966). La variation en longitude le long de l'équateur du point de renverse de la pente zonale se traduit par une variation saisonnière bien exprimée de la hauteur dynamique des surfaces 0 db et 50 db par rapport à la surface 500 db (fig. 9; tabl. 1 et 2); la hauteur dynamique à l'équateur, vers 5° W, est minimum en été, alors qu'au printemps et en automne elle est maximum; la différence de hauteur dynamique au cours de l'année à 5° W peut atteindre 14 cm/dyn.

CONCLUSION.

Les mécanismes d'enrichissement à l'équateur sont le résultat d'une part de la circulation verticale liée à la divergence équatoriale, d'autre part des

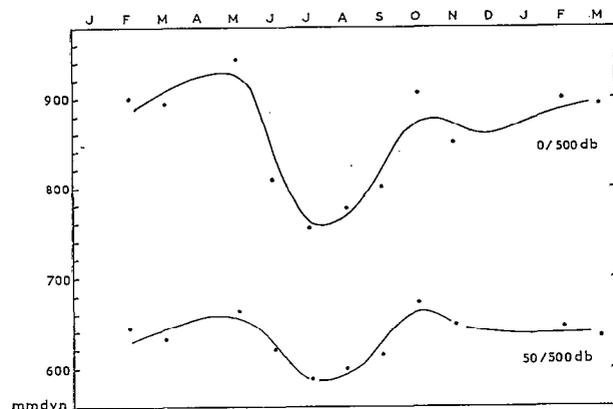


Fig. 9. — Variations annuelles à l'équateur, vers 5° W, de la hauteur dynamique de la surface 0 db et de la surface 50 db par rapport à la surface 500 db, d'après les données moyennées du tableau 1.

échanges verticaux turbulents qui dépendent de la structure du champ de courant et de densité. Dans le golfe de Guinée la circulation verticale paraît intensifiée en été lorsque la composante zonale

des alizés est maximum à l'équateur; en automne en revanche, les échanges verticaux turbulents pourraient être les seuls responsables du maintien de l'enrichissement.

Le rôle du Sous Courant Équatorial dans l'enrichissement équatorial est important; outre qu'il implique l'existence d'un gradient vertical de vitesse élevé pouvant favoriser la turbulence, il assure le transport d'ouest en est d'eaux relativement froides et riches en éléments nutritifs. Le système de courant-contre courant qu'il constitue avec le courant Ouest de surface et le Courant Équatorial Intermédiaire sous-

jaçant (HISARD et RUAL, 1970) conduit à des phénomènes d'enrichissement différentiel du type de ceux décrit par REDFIELD et *al.* (1963) dans les études de circulation d'estuaire. Au printemps cependant, l'existence d'une barrière de densité et l'absence de divergence équatoriale empêchent le développement de mécanismes d'enrichissement efficaces; à cette saison malgré la vitesse élevée du Sous Courant Équatorial, le niveau de production des eaux équatoriales reste proche de celui des eaux tropicales oligotrophes.

Manuscrit reçu au S.C.D. le 22 mars 1973.

BIBLIOGRAPHIE

- BROSIN (H. J.) & NEHRING (D.), 1968. — Der Aquatoriale Unterström im Atlantischen Ozean auf 29°30' W in September und December 1966. *Beitr. zur Meereskunde*, 22 : 5-17.
- CEDIR (K. A.) et LOUTOCHKINA (B. N.), 1971. — Les aspects hydrologiques de la formation de la zone productive équatoriale dans le golfe de Guinée. *Trav. AtlantNIRO XXXVII* : 31-80. (En Russe; traduction Ph. Hisard, centre O.R.S.T.O.M., Abidjan).
- CHMIR (V. D.), 1971. — Production primaire dans l'Atlantique équatorial. *Trav. AtlantNIRO XXXVII* : 175-180. (En russe; traduction Ph. Hisard, centre O.R.S.T.O.M., Abidjan).
- DOUBRAVIN (V. F.), 1970. — Les résultats d'observations des courants dans le golfe de Guinée, d'août à octobre 1965. *Trav. AtlantNIRO XXXVII* : 150-172. (En russe; traduction Ph. Hisard, centre O.R.S.T.O.M., Abidjan).
- GERARD (R.), SEXTON (R.) & MAZEIKA (P.), 1965. — Parachute drogue measurements in the eastern tropical Atlantic in September 1964. *J. Geoph. Res.*, 70 (22) : 5696-5698.
- HISARD (Ph.) et RUAL (P.), 1970. — Courant Equatorial Intermédiaire de l'Océan Pacifique et contre-courants adjacents. *Cah. O.R.S.T.O.M., sér. Océanogr.*, VIII (1) : 21-45.
- KHANAICHENKO (H. K.), KHLYSTOV (N. Z.) & ZHIDKOV (V. G.), 1965. — The system of equatorial countercurrents in the Atlantic Ocean. *Oceanology*, 5 (2) : 24-32 (traduction américaine).
- KNAUSS (J. A.), 1966. — Further measurements and observations on the Cromwell Current. *J. Mar. Res.*, 24 (2) : 205-240.
- KOLESNIKOV (A. G.), BOGUSLAVSKI (S. G.), KUKLIN (G. N.), SHIREY (V. A.) & KIRYOUKIN (V. G.), 1971. — Lomonosov Current in the Gulf of Guinea. *Oceanology*, 11 (3) : 311-315 (traduction américaine).
- LEMASSON (L.), NOËL (J.) et REBERT (J.-P.), 1969. — « Guinée 1 ». Croisière Océanographique du navire « Jean Charcot ». *Trav. Doc. O.R.S.T.O.M.*, 3 : 83.
- LEMASSON (L.) et REBERT (J.-P.), 1973. — Circulation dans la partie orientale de l'Atlantique Sud. *Doc. Scient. C.R.L.*, IV (3) : 91-124.
- MAZEIKA (P.), manuscrit non publié. — Circulation and distribution of physical properties in the Gulf of Guinea during the warm and cold seasons: 11, 78 pl.
- METCALF (W. G.), VOORHIS (A. D.) & STALCUP (M. C.), 1962. — The Atlantic Equatorial Undercurrent. *J. Geoph. Res.*, 67 (6) : 2499-2508.
- MURTY (T. S.) & TAYLOR (J. D.), 1969. — An estimation of the intensity of the upwelling in the Cromwell Current. *J. oceanogr. Soc. Japan*, 25 (4) : 167-171.
- NEUMANN (G.), 1965. — Oceanography of the tropical Atlantic. *Anais Acad. Brasil. Cienc.*, 37 (suppl.) 63-82.
- NEUMANN (G.), 1966. — The Equatorial Undercurrent in the Atlantic Ocean. *Actes symp. oceanogr. ress. halieut. Atlant. trop.*; Abidjan : 33-44.
- PALII (N. F.), 1971. — Sur la divergence et les mouvements verticaux de l'eau, à l'équateur, dans la partie occidentale de l'océan Atlantique d'après les données de stations-bouées. *Trav. AtlantNIRO XXXVII* : 112-116 (en russe; traduction Ph. Hisard, centre O.R.S.T.O.M., Abidjan).
- PHILANDER (S. G. H.), 1973. — The Equatorial Undercurrent : Measurements and theories : 77.

- REDFIELD (A. C.), KETCHUM (B. M.) & RICHARDS (F. A.), 1963. — The influence of organisms on the composition of sea-water. *The Sea*, 2 : 26-77. M. N. Hill, *Edit. Interscience*, N.Y.
- RINKEL (M. O.), SUND (P.) & NEUMANN (G.), 1966. — The location of the termination area of the Equatorial Undercurrent in the gulf of Guinea, based on observations during Equalant III. *J. Geoph. Res.*, 71 (16) : 3893-3901.
- ROTSCHI (H.) et JARRIGE (F.), 1968. — Sur le renforcement d'un upwelling équatorial. *Cah. O.R.S.T.O.M., sér. océanogr.*, VI (3-4) : 87-90.
- SCHEMAINDA (R.), 1965. — Meereskundliche Verhältnisse der Fischereigebeite vor der Westküste Afrikas. *Fischerei Forschung*. 3 (1) : 9-17.
- SCHEMAINDA (R.), 1967. — Das Ozeanographische Beobachtungsmaterial der Tropenexpedition mit dem Forschungsschiff « Professor Albrecht Penck » in dem Golf von Guinea von April bis Juli 1964. *Geod. Geophys. Veroff.* IV (2) : 92.
- STEEMANN-NIELSEN (E.), 1952. — The use of radio-active carbon (C^{14}) for measuring organic production in the sea. *J. cons. perm. expl. mer.*, 18 : 117-140.
- STEIGNER (J. M.) & INGHAM (M. C.), 1971. — Surface winds in the southeastern Tropical Atlantic Ocean. U. S. Dept. *Comm. NOAA, Seattle* : 20.