

06a

Oxygene, phosphate et gaz carbonique total en Mer de Corail

HENRI ROTSCHI

(Received 28 December 1960)

Abstract—In the Coral Sea, the correlations between the apparent oxygen utilization and the inorganic phosphate concentration on one side, the total carbon dioxide concentration on the other side, are significant. The regression curve of total carbon dioxide on apparent oxygen utilization is a straight line; the ratio atom by atom A.O.U./C. is close to 1/1 which is half of the theoretical value. The regression of inorganic phosphate on A.O.U. does not seem to be best represented by a straight line and the ratio A.O.U./P. which is smaller than 180/1 varies with depth. A possible explanation of this anomaly is found in a slight difference between the composition of the oxidizable organic matter and that of the basic molecule of carbohydrate which is considered to be the first step in the photosynthetic process; for instance the percentage of hydrogen could be smaller and the phosphorus concentration at 1000 m triple of that near the surface. Further computations show that the equatorial waters of the Pacific do not contain any preformed phosphate and that the organic matter which is synthesized in the eastern Pacific must be rich in nitrogen.

INTRODUCTION

CERTAINS des mécanismes intervenant dans la répartition de l'oxygène dissous dans l'eau de mer jouent également un rôle en ce qui concerne d'autres éléments, et en particulier les sels nutritifs tels que le phosphate, le nitrate et le gaz carbonique total. RICHARDS (1957a), passant en revue les différents modes d'enrichissement et d'appauvrissement de l'eau de mer en oxygène, rappelle que parmi les premiers on trouve essentiellement l'absorption d'air à travers la surface de la mer et la photosynthèse; les seconds comprennent le dégagement d'air dans l'atmosphère, la respiration animale et végétale et l'oxydation bactérienne, chimique et enzymatique. C'est la circulation des masses d'eau qui, accompagnée de diffusions turbulentes verticales et horizontales, assure ensuite la répartition de ce gaz dans les différentes couches de la mer. Seules la photosynthèse, la respiration et les différentes oxydations agissent sur les teneurs en sels nutritifs et l'étude des modifications de celles-ci doit nous permettre dans certains cas de jeter quelque lumière sur celles-là.

Lorsque l'on cherche à relier la concentration en oxygène dissous à celle des principaux sels nutritifs, l'on fait appel de préférence à ce que REDFIELD (1942) appelle l'utilisation apparente de l'oxygène (U.A.O.) qui représente la différence entre la teneur à saturation et la teneur réelle. L'on admet que, sous la profondeur de compensation que l'on définit comme le niveau à partir duquel la consommation par oxydation et respiration excède la production photosynthétique, le déficit en oxygène est essentiellement dû aux mécanismes d'oxydation de la matière organique. Ces derniers, qu'ils soient des processus bactériens, chimiques ou enzymatiques, conduisent à la mise en solution, sous forme de sels minéraux, des éléments les plus abondants entrant dans la constitution des molécules du protoplasme; c'est ainsi que, sous la couche euphotique, se régénèrent les sels nutritifs utilisés par la photosynthèse dans les couches supérieures de la mer. Ces remises en solution étant aux différentes oxydations ce que l'extraction de ces mêmes sels est à la photosynthèse, il doit exister

O. R. S. T. O. M.

Collection de Référence

n° 1571

30 MAI 1967

une corrélation significative entre les quantités d'oxygène consommé ou produit et de sels nutritifs recréés ou extraits. Comme la couche euphotique peut être le siège d'échanges assez importants avec l'atmosphère, ce qui modifie totalement la répartition de l'oxygène, de telles corrélations, si elles existent, seront beaucoup plus nettes aux profondeurs supérieures à celle de compensation, à partir du niveau où le déficit en oxygène est positif.

De nombreux auteurs ont abordé le problème sous cet angle et ont obtenu des rapports entre les concentrations des atomes de carbone, phosphore, azote et oxygène, dans l'eau de mer et dans les organismes vivants, qui, s'ils diffèrent légèrement selon les chercheurs ou le matériel étudié, n'en prouvent pas moins l'existence de liaisons statistiquement significatives. RICHARDS et VACCARO (1956) et RICHARDS (1957a; 1957b) ont fait la synthèse de nos connaissances actuelles en ce domaine. Il ne semble pas inutile, pour éclairer ce qui va suivre, de reprendre succinctement l'essentiel de ces données.

C'est REDFIELD (1934) qui a publié les premiers résultats des analyses globales du plancton et des déterminations du rapport qui lie dans l'eau de mer l'oxygène consommé au phosphore, azote et gaz carbonique remis en solution; le rapport atome à atome O/C/N/P y était égal à 239/140/20/1*. Ces chiffres sont quelque peu anormaux; en effet la réaction de base de la synthèse des hydrates de carbone implique la fixation d'une molécule de gaz carbonique par molécule d'oxygène libéré; le rapport O/C devrait être théoriquement égal à 2/1; c'est ce qu'ont montré SARGENT et HINDMAN (1943) dans l'étude in vitro de la période photosynthétique active où le nombre de molécules de CO₂ absorbé et d'oxygène produit est sensiblement le même; d'autre part, comme GILSON (1937) l'a fait remarquer, il faut tenir compte de l'oxygène nécessaire à l'oxydation des composés nitrés, ce qui pourrait augmenter le rapport O/C de 20% environ; enfin, il faut corriger les valeurs de la teneur en phosphate de l'effet de sel dont REDFIELD n'avait pas tenu compte (COOPER 1938). Toutes les remarques précédentes conduisent à une composition du plancton telle que C/N/P est égal à 105/15/1 et que U.A.O./C/N/P devient 210/105/15/1 si l'on ne tient pas compte de l'oxygène nécessaire à l'oxydation des composés nitrés et 270/105/15/1 si l'on en tient compte. Les analyses d'eau de mer de REDFIELD ont donné un rapport U.A.O./N/P égal à 180/15/1; il est très différent du rapport théorique puisqu'on y constate un déficit de près de 90 atomes d'oxygène.

FLEMING (1940) analysant du plancton du Pacifique a trouvé 106/16/1 pour C/N/P, d'où l'on tire U.A.O./C/N/P égal à 212/106/16/1 si l'on ne tient pas compte de l'oxydation de l'azote et à 276/106/16/1 si l'on en tient compte (SVERDRUP 1942).

Enfin, RICHARDS et VACCARO ont mesuré que dans les eaux anaérobies de la fosse Cariaco U.A.O./N/P est égal à 235/15/1, cependant que RILEY (1951) a montré qu'en Atlantique il varie avec la profondeur, qu'il est grand au voisinage de la couche du minimum et qu'il atteint une valeur de 255/1 pour σ_t supérieur à 26,5.

En mer de Corail, les études préliminaires de ROTSCHI (1959) ont indiqué que, pour deux croisières du navire de recherche *Orsom III*, les rapports U.A.O./P obtenus étaient respectivement 186/1 et 152/1, les rapports U.A.O./C étant voisins de 1/1. Le déficit en oxygène consommé ainsi révélé est énorme. Néanmoins, une étude plus poussée des résultats de trois croisières (1960a) a confirmé les chiffres obtenus,

*Le symbole 0 représente ici l'oxygène consommé. Dans tout ce qui va suivre on utilisera U.A.O. pour désigner cette quantité.

tout en montrant qu'en zone équatoriale de l'Océan Pacifique U.A.O./P était significativement plus élevé qu'en mer de Corail, mais assez éloigné cependant de la valeur théorique maximum évoquée ci-dessus. Enfin, des croisières ultérieures de l'*Orsom III* (1960b) ont fourni des preuves supplémentaires de la différence fondamentale qui existe entre les eaux de la mer de Corail et celles de l'Atlantique puisque la croisière 'Choiseul' a révélé entre 20°S et 27°S le rapport U.A.O./P le plus bas qui ait été jamais mesuré, égal à 126/1 alors que dans toute la zone explorée U.A.O./C reste également très petit.

Tous ces chiffres ne s'intégrant qu'avec difficulté dans le schéma admis, il a paru utile et nécessaire de faire, à la lumière des nombreuses recherches entreprises au cours des dernières années et qui sont susceptibles de fournir d'excellents repères, le point exact des résultats acquis jusqu'à présent.

METHODES ANALYTIQUES

Les méthodes analytiques employées seront décrites succinctement, dans le but essentiel de donner les niveaux de précision atteints au cours des analyses.

La concentration en oxygène est généralement déterminée à bord, par la méthode de WINKLER sur deux échantillons de 100 cc, l'empois d'amidon étant l'indicateur; on a montré (ROTSCHI *et al.*, 1960) que la précision des analyses, au niveau de probabilité 0,05, était $\pm 0,07$ cc/l, ce qui est très proche des estimations de STRICKLAND (1958). L'utilisation apparente de l'oxygène a été calculée à partir de l'abaque établi par RICHARDS et CORWIN (1956) qui tient compte des récentes déterminations de la solubilité de l'oxygène dans l'eau de mer par TRUESDALE, DOWNING et LOWDEN (1955).

La teneur en phosphate est évaluée par la méthode bien connue de WOOSTER et RAKESTRAW dont la précision statistique au niveau 0,05, dans le mode opératoire adopté à bord de l'*Orsom III*, est $\pm 0,08$ μ at-g/l (ROTSCHI 1960c).

La concentration en gaz carbonique total a été calculée à partir des mesures de pH et d'alcalinité totale faites à l'aide d'un pH mètre Beckman modèle G; on détermine celle-ci par la méthode d'ANDERSON et ROBINSON (1946). Les calculs de concentration sont faits d'après le mode opératoire préconisé par HARVEY (1957) ou mieux par STRICKLAND (1958) qui a utilisé la nouvelle valeur de la seconde constante de dissociation de l'acide carbonique déterminée par LYMAN (1957). Des évaluations de STRICKLAND, il apparaît que la précision des déterminations de la teneur en gaz carbonique est de l'ordre de 1% soit $\pm 0,02$ mmole/l.

CORRELATIONS EN MER DE CORAIL

Les résultats que nous allons discuter ici portent sur quatre croisières que l'*Orsom III* a effectuées de 1958 à 1960 dans le nord-est de la mer de Corail et le nord de la mer de Tasman, Fig. 1. Il s'agit des croisières 'Astrolabe' de Mai-Juin 1958, 'Boussole' de Novembre 1958, 'Choiseul' de Mai 1959 et 'Dillon' de Mai 1960, au cours desquelles les études ont porté jusqu'à la masse Antarctique intermédiaire vers 1000 m de profondeur. Pour chacune d'elle on a calculé la corrélation entre l'utilisation apparente de l'oxygène et la concentration en phosphate d'une part, la teneur en gaz carbonique d'autre part, la première propriété étant prise comme variable indépendante.

Le Tableau 1 où N est le nombre de couples utilisés pour les calculs, r le coefficient de corrélation obtenu, $b_{y/x}$ le coefficient de régression de $\text{PO}_4\text{-P}$ (exprimé en $\mu\text{at-g/l}$) en U.A.O. (exprimé en cc/l) et U.A.O./P le rapport par atomes de ces deux variables donne l'essentiel des résultats des calculs statistiques.

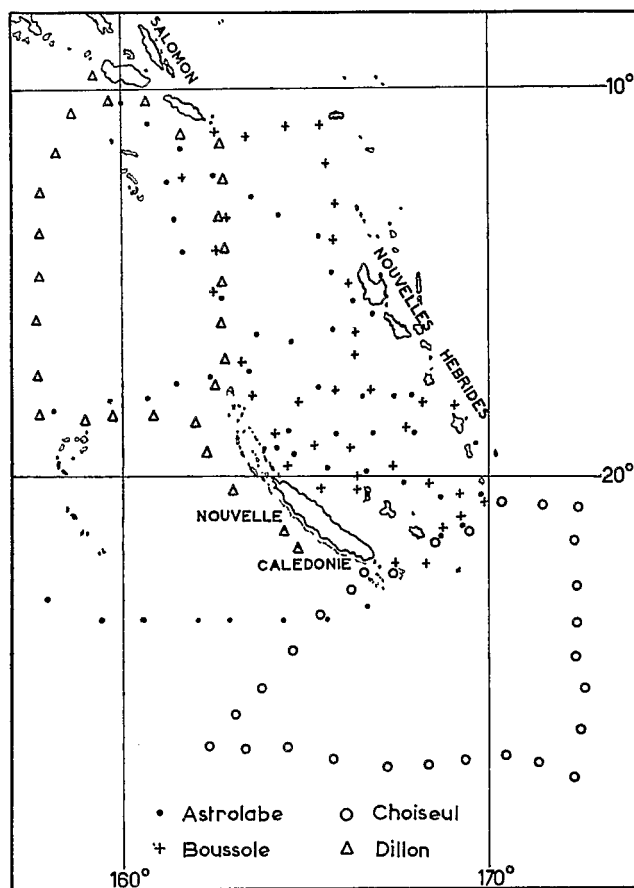


Fig. 1. Croisières 'Astrolabe,' 'Boussole,' 'Choiseul' et 'Dillon' de l'*Orsom III*.

Tableau 1. *Corrélations globales oxygène - phosphate*

	N	r	$b_{y/x}$	U.A.O./P.
Astrolabe	384	0,903	0,479	186/1
Boussole	283	0,959	0,586	152/1
Choiseul	236	0,969	0,710	126/1
Dillon	131	0,966	0,664	135/1

Les corrélations obtenues sont toutes statistiquement significatives; néanmoins, si les coefficients de corrélation des trois dernières croisières sont sensiblement les mêmes, celui de la première en diffère quelque peu. On rencontre également une

caractéristique de cet ordre en zone équatoriale du Pacifique et il est possible de lui attribuer une signification saisonnière (ROTSCHI 1960a).

Le calcul montre que les quatre coefficients de régression sont hautement significatifs; leurs différences le sont également. Nous obtenons donc plusieurs valeurs du rapport U.A.O./P dont chacune est aussi représentative que les autres de la relation qui existe entre ces deux variables, et qui sont toutes basses.

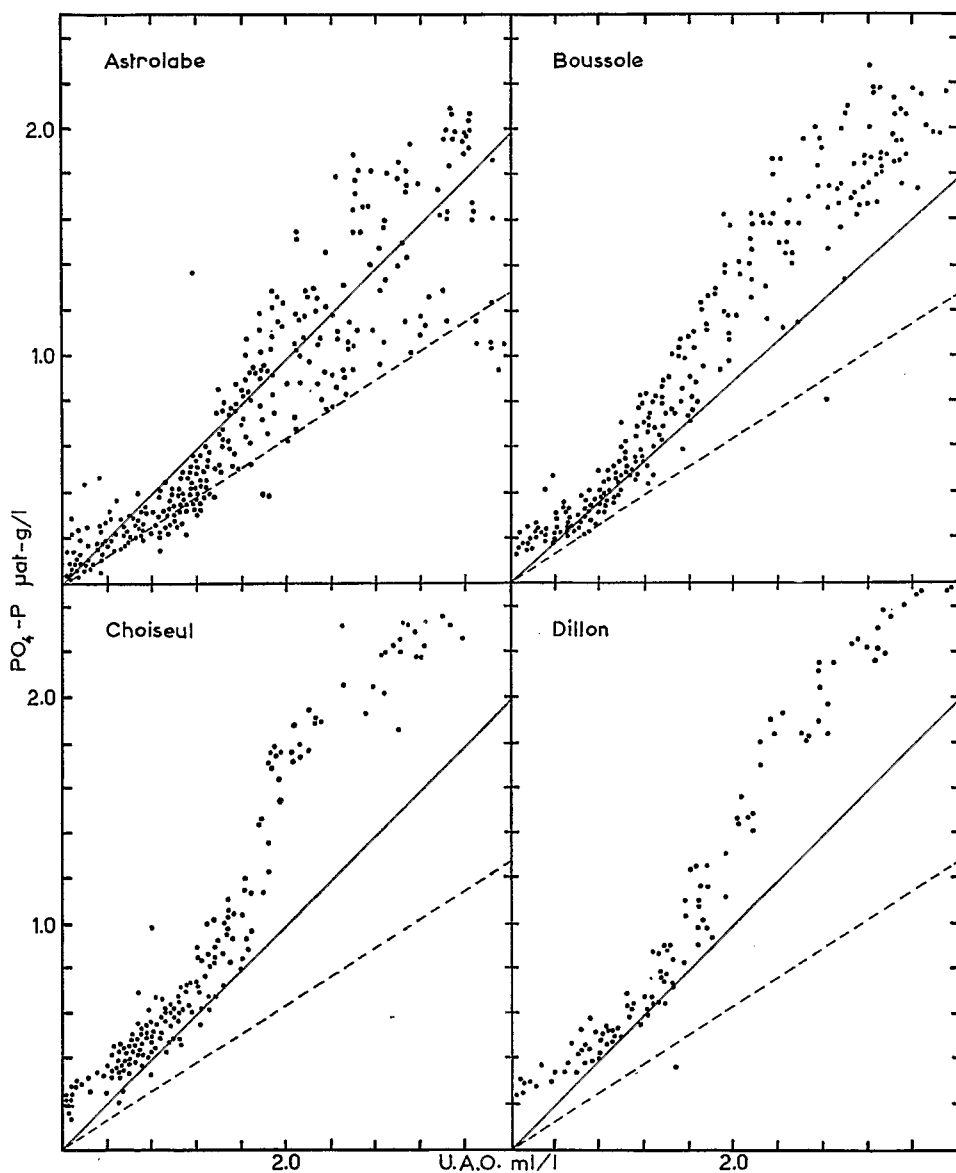


Fig. 2. Diagrammes de dispersion U.A.O. - PO_4-P des quatre croisières de l'*Orsom III*. Equivalence selon REDFIELD; Equivalence selon SVERDRUP.

Cependant, les diagrammes de dispersion de ces quatre croisières, Fig. 2, indiquent que les utilisations apparentes de l'oxygène les plus faibles, inférieures à 1,20 cc/l environ, peuvent être liées à la concentration en phosphate par une corrélation différente de celle qui est applicable aux U.A.O. plus élevées; la même remarque s'applique, surtout pour les trois dernières croisières, avec 2,00 cc/l comme limite de U.A.O.

Les corrélations obtenues en tenant compte de ces groupements possibles sont toutes significatives. Mais les coefficients de régression, donc les rapports U.A.O./P varient beaucoup d'un groupement à l'autre, sans qu'il soit possible de décider laquelle de ces analyses est biochimiquement plus représentative, même si leurs significations statistiques sont légèrement différentes.

Il existe d'ailleurs une autre interprétation de ces corrélations. Elle apparaît figures 3 et 4 dans lesquelles les diagrammes de dispersion des croisières 'Astrolabe' et 'Choiseul' ont été construits en coordonnées semi-logarithmiques. On y remarque en effet deux groupements quasi-linéaires, la rupture de pente se produisant pour une valeur de U.A.O. voisine de 2,00 cc/l. Les deux autres croisières donnent des diagrammes similaires.

Le Tableau 2 résume les résultats des calculs de régression en coordonnées semi-logarithmiques pour les valeurs de U.A.O. inférieures à 2,00 cc/l d'une part et supérieures à 2,00 cc/l d'autre part.

Tableau 2. *Corrélations oxygène - phosphate en coordonnées semi-logarithmiques*

	Astrolabe		Boussole		Choiseul		Dillon*	
	U.A.O. < 2,00	U.A.O. > 2,00	U.A.O. < 2,00	U.A.O. > 2,00	U.A.O. < 2,00	U.A.O. > 2,00	U.A.O. < 2,00	U.A.O. > 2,00
<i>N</i>	264	118	194	88	196	40	87	44
<i>r</i>	0,915	0,538	0,951	0,662	0,948	0,601	0,943	0,853
<i>b_{y x}</i>	1,290	0,282	1,109	0,236	0,982	0,291	0,807	0,360

*La rupture de pente pour cette croisière se produit pour une valeur de U.A.O. plus proche de 2,20 cc/l que de 2,00 cc/l. Si c'est cette valeur que l'on prend comme limite de groupement les *r* deviennent respectivement 0,952 au lieu de 0,943 et 0,818 au lieu de 0,853; les *b* donnent 0,802 et 0,299 au lieu de 0,807 et 0,360.

Du point de vue statistique, ces corrélations sont plus significatives que celles rencontrées en coordonnées arithmétiques pour les données groupées de la même manière, au moins en ce qui concerne les déficits en oxygène inférieurs à 2,00 cc/l. Par contre, il n'y a pas de différence entre elles et les corrélations globales; tout au plus pourrait-on démontrer que des régressions linéaires sont plus représentatives des dispersions en coordonnées semi-logarithmiques qu'en coordonnées arithmétiques. Mais la rupture de pente au niveau de U.A.O. 2,00 cc/l est frappante puisque pour les quatre croisières la pente de la droite de régression pour les plus petites valeurs de U.A.O. est 2 à 4 fois plus grande que celle trouvée pour les valeurs plus élevées.

Rappelons qu'en mer de Corail l'utilisation apparente de l'oxygène se comporte comme une propriété conservative et que la relation U.A.O. - T° C, spécifique des masses d'eau de cette mer, est représentée par deux droites, la rupture de pente se produisant au niveau thermique de 6° C correspondant à une U.A.O. de 2,00 cc/l (ROTSCHI 1960b).

Le problème de la liaison entre l'oxygène et le gaz carbonique total est beaucoup plus simple. On trouvera Fig. 5 le diagramme de dispersion de la teneur en CO_2 total en fonction de U.A.O. pour les quatre croisières précitées. L'arrangement est linéaire, la dispersion des points autour de la droite moyenne de régression variant selon la croisière. C'est ce qui apparaît dans le Tableau 3 qui présente le sommaire des calculs de régressions du gaz carbonique total (exprimé en millimole par litre) en U.A.O. (exprimé en cc/l) entrepris sur les données de ces croisières.

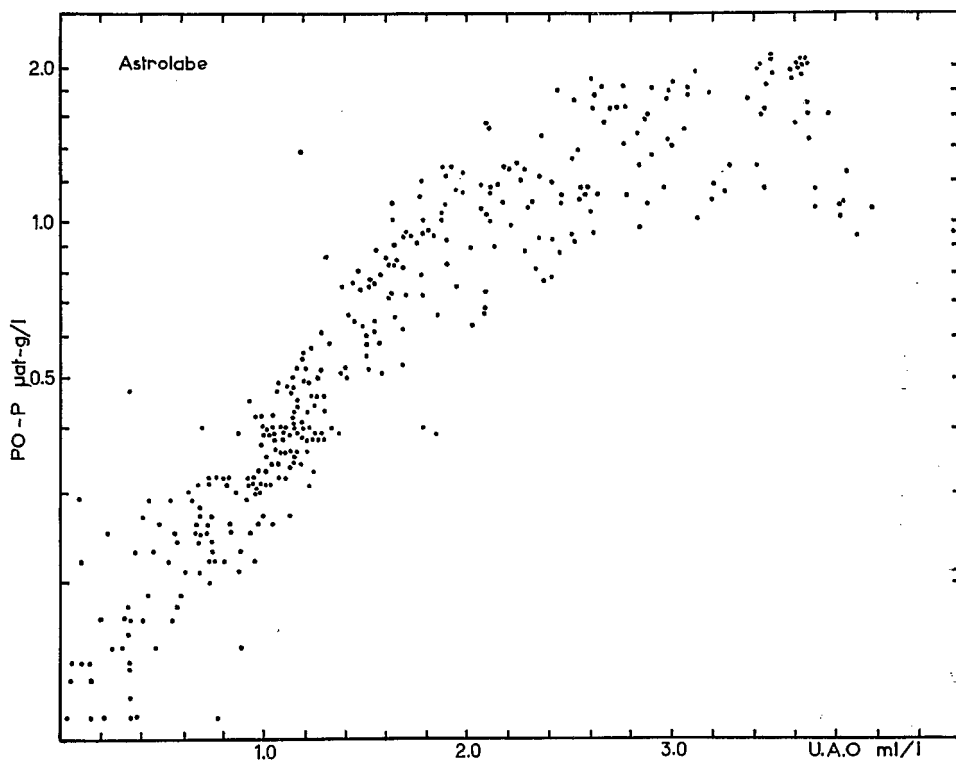


Fig. 3. Diagramme de dispersion U.A.O. - $\log \text{PO}_4\text{-P}$ pour la croisière 'Astrolabe.'

Tableau 3. Corrélations oxygène - gaz carbonique total

	<i>N</i>	<i>r</i>	$b_{y/x}$	U.A.O./C.
Astrolabe	386	0,847	0,075	1,2/1
Boussole	278	0,942	0,075	1,2/1
Choiseul	234	0,913	0,078	1,1/1
Dillon	193	0,939	0,079	1,1/1

Les corrélations sont significatives; mais contrairement à ce que l'on a trouvé en ce qui concerne le phosphate, la régression est sensiblement la même pour les quatre croisières puisque les coefficients ne sont pas significativement différents. Le rapport par atome du carbone produit et de l'oxygène consommé est le même,

très voisin de 1/1. Pour le carbone comme pour le phosphate inorganique, il existe une différence notable entre le rapport théorique 2/1 avec l'U.A.O. et le rapport réel.

CORRELATIONS DANS D'AUTRES PARTIES DE L'OCEAN

On a analysé de la même manière divers résultats provenant tant de l'Atlantique que du Pacifique. Il s'agit, pour ceux-ci, des croisières 5, 8, 11, 31, 35 et 38 du *H.M. Smith*, faites en zone équatoriale du Pacifique (CROMWELL et AUSTIN 1954, KING, AUSTIN et DOTY 1957, AUSTIN 1957, WILSON et RINKEL 1957), des stations au sud de l'équateur de la croisière 'Equapac' du R.V. *Stranger* (AN. S.I.O. 1957) également en zone équatoriale mais plus à l'ouest, des croisières C.C.O.F.I. 4904, 4905, 4907 de l'*Horizon*, du *Crest* et du *N.B. Scofield* (RAKESTRAW, HERRER et WOOSTER 1957) dans le Pacifique nord, le long de la côte californienne.

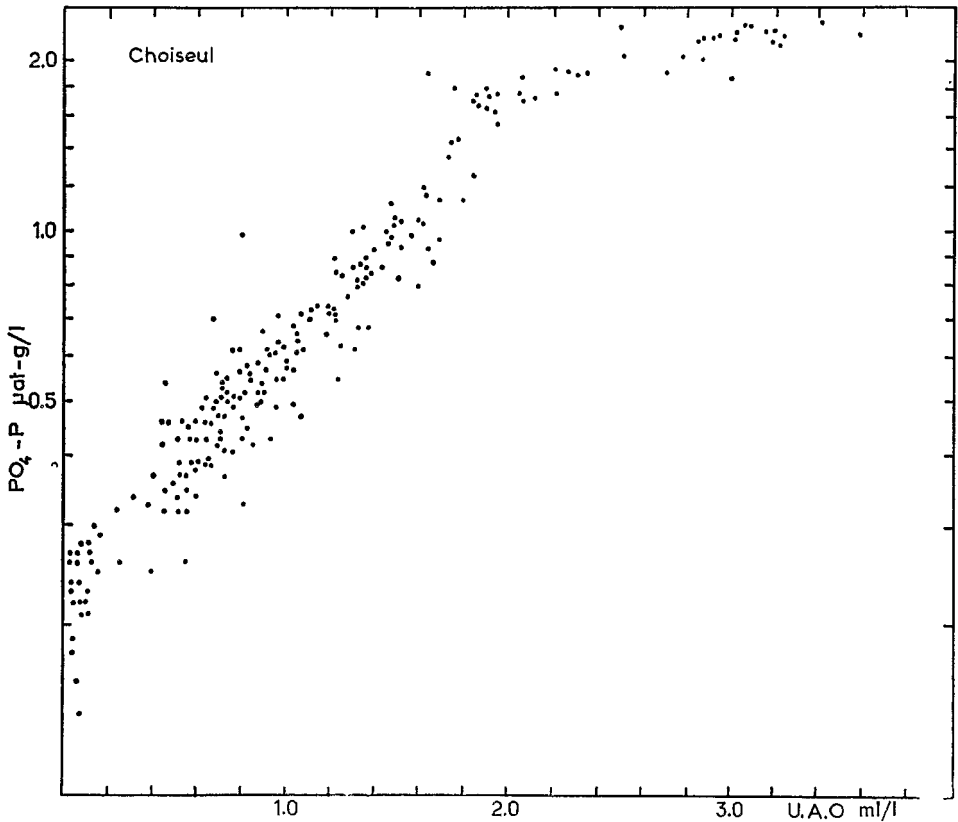


FIG. 4. Diagramme de dispersion U.A.O. - log PO₄-P pour la croisière Choiseul.'

En ce qui concerne l'Atlantique, on a pris les données de la croisière 16 du *Crawford* (METCALF 1958) sur la transversale le long de 40°N, à l'est de 41°W, de la croisière 22 du même navire (METCALF 1960) sur la transversale le long de 24°S et de la croisière

2 du *Discovery* (WORTHINGTON 1958). Malheureusement, la distribution du gaz carbonique n'ayant pas été déterminée, les études entreprises sur les résultats de ces croisières ont dû être limitées à la relation entre l'oxygène et le phosphate.

Le Tableau 4 résume l'ensemble des calculs exécutés.

Tableau 4. *Corrélations oxygène – phosphore dans le Pacifique et en Atlantique*

		<i>N</i>	<i>r</i>	$b_{y/x}$	U.A.O./P.
Pacifique équatorial et tropical	<i>H.M. Smith</i> 5	358	0,946	0,437	205/1
	<i>H.M. Smith</i> 8	229	0,918	0,429	208/1
	<i>H.M. Smith</i> 11	167	0,944	0,383	233/1
	<i>H.M. Smith</i> 31	122	0,866	0,272	328/1
	<i>H.M. Smith</i> 35	705	0,882	0,414	215/1
	<i>H.M. Smith</i> 38	409	0,843	0,379	236/1
	<i>Stranger</i>	143	0,954	0,483	185/1
Pacifique nord	C.C.O.F.I. 4904	349	0,982	0,401	222/1
	C.C.O.F.I. 4905	743	0,981	0,445	200/1
	C.C.O.F.I. 4907	557	0,951	0,406	220/1
Atlantique	<i>Crawford</i> 22	852	0,969	0,623	143/1
	<i>Discovery</i> II-2*	631	0,980	0,525	170/1
	<i>Crawford</i> 16*	148	0,938	0,427	209/1

*Le calcul n'englobe que les valeurs de U.A.O. jusqu'au premier maximum.

Toutes les corrélations obtenues sont hautement significatives et les régressions linéaires. Néanmoins, les croisières du *H.M. Smith* donnent des coefficients de corrélation différents bien qu'elles se soient déroulées à des latitudes similaires, entre 20°N et 20°S; la dispersion autour de la droite de régression paraissant beaucoup plus grande à l'est qu'à l'ouest, on pourrait en conclure qu'un facteur géographique lié au régime des courants équatoriaux intervient. Un tel mécanisme apparaît avec une grande netteté lorsque l'on suit l'évolution du coefficient de régression, ou mieux du rapport U.A.O./P, en fonction de la longitude; l'on constate que la plus faible valeur est celle de la croisière du *Stranger* qui s'est déroulée entre 165° et 175°W, la plus forte étant fournie par la croisière la plus orientale du *H.M. Smith*.

Tableau 5. *Rapport U.A.O./P en fonction de la longitude*

Croisière	<i>Stranger</i>	<i>H.M.S.</i> 8	<i>H.M.S.</i> 5	<i>H.M.S.</i> 35	<i>H.M.S.</i> 11	<i>H.M.S.</i> 38	<i>H.M.S.</i> 31
Longitude	165-175°W	173°W	158-173°W	135-160°W	150°W	110-150°W	110-140°W
U.A.O./P	185/1	208/1	205/1	215/1	233/1	236/1	328/1

Le Tableau 5 montre clairement que le rapport U.A.O./P tend à diminuer de l'est vers l'ouest, c'est à dire, en zone équatoriale, dans le sens des courants équatoriaux nord et sud.

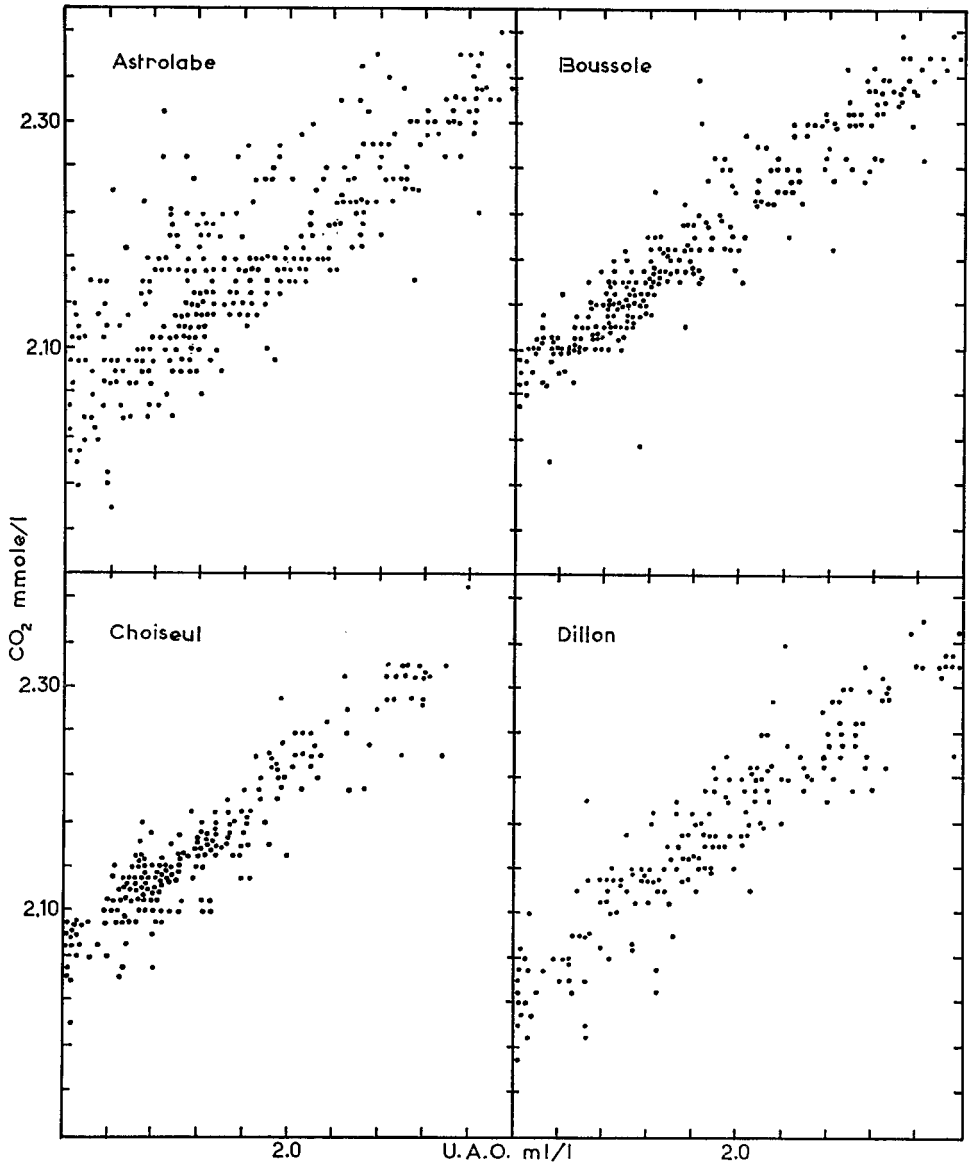


Fig. 5. Diagrammes de dispersion U.A.O. - CO₂ total des quatre croisières de l'*Orsom III*.

Par contre, une étude détaillée des résultats de la croisière 35 qui a traversé cinq masses d'eau différentes montre qu'il n'est pas possible de dégager une relation nette entre la nature de ces masses et celle de la distribution relative de l'oxygène et du phosphate.

Enfin, les observations aux stations 22-34 de la croisière du *Stranger* situées au sud de l'équateur, dans la masse appelée Pacifique équatorial (SVERDRUP 1942), et qui fournissent le rapport U.A.O./P le plus proche de celui des croisières de l'*Orsom III*, ne semblent pas devoir être mieux interprétées par une courbe de régression exponentielle que par une droite.

Les eaux du Pacifique nord le long de la côte californienne donnent, tout au moins pour les croisières C.C.O.F.I. dont les résultats ont été analysés, des corrélations très significatives, les régressions étant linéaires. Les rapports U.A.O./P calculés sont très semblables; d'Avril, croisière 4904 à Juillet croisière 4907, on ne note aucune différence.

Pour ce qui est des eaux de l'Atlantique, les corrélations obtenues sont également bonnes; cependant, pour les deux croisières en Atlantique nord, *Crawford 16* et *Discovery II*, les calculs ont dû être limités aux U.A.O. comprises entre zéro et le premier maximum, seules les stations à l'est de 41°W étant utilisées dans la première deux; les valeurs de U.A.O./P ne sont donc représentatives de la distribution de ces deux variables que jusque vers 900 m environ. La croisière *Crawford 22* étant la plus méridionale et la 16 la plus septentrionale on voit que ce rapport qui est bas au sud de l'équateur augmente vers le nord tout en restant relativement petit.

IMPLICATIONS BIOCHIMIQUES

En mer de Corail, les eaux que l'on rencontre sous la couche euphotique et jusqu'à mille mètres de profondeur ont donc des propriétés biochimiques totalement différentes de celles que l'on peut déduire de considérations théoriques basées sur les seules réactions accompagnant la photosynthèse ou l'oxydation.

Dans la mesure où le déficit en oxygène est une évaluation de la quantité d'oxygène consommé, celle-ci ne représente que 50 pour cent environ de ce qu'elle devrait être; en effet, les rapports U.A.O./P globaux sont compris entre 186/1 et 126/1 au lieu de 270/1 et les rapports U.A.O./C sont très proches de 1/1 au lieu de 2/1.

D'autre part, si la quantité de phosphore produit est une fonction exponentielle de U.A.O. pour les valeurs de cette variable inférieures à 2,00 cc/1, le rapport U.A.O./P de chaque niveau décroît avec la profondeur ou, ce qui revient au même, avec la quantité de phosphore déjà produit; il passe en effet d'une valeur proche de 300/1 pour U.A.O. voisine de zéro à une valeur peu différente de 100/1 pour U.A.O. égale à 2,00 cc/1.

Deux explications au moins de ces caractéristiques sont possibles. En premier lieu, l'on peut admettre soit que le rapport théorique calculé par SVERDRUP (1942) est exact et traduit l'ensemble des mécanismes biochimiques, soit que c'est le postulat de REDFIELD qui est vrai. Dans le premier cas l'équivalence est $1 \text{ cc } O_2 = 0,324 \mu\text{at-g } PO_4\text{-P}$; dans le second, elle est, compte tenu de l'effet de sel, $1 \text{ cc } O_2 = 0,496 \mu\text{at-g } PO_4\text{-P}$ au lieu de 0,373 valeur utilisée par REDFIELD. Les droites représentant ces équivalences sont tracées sur les diagrammes de dispersion de la Fig. 2. La première indique que dans l'ensemble la teneur en phosphate préformé augmenterait avec la profondeur, la croisière 'Astrolabe' donnant seule quelques valeurs négatives

de cette caractéristique; la seconde indique que, pour les U.A.O. faibles, la quantité de phosphate préformé diminuerait d'abord pour augmenter ensuite, des chiffres négatifs étant trouvés en grand nombre dans la croisière 'Astrolabe', en nombre plus réduit dans les autres et seulement pour des U.A.O. inférieures à 2,00 cc/l. Toutes deux permettent également de penser que si, dans la couche de transition limitée par le maximum et le minimum de salinité, la quantité de phosphate préformé augmente avec le déficit en oxygène, la loi de variation peut aussi bien être linéaire qu'exponentielle; elle serait par contre différente dans la masse Antarctique intermédiaire qui est, rappelons-le, liée à une U.A.O. supérieure à 2,00 cc/l, le phosphore préformé étant par exemple présent en quantité constante; celui-ci varierait alors selon une loi que ne serait qu'une traduction chimique des mécanismes de mélange conduisant à la formation de cette couche de transition.

Cependant, cette hypothèse en entraîne une autre en ce qui concerne le gaz carbonique : la quantité de carbone inorganique 'préformé' qui est de l'ordre de 2,00 mmole/l de gaz carbonique total, augmente avec la profondeur, cette variation étant une fonction linéaire de U.A.O. Pour l'ensemble des croisières de l'*Orsom III* une augmentation du déficit en oxygène de 4,00 cc/l est accompagnée d'une apparition de CO_2 total d'environ 0,40 mmole/l dont la moitié seulement est imputable à l'oxydation, l'équivalence étant de 1 cc $\text{O}_2 = 0,045$ mmole CO_2 . La masse Antarctique intermédiaire ne se distingue pas ici de la couche de transition.

En résumé, dans cette perspective, les diagrammes de dispersion des Figs. 2 et 5 ne traduisent pas la liaison entre l'oxygène consommé et le phosphore ou le carbone inorganiques produits par les réactions d'oxydation, mais la loi de variation des quantités 'préformées' de ces deux éléments en fonction de U.A.O. qui croît avec la profondeur.

Dans le second cas, on peut admettre au contraire que ces diagrammes donnent effectivement une représentation graphique du rapport entre ce qui disparaît et ce qui apparaît sous la couche euphotique. Ils impliquent, d'une part que la composition de la matière organique qui est oxydée est différente par les rapports par atomes O/C/N/P de celle qu'ont donné les analyses de REDFIELD et FLEMING entre autres, d'autre part que les mécanismes d'oxydation sont sélectifs vis à vis des molécules à oxyder.

Par exemple, le rapport O/C dans la matière organique étant égal à 1/1, C/H pourrait être beaucoup plus grand, ce qui entrainerait une diminution de la consommation d'oxygène et une réduction de U.A.O./P dont la décroissance en fonction de la quantité de phosphore déjà présent serait attribuable soit à une variation de la composition de la matière organique avec la profondeur, soit, ce qui revient au même, à une sélectivité des réactions d'oxydation. Dans chacune de ces deux hypothèses, il est admis en effet que les molécules organiques oxydées les premières dans les couches supérieures de la mer ont une faible teneur en phosphore, les molécules les plus riches étant plus stables, et détruites seulement aux profondeurs plus grandes après un séjour assez long dans l'eau de mer. Un tel mécanisme est possible puisque certains dérivés organiques de l'acide phosphorique sont très facilement hydrolysables; l'oxydation enzymatique et l'oxydation bactérienne pourraient donc jouer alternativement, la seconde attaquant les molécules que la première n'a pas détruites dans les couches supérieures de la mer, la stabilité de la matière organique vis à vis de ces mécanismes de destruction étant directement fonction de sa teneur en phosphore

qui peut tripler de 200 m à 1000 m. Enfin, STRICKLAND (1960) rappelle que le rapport C/P peut varier de 65/1 à 142/1.

CONCLUSION

Cette étude n'aurait eu sa signification complète que s'il avait été possible d'y inclure les résultats de recherches portant : sur d'autres sels nutritifs et en particulier l'azote nitreux et nitrique, sur des eaux plus profondes et sur une gamme plus variée de latitudes; elle aurait pris la forme des recherches exemplaires de REDFIELD (1942) et de RICHARDS et VACCARO (1956). Malheureusement, le Pacifique sud dans son ensemble et la mer de Corail en particulier n'ont pas encore fait l'objet de travaux nombreux; de plus *l'Orsom III*, de par sa taille et son équipement, tout autant que le personnel scientifique embarqué à bord ou disponible à terre, imposent des limites sévères aux travaux qui peuvent être entrepris. Néanmoins, elle conduit à un certain nombre de conclusions qu'il est possible de résumer de la manière suivante.

En zone équatoriale du Pacifique la corrélation entre l'utilisation apparente de l'oxygène et le phosphate est significative et peut être représentée correctement par une droite de régression dont la pente est une fonction de la longitude, le rapport U.A.O./P variant de 328/1 dans le Pacifique oriental à 185/1 au voisinage de 180°.

Plus à l'ouest, en mer de Corail, on atteint des U.A.O./P particulièrement bas, mais qui, pris globalement, ne sont pas très représentatifs; en effet, la courbe de régression jusqu'à U.A.O. 2,00 cc/l pourrait être une fonction exponentielle de cette variable; on obtient une meilleure interprétation du diagramme en admettant que ce rapport varie de 300/1 environ vers la surface à près de 100/1 vers 800 m de profondeur.

Dans tout le centre du Pacifique équatorial U.A.O./P qui varie entre 208/1 et 236/1 reflète assez bien la composition de la matière organique telle qu'elle est définie par SVERDRUP (1942); par contre, le chiffre trouvé pour la croisière la plus orientale semble indiquer la présence d'une quantité relativement importante d'azote dans les produits de photosynthèse du courant de Humbolt et de la partie orientale du courant équatorial sud. Pour ce qui est de la mer de Corail, les chiffres sont nettement inférieurs à ceux de REDFIELD (1934). Cela peut être dû soit à la présence en quantités augmentant avec la profondeur de phosphore préformé, soit à la variation avec la profondeur de la composition de la matière organique tant en solution qu'en suspension. Compte tenu du fait que l'on a déjà rencontré la possibilité d'une variation de composition en zone équatoriale et que le phosphore préformé ne s'est manifesté nulle part, il semble que la seconde hypothèse est meilleure que la première.

Les eaux californiennes donnent une U.A.O. peu différente de celle de SVERDRUP. Par contre, en Atlantique, la variation de ce rapport avec la latitude concorde bien avec l'analyse de REDFIELD; celle-ci indique que la concentration en phosphore préformé qui est relativement importante en Atlantique sud est pratiquement nulle en Atlantique nord.

Les conclusions relatives à la composition de la matière organique en mer de Corail sont confirmées par les valeurs du rapport U.A.O./C qui impliquent soit que la quantité de carbone inorganique préformé augmente avec la profondeur, soit que la composition des produits oxydables n'est pas un reflet exact de celle des hydrates de carbone, mais que le pourcentage d'hydrogène y est plus bas.

En définitive, et bien que les concentrations relatives en U.A.O. phosphore et carbone inorganiques soient explicables par une seule hypothèse lorsque l'on envisage le problème sous l'angle de la nature des produits oxydés et par deux lorsque l'on fait appel aux sels nutritifs préformés, la variété des résultats prouve que ce domaine particulier de la biochimie de l'eau de mer n'a fait que s'entr'ouvrir aux recherches. Il faut orienter maintenant les travaux vers une étude détaillée de la composition de la matière organique en solution et en suspension et de sa répartition conjointement avec une analyse fine des mécanismes de photosynthèse et d'oxydation et des produits intermédiaires qui interviennent dans ce cycle; il faut suivre également de très près les taux de disparition des sels nutritifs dans la couche euphotique. C'est seulement à la lumière de telles études qu'il sera possible de décrire avec quelque certitude certains des maillons essentiels de la chaîne alimentaire dans la mer.

Remerciements—La rédaction de cet article n'aurait pu être entreprise sans le dévouement du personnel tout entier de l'*Orsom III* qui a pris une part non négligeable du travail à la mer et de celui du Centre d'Océanographie qui a participé activement à l'exploitation de tous les résultats scientifiques analysés ici, en particulier de Mmes SOULA et VILLAGEOIS, de Melle TIRELLI et de MM. GARBE et PATTERSON. M. M. LEGAND a contribué à la mise en forme des calculs statistique; le Dr. G. HUMPHREY a apporté le soutien de ses connaissances dans le domaine de la biochimie. Qu'ils soient tous remerciés ici.

BIBLIOGRAPHIE

- ANDERSON, D. H. and ROBINSON, R. J. (1946) Rapid electrometric determination of the alkalinity of sea water using a glass electrode. *Ind. Eng. Chem.*, (Anal. Ed.), **18**, 767.
- ANONYME (1957) Data collected by Scripps Institution Vessels on Equapac Expedition, August, 1956. S.I.O. Ref. 57-25.
- AUSTIN T. S. (1957) Summary, Oceanographic and Fishery Data, Marquesas Islands Area, August-September, 1956 (EQUAPAC). *U.S. Fish and Wildl. Serv., Spec. Sci. Rep. : Fish.* 217.
- COOPER L. H. N. (1938) Salt error in determinations of phosphate in sea-water. Redefinition of the anomaly of the nitrate-phosphate ratio. *J. Mar. Biol. Ass. U.K.*, **23** (1) 171-179.
- CROMWELL T. and AUSTIN T. S. (1954) Mid-Pacific Oceanography. Parts II and III Trans-equatorial waters, 1950-1951. *U.S. Fish and Wildl. Serv., Spec. Sci. Rep. : Fish.* 131.
- FLEMING R. H. (1940) Composition of plankton and units for reporting populations and production. *Proc. Sixth Pac. Sci. Congr.*, **3**, 535-540.
- GILSON H. C. (1937) The nitrogen cycle. John Murray Exped. 1933-34. *Sci. Rep.*, **2** (8), 21-81.
- HARVEY H. W. (1957) *The chemistry and fertility of sea waters*. Cambridge University Press.
- KING J. E., AUSTIN T. S. and DOTY M. S. (1957) Preliminary report on expedition Eastropic. *U.S. Fish and Wildl. Serv., Spec. Sci. Rep. : Fish.* 201.
- LYMAN J. (1957) A new determination of the dissociation constants of carbonic and boric acid in sea water. 12ème Assemblée Générale U.G.G.I. Toronto.
- METCALF W. G. (1958) Oceanographic Data from *Crawford* Cruise 16, 1 Oct.-11 Dec. 1957 for the International Geophysical Year of 1957-58. W. H. O. I. Ref. 58-31.
- METCALF W. G. (1960) Oceanographic Data from *Crawford* Cruise 22, Trans-Atlantic Sections at Equator and 24° South for the International Geophysical Year of 1957-58. W. H. O. I. Ref. 60-3.
- RAKESTRAW N. W., HORRER P. L. and WOOSTER W. S. (1957) *Oceanic observations of the Pacific*, 1949. University of California Press.
- REDFIELD A. C. (1954) On the proportions of organic derivatives in sea water and their relation to the composition of plankton. In: James Johnstone Memorial Volume, University Press, Liverpool, 176-192.
- REDFIELD A. C. (1942) The processes determining the concentration of oxygen, phosphate and other organic derivatives within the depths of the Atlantic Ocean. *Pap. Phys. Oceanogr. Meteor.*, **9** (2), 1-22.
- RICHARDS F. A., VACCARO R. E. (1956) The Cariaco Trench, an anaerobic basin in the Caribbean Sea. *Deep-Sea Res.*, **3** (3), 214-228.

- RICHARDS F. A. and CORWIN N. (1956) Solubility of oxygen in sea water. *Limnol. Oceanogr.* 1 (4), 263-267.
- RICHARDS F. A. (1957a) Oxygen in the Oceans. *Geol. Soc. America Memoir* 67, 1, 185-283.
- RICHARDS F. A. (1957b) *Some current aspects of chemical oceanography. Progress in Physics and Chemistry of the Earth.* Pergamon Press London, 2, 77-128.
- RILEY G. A. (1951) Oxygen, phosphate and nitrate in the Atlantic Ocean. *Bingham Oceanogr. Coll. Bull.*, 13 (1), 1-26.
- ROTSCHI H. (1959) Oxygen, inorganic phosphate and carbon dioxide relationships in the Coral Sea. *1st Int. Oceanogr. Congress*, New York.
- ROTSCHI H. (1960a) Remarques sur la relation entre l'oxygène et le phosphore minéral dissous en mer de Corail. *C. R. Acad. Sc.*, 250, 2403-2405.
- ROTSCHI H. (1960b) Récents progrès des recherches océanographiques entreprises dans le Pacifique sud-ouest. *Cahiers Océanographiques*, 12 (4), 248-267.
- ROTSCHI H. (1960c) Sur la détermination colorimétrique du phosphate. *Cahiers Océanographiques*, 12 (7), 470-481.
- ROTSCHI H., ANGOT M. and DESROSIERES R. (1960) *Orsom III*, Croisière 'Choiseul,' Chimie, Productivité, Phytoplancton. O.R.S.T.O.M., I.F.O., *Rapp. Sc.* no. 16.
- SARGENT M. C. and HINDMAN J. C. (1943) The ratio of carbon dioxide to oxygen evolution in sea water in the light. *J. Mar. Res.*, 5 (2), 131-135.
- STRICKLAND J. D. H. (1958) Standard methods of sea water analyses. *Fish. Res. Board Canada, Manus. Rep. Ser.* 18.
- STRICKLAND J. D. H. (1960) Measuring the production of Marine Phytoplankton. *Fish. Res. Board Canada, Bull.* 122.
- SVERDRUP H. U., JOHNSON M. W. and FLEMING R. H. (1942) *The Oceans*. 707 pp., Prentice Hall, New York.
- TRUESDALE G. A., DOWNING A. L. and LOWDEN G. F. (1955) The solubility of oxygen in pure water and sea water. *J. Appl. Chem.*, 5 (2), 53-62.
- WILSON R. C. and RINKEL M. U. (1957) Marquesas Area, Oceanographic and Fishery Data, January-March 1957. *U.S. Fish and Wildl. Serv., Spec. Sci. Rep. : Fish.* 238.
- WORTHINGTON L. U. (1958) Oceanographic Data from the R.R.S. *Discovery II* International Geophysical Year, Cruises one and two, 1957. W. H. O. I. Ref. 58-30.
- O.R.S.T.O.M., Centre d'Océanographie, Institut Français d'Océanie Nouméa, Nouvelle-Calédonie