

## Bilans de l'azote et du phosphore dans un atoll ouvert du Pacifique Central (Tikehau, Tuamotu, Polynésie Française)

Claude CHARPY-ROUBAUD et LOÏC CHARPY

**Résumé** – Les concentrations en azote et phosphore ont été mesurées dans le lagon et dans les eaux océaniques avoisinant de l'atoll de Tikehau de 1984 à 1987.

La présence de l'atoll perturbe les profils des sels nutritifs : la couche superficielle des eaux océaniques est enrichie, autour de l'atoll, en azote minéral et en orthophosphates. Les concentrations en nitrates du lagon varient avec le mois et l'année. Excepté pour  $\text{NH}_4$ , les sels nutritifs sont moins abondants dans le lagon que dans les eaux océaniques de surface. Les bilans de l'azote et du phosphore ont été calculés à partir de la différence de concentration entre les eaux lagunaires et océaniques superficielles, et du flux d'eau par la passe et les chenaux de communications. Le budget du phosphore, établi à partir de l'apport (sous forme minérale) et l'exportation (sous forme organique particulière) de cet élément, est équilibré. L'azote est exporté sous forme organique et de  $\text{NH}_4$ . L'apport de  $\text{NO}_3$ , dû à l'enrichissement des eaux océaniques, et la fixation d'azote moléculaire dissous équilibre cette exportation. On peut donc conclure que l'atoll, par sa présence physique (masse) et par ses métabolismes récifal et lagunaire, est une source d'azote pour les eaux océaniques avoisinantes.

### Nutrient budget in an open atoll

**Abstract** – Nutrient concentrations were measured in the lagoon and in surrounding waters of Tikehau atoll (Tuamotu archipelago, French Polynesia) from 1984 to 1987. Atoll mass effect disturbs the nutrients profiles; vertical turbulent mixings of the waters along the atoll induce an enrichment in mineral N and P in the surface layer. Nutrient concentrations change with year and month of sampling; inorganic nutrient levels are lower inside the lagoon than in surrounding waters except for  $\text{NH}_4$ . N and P budgets were roughly calculated by using nutrient concentration differences between lagoon and oceanic surface waters and water exchange rate through the passage and the reef flat spillways. Phosphorus budget is balanced between mineral input and organic output. Nitrogen is exported as PON, DON and  $\text{NH}_4$ . The nitrate input from oceanic waters explains a small part of N output;  $\text{N}_2$  fixation should explain the remainder. The atoll mass effect added to biological processes enrich superficial oceanic waters, therefore, it is not a drain for nitrogen and phosphorus.

**Abridged English Version** – The purpose of this paper is to establish the nutrient budgets between the lagoon and the surrounding oceanic waters of the atoll of Tikehau (Tuamotu, French Polynesia) with the intent to answer the question: is an atoll a source or a drain for certain nutrients?

Oceanic stations were studied in March 1984 at four stations located one mile from the atoll and one station located seawards 60 km south of the atoll. The lagoon itself was sampled during 9 surveys between October 1984 and May 1987. Nutrient concentrations in the upper 200 m were higher at the stations located near the atoll than at the station 60 km southwards (OS7) (Fig.). Therefore, the atoll seemed to disturb the standard vertical profiles of nutrients observed at station OS7, producing an enrichment phosphorus and nitrogen in the euphotic layer (Table I). This nutrient increase could very likely be induced by a vertical turbulent mixing caused by the atoll mass effect or internal waves. In the lagoon, the nutrient concentrations varied with the year and the month of sampling but were homogenous in space; therefore, their weighted averages are calculated by the equation:

$$\text{Average} = (\sum C_{i,j}) / (i \cdot j)$$

$C_{i,j}$  = concentration of N or P, year (i) and month (j).

Note présentée par Jean-Marie PÉRÈS.

21 AOUT 1991

ORSTOM Fonds Documentaire

N° : 34227, ex 1

Cote : B

p 53

The fluxes between lagoonal and ocean waters are roughly calculated; using the equation: flux ( $\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ ) =  $F \cdot (C_L - C_0) / \text{LS}$ ;  $F$  = annual average flow through the passage and the reef flat spillways =  $6 \times 10^7 \cdot \text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$  [5];  $\text{LS}$  = lagoon surface =  $4 \times 10^8 \text{ m}^2$ ;  $C_L$  and  $C_0$  = concentration of total nitrogen ( $\sum \text{N}$ ) or total phosphorus ( $\sum \text{P}$ ) in the lagoon and ocean.  $\sum \text{N}$  and  $\sum \text{P}$  average concentrations used to establish budgets appear in Table II. For surface oceanic waters the average concentrations of N and P are calculated using data obtained at station 1.

*Nitrogen budget.* — Total nitrogen concentration was equal to  $3.8 \text{ mmol N} \cdot \text{m}^{-3}$  in the ocean against  $8.0 \text{ mmol N} \cdot \text{m}^{-3}$  in the lagoon; therefore, nitrogen concentration increased with a rate of  $0.6 \text{ mmol N} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ . Larkum *et al.* [9] give mean nitrogen fixation for the whole well developed lagoonal reef of One Tree Reef (Great Barrier Reef):  $0.16$ – $0.31 \text{ mmol N} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ ; maximum nitrogen fixation rate occurs in the reef-flat and lagoonal patch-reef substrates ( $0.7$ – $1.3 \text{ mmol N} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ ). But in the water column of Tikehau lagoon, large quantities of cyanobacteria ( $150,000 \text{ cells} \cdot \text{ml}^{-1}$ ; [11]) were observed. Their productivity added to that of the benthic cyanophycean communities, is estimated to  $0.7 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}$  [12]; that production requires a nitrogen assimilation in the order of  $9 \text{ mmol N} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}$  of which a part can proceed from dissolved  $\text{N}_2$ .

*Phosphorus budget.* — Similarly, during their crossing over the reef rim and their residence in the lagoon, oceanic waters are impoverished in mineral phosphorus ( $\text{PO}_4$ ) but enriched in organic phosphorus as detritus.  $\sum \text{P}$  concentration in the lagoon ( $0.65 \text{ mmol P} \cdot \text{m}^{-3}$ ) was in the same order as  $\sum \text{P}$  concentration in surrounding waters ( $0.66 \text{ mmol P} \cdot \text{m}^{-3}$ ). In conclusion, the P budget is balanced between output and input.

Consequently, the high reefal and lagoonal primary production is due (i) to an input of N and P from enriched oceanic waters, (ii) to an important  $\text{N}_2$  fixation and (iii) to a mineralisation of all organic compounds in the lagoon. The answer to the purpose question is: the atoll is a source of nitrogen for oceanic waters.

INTRODUCTION. — Les atolls des Tuamotu sont situés dans les eaux sud-tropicales qui, appartenant à un grand « gyre » anticyclonique [1], sont très pauvres en sels nutritifs. La haute production de ces écosystèmes coralliens, qui ne bénéficient d'aucun apport terrigène (faible surface et grand éloignement des îles hautes), n'en est que plus énigmatique. Depuis 1982, un des programmes du Centre O.R.S.T.O.M. de Tahiti est l'étude du fonctionnement de Tikehau, atoll ouvert de l'archipel des Tuamotu. Dans cette Note, nous présentons les bilans de N et P que nous avons pu établir entre les eaux océaniques et l'eau lagonaire. Notre objectif était de déterminer si l'atoll est responsable d'un enrichissement en ces éléments ou les piège. Les études faites sur les écosystèmes coralliens (voir revue [2]) sont pour la plupart basées sur des recherches effectuées sur la couronne récifale et les échanges avec les eaux qui la submergent périodiquement; le lagon est considéré comme récepteur. Nos travaux ont porté sur le lagon mais prennent en compte une part du métabolisme récifal.

L'atoll de Tikehau est situé au nord-est des Tuamotu. Sa surface est de  $400 \text{ km}^2$ , sa profondeur moyenne de  $25 \text{ m}$ . Ses  $25 \text{ km}^2$  de couronne récifale sont interrompus par des chenaux : communications entre l'océan et le lagon; l'un d'eux, plus important ( $200 \text{ m}$  de large,  $4 \text{ m}$  de profondeur) constitue la passe de l'atoll.

**MATÉRIEL ET MÉTHODES.** — L'étude s'est déroulée de 1984 à 1987. Quatre stations océaniques situées aux quatre points cardinaux de l'atoll à 2 km de la barrière récifale et une station située à 60 km au sud de l'atoll ont été prospectées au cours de la mission TATI (*N.O. Coriolis*) (*fig.*). Les prélèvements ont été réalisés de 0 à 500 m. L'ensemble du lagon a été prospecté neuf fois; les prélèvements ont été effectués tous les 10 m de profondeur. Les stations de référence de l'océan (station 1) et du lagon (station Faufaa) ont été prospectées avec une fréquence plus élevée. Les paramètres étudiés et les méthodes d'analyse utilisées sont les suivants :  $\text{PO}_4$ ,  $\text{NO}_3$ ,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{NH}_4$ , N et P totaux dissous (ND et PD), par spectrophotométrie [3], N et P organiques dissous (DON et DOP), par différence entre N et P inorganiques dissous et DN et DP.

**RÉSULTATS ET DISCUSSION.** — La station OS7 (60 km au sud de l'atoll) présente des profils des sels nutritifs typiques d'eaux océaniques, avec augmentation des concentrations avec la profondeur : 0,1-0,2 mmol.m<sup>-3</sup> de phosphate et nitrate jusqu'à 200 m, 2,5 mmol  $\text{PO}_4$  et 15 mmol  $\text{NO}_3$ .m<sup>-3</sup> à 500 m. Cependant, les concentrations en  $\text{NO}_3$  et  $\text{PO}_4$  sont nettement plus élevées dans les 200 premiers mètres des stations proches de l'atoll (tableau I). Ainsi, au voisinage de l'atoll, les profils sont perturbés, présentant un enrichissement en N et P de la zone euphotique (*fig.*). Ce phénomène peut être la conséquence d'un mélange vertical turbulent, dû à la présence de l'atoll ou à des ondes internes [4].

**Budgets lagon-océan.** — Les concentrations en N et P des eaux lagonaires varient avec l'année et le mois de prélèvement, mais sont indépendantes du secteur prospecté. Les échantillons (1 057 analyses) n'ayant pas été obtenus synoptiquement, les meilleures estimations de leurs moyennes pondérées se calculent par :

$$\text{moyenne} = (\sum C_{i,j}) / (i \cdot j)$$

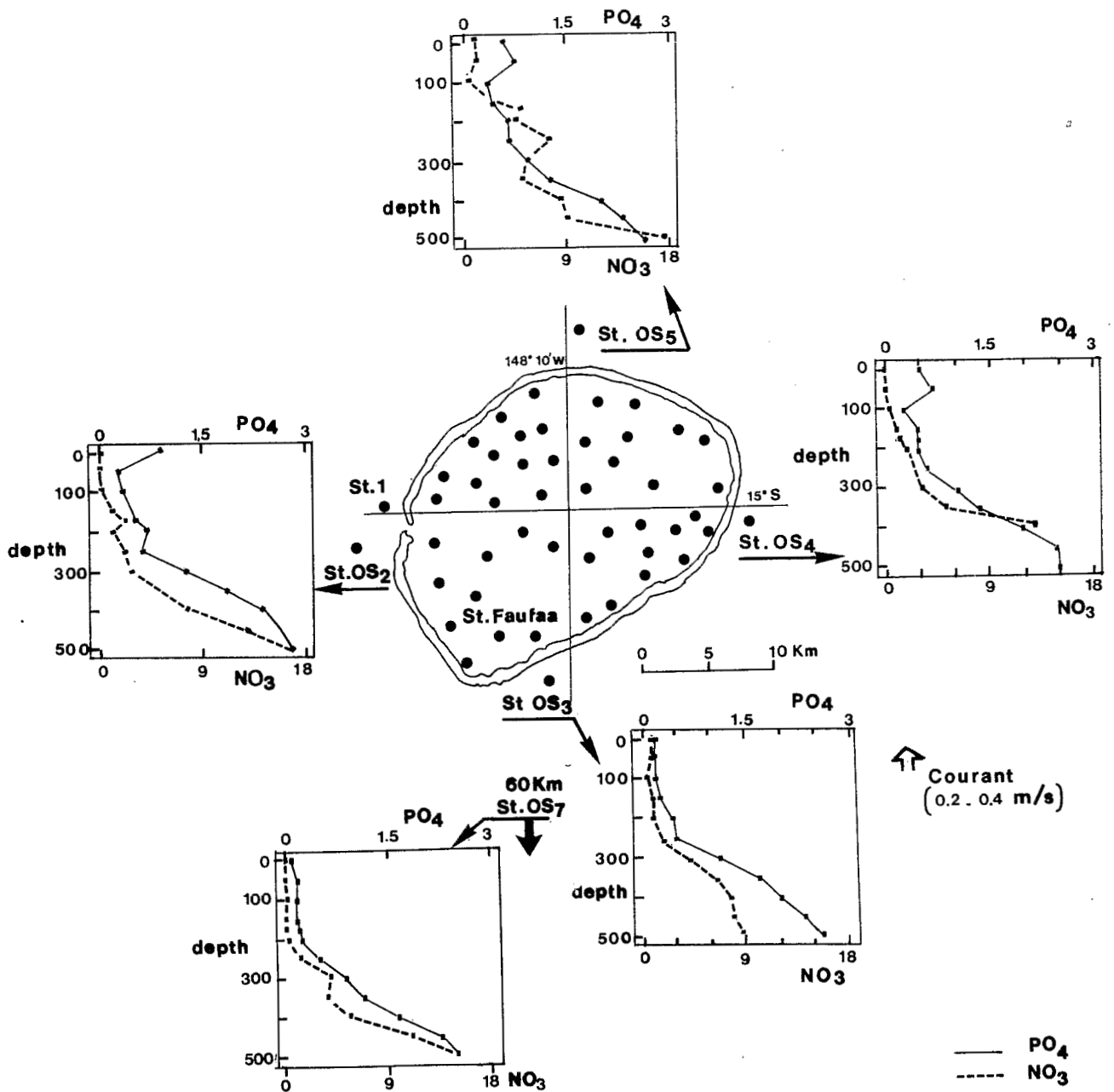
$C_{(i,j)}$  étant la concentration moyenne en N ou P de l'année  $i$  et du mois  $j$ .

Les moyennes des concentrations des eaux océaniques de surface sont obtenues à partir des 108 données de la station de référence (station 1). Les flux de sels nutritifs des eaux océaniques vers le lagon ont été calculés à partir de l'équation :

$$\text{flux (mmol.m}^{-2}.\text{j}^{-1}) = F(C_L - C_0) / \text{SL}$$

$F$  est le débit moyen qui franchit la passe et les hoas, il est égal à  $6 \cdot 10^7$ .m<sup>3</sup>.j<sup>-1</sup> [5];  $\text{SL}$  est la surface du lagon, égale à  $4 \cdot 10^8$  m<sup>2</sup>;  $C_L$  et  $C_0$  sont les concentrations (mmol.m<sup>-3</sup>) en azote ( $\text{NO}_2 + \text{NO}_3 + \text{NH}_4 + \text{DON} + \text{PON}$ ) ou phosphore ( $\text{PO}_4 + \text{DOP} + \text{POP}$ ), qui sont indiquées dans le tableau II.

**Azote.** — La concentration totale en azote est de 3,8 mmol.m<sup>-3</sup> dans l'océan et de 8,0 mmol.m<sup>-3</sup> dans le lagon. Durant leur passage sur la couronne récifale et leur résidence dans le lagon, les eaux sont appauvries en  $\text{NO}_2$  et  $\text{NO}_3$  et enrichies en  $\text{NH}_4$ . Le taux d'augmentation de N est de 0,6 mmol.m<sup>-2</sup>.j<sup>-1</sup>. L'augmentation des eaux en N durant leur transit sur le récif a été observée sur d'autres écosystèmes coralliens ([6], [7], [8]) et serait essentiellement due à la fixation d'azote atmosphérique par les cyanobactéries [9], organismes très bien représentés dans ce type d'écosystème ([6], [10]). Larkum et coll. [9] donne un taux de fixation de 0,16 à 0,31 mmol.m<sup>-2</sup>.j<sup>-1</sup>, pour la Grande Barrière de Corail. Nos résultats nous conduisent à estimer un taux de 0,6 en ces mêmes unités. A Tikehau, les cyanobactéries pélagiques atteignent 150 000 cellules.ml<sup>-1</sup> dans la colonne d'eau [11]. Leur production, associée à celle des cyanophycées benthiques est estimée



Localisation des stations et profils des concentrations en sels nutritifs ( $\text{mmol} \cdot \text{m}^{-3}$ ) au voisinage de l'atoll de Tikehau en mars 1984.

*Sampling stations location and inorganic nutrient concentration profiles ( $\text{mmol} \cdot \text{m}^{-3}$ ) near Tikehau atoll in March 1984.*

à  $0,7 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{j}^{-1}$  [12]; les  $9 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{j}^{-1}$  d'azote nécessairement assimilés doivent provenir de l' $\text{N}_2$  dissous.

*Phosphore.* — Durant leur transit sur le récif et leur temps de résidence dans le lagon les eaux océaniques s'appauvrissent en  $\text{PO}_4$  et s'enrichissent en P organique. Le bilan de P est équilibré entre les eaux extérieures ( $0,66 \text{ mmol P} \cdot \text{m}^{-3}$ ) et le lagon ( $0,65 \text{ mmol P} \cdot \text{m}^{-3}$ ).

TABLEAU I

Moyennes des concentrations en  $\text{PO}_4$  et  $\text{NO}_3$  ( $\text{mmol} \cdot \text{m}^{-3}$ )  
dans les 200 premiers mètres des eaux océaniques en mars 1984.  
*Average  $\text{PO}_4$  and  $\text{NO}_3$  concentrations ( $\text{mmol} \cdot \text{m}^{-3}$ )  
in the upper 200 m of oceanic waters in March 1984.*

| Station                 | OS2 | OS3 | OS4 | OS5 | OS7  |
|-------------------------|-----|-----|-----|-----|------|
| $\text{PO}_4$ . . . . . | 0,4 | 0,2 | 0,5 | 0,5 | 0,2  |
| $\text{NO}_3$ . . . . . | 0,9 | 1,0 | 0,9 | 2,5 | 0,15 |
| N/P . . . . .           | 2,1 | 5,0 | 2,0 | 5,1 | 0,9  |

TABLEAU II

Valeurs moyennes et intervalles de confiance ( $P=95\%$ ) des concentrations en phosphore et azote ( $\text{mmol} \cdot \text{m}^{-3}$ )  
dans les eaux océaniques avoisinantes (0-30 m) et les eaux lagunaires.

*Mean values and confidence intervals ( $P=95\%$ ) for nitrogen and phosphorus concentrations ( $\text{mmol} \cdot \text{m}^{-3}$ )  
in surrounding oceanic waters (0-30 m) and lagoon waters.*

|                 | $\text{NO}_2$ | $\text{NO}_3$ | $\text{NH}_4$ | DON | PON | $\Sigma\text{N}$ | $\text{PO}_4$ | DOP  | POP  | $\Sigma\text{P}$ |
|-----------------|---------------|---------------|---------------|-----|-----|------------------|---------------|------|------|------------------|
| Océan . . . . . | 0,04          | 0,30          | 0,8           | 2,3 | 0,4 | $3,8 \pm 1,3$    | 0,38          | 0,26 | 0,02 | $0,66 \pm 0,12$  |
| Lagoon. . . . . | 0,02          | 0,09          | 1,9           | 4,6 | 1,4 | $8,0 \pm 0,9$    | 0,16          | 0,39 | 0,10 | $0,65 \pm 0,06$  |

CONCLUSION. — La présence de l'atoll perturbe, à sa proximité, les profils de sels nutritifs des eaux oligotrophes océaniques qui l'entourent. Il en résulte à ce niveau un enrichissement de la zone euphotique en  $\text{NO}_3$  et  $\text{PO}_4$ . Le bilan du phosphore entre les eaux océaniques superficielles et celles lagunaires est équilibré grâce à l'assimilation de ce P minéral et à l'exportation du P organique produit par la couronne récifale et dans le lagon. Compte tenu de l'importante exportation, par le lagon, de N dissous, le budget de l'azote ne peut être équilibré que s'il y a fixation d'azote gazeux. Le taux de fixation nécessaire à cet équilibre est compatible avec ceux relevés dans la littérature pour les zones coralliennes.

Donc l'atoll, par sa présence physique (vraisemblablement sa masse) et le métabolisme des organismes qui se développent sur sa couronne récifale et dans son lagon, est responsable d'un enrichissement des eaux océaniques superficielles. Il est une source d'azote pour ces eaux.

Note remise le 3 juillet 1989, acceptée après révision le 23 janvier 1990.

#### RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] A. BLACKBURN, in A. R. LONGHURST éd., *Analysis of Marine Ecosystems*, Academic Press, London, 1981, p. 3-29.
- [2] A. SOURNIA, *Ann. Inst. Océanogr.*, 53, n° 1, 1977, p. 47-74.
- [3] J. D. H. STRICKLAND et T. R. PARSONS, *Bull. Fish. Res. Bd. Can.*, 167, 1972, p. 1-311.
- [4] J. C. ANDREWS et P. GENTEN, *Mar. Ecol. Progr. Ser.*, 8, 1982, p. 257-269.
- [5] X. LENHARDT, *Thèse du Muséum national d'Histoire naturelle*, 1988, 156 p.
- [6] W. J. WIEBE, R. E. JOHANNES et K. L. WEEB, *Science*, 188, 1975, p. 257-259.
- [7] R. E. JOHANNES, W. J. WIEBE et C. J. CROSSLAND, *Mar. Ecol. Progr. Ser.*, 12, 1983, p. 131-136.
- [8] S. V. SMITH, *Limnol. Oceanogr.*, 29, n° 6, 1984, p. 1149-1160.
- [9] A. W. D. LARKUM, I. R. KENNEDY et W. J. MULLER, *Mar. Biol.*, 98, 1988, p. 143-155.
- [10] M. POTTS et B. A. WHITTON, *Ecologia*, 27, 1977, p. 275-283.
- [11] J. BLANCHOT, L. CHARPY et R. LE BORGNE, *Mar. Biol.*, 102, 1989, p. 329-339.
- [12] C. J. CHARPY-ROUBAUD, L. CHARPY et L. LEMASSON, *Proc. 6th int. coral Reef Symp., Australia*, 2, 1988, p. 551-556.