

## Cycle du carbone dans l'océan équatorial et climat

**Robert LE BORGNE**

Centre IRD de Nouméa, B.P. A5, 98848 Nouméa Cédex, Nouvelle-Calédonie, [leborgne@noumea.ird.nc](mailto:leborgne@noumea.ird.nc)

### L'enjeu et les questions

Les études réalisées sur le cycle du carbone dans la zone équatoriale du Pacifique relèvent des thématiques « effet de serre » et « changement global », nées dans les années 80 lorsqu'on a pris conscience de l'augmentation régulière de la teneur de l'atmosphère en dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>). Les premières mesures systématiques ont débuté en 1958, année géophysique internationale, au Mauna Loa (Hawaii) et au pôle sud, puis en Alaska (Pointe Barrow) en 1973 et aux Samoa américaines en 1974. La courbe de la Figure 1 au Mauna Loa montre :

- une augmentation moyenne de la concentration en CO<sub>2</sub> de 1,5 ppm par an,
- des variations saisonnières qui témoignent de l'utilisation du CO<sub>2</sub> par la végétation pendant la belle saison de l'hémisphère nord, hémisphère continental.
- un taux d'augmentation inférieur à celui déduit des quantités de combustibles fossiles brûlées par l'homme, indiquant donc qu'une partie disparaît quelque part. On estime actuellement que 40% serait piégé par les océans, essentiellement dans les zones circumpolaires (on parle de « puits » de carbone).

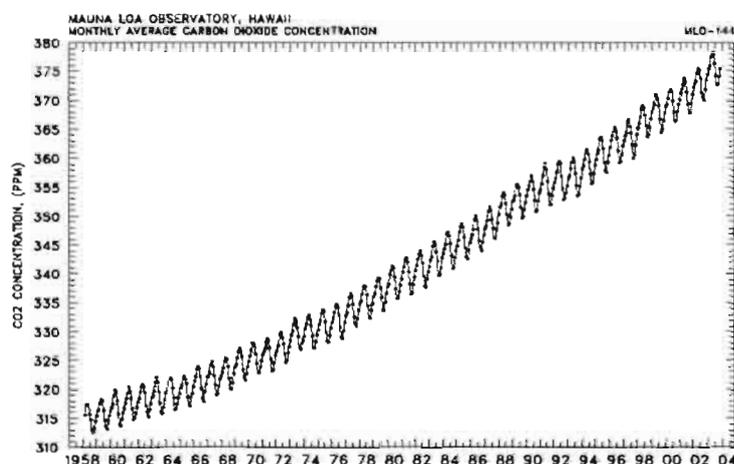


Figure 1 : Suivi au Mauna Loa (<http://www.cmdl.noaa.gov/>)

En revanche, certaines zones en exportent (il s'agit de « zones sources »), ce qui est le cas de la ceinture équatoriale, siège d'une remontée d'eaux profondes dans certaines de ses parties. Cette remontée est due à la divergence du courant équatorial sud de part et d'autre de l'équateur, sous l'effet de la force de Coriolis (Figure 2).

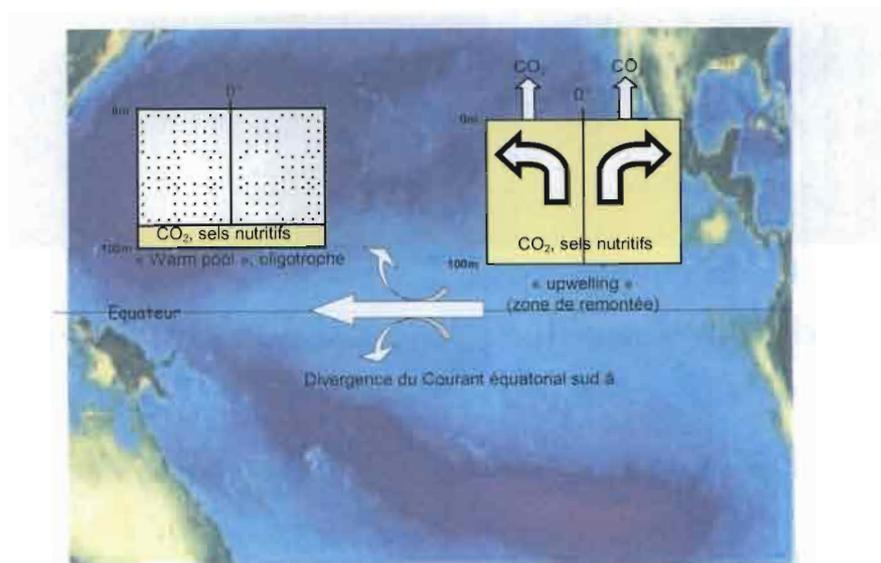


Figure 2 : Fonctionnement du système équatorial.

Le courant équatorial sud n'arrive généralement pas dans la partie ouest de l'océan, qui présente la situation typique des eaux tropicales, oligotrophes avec un système à deux couches, séparées par une thermocline qui empêche les échanges. Les sels nutritifs et les gaz dissous, tels le CO<sub>2</sub>, sont bloqués en profondeur, tandis que la couche superficielle est épuisée en sels nutritifs et ses gaz dissous, en équilibre avec ceux de l'atmosphère.

La situation est toute autre dans la zone de divergence, qui a pour effet de faire remonter les eaux profondes en surface. Cette remontée d'eaux, plus froides, riches en sels nutritifs et en gaz dissous, va donc avoir un double rôle : celui, d'abord, de permettre une photosynthèse importante grâce à la présence de sels nutritifs dans la couche éclairée et donc une production biologique plus élevée ; celui, ensuite, d'exporter des gaz dissous vers l'atmosphère, qui dégageront d'autant plus vite que la différence de température sera significative.

La zone de remontée équatoriale est donc à la fois une zone « puits » où les organismes photosynthétiques utilisent une partie ou la totalité du CO<sub>2</sub> provenant des couches profondes et une zone « source », d'évasion de ce gaz vers l'atmosphère.

Le Pacifique équatorial représente 42% de la circonférence de la Terre et l'on peut prévoir qu'il jouera un rôle important vis à vis du bilan de carbone. C'est la raison pour laquelle il fut choisi en 1989 comme l'un des 5 chantiers du programme international JGOFS (Joint Global Ocean Flux Study). Les trois questions auxquelles on se proposait de répondre à la réunion de lancement du programme à Honolulu, étaient les suivantes :

- Quelle est l'importance du Pacifique équatorial dans le bilan de carbone de l'océan mondial, comme « puits » et comme « source » de carbone?
- Quelle est l'importance de la « pompe biologique », processus qui utilise le CO<sub>2</sub> pour le transférer ensuite vers les couches profondes de l'océan?
- Quelle est l'amplitude des variations interannuelles du bilan de carbone, en réponse au phénomène ENSO (El Niño-Southern Oscillation)?

### **Les opérations du programme JGOFS/Pacifique équatorial (1989-2003)**

Le programme JGOFS s'appuyait sur les données d'hydrologie et de courantologie du programme CLIVAR (CLimate VARIability & predictability) et, en particulier, sur son réseau américano-japonais TAO-TRITON, constitué de séries de mouillages profonds situés à différentes longitudes entre 8°S et 8°N.

Les études de variabilité à petite échelle, celles le long de la verticale et celles des processus ont fait l'objet de campagnes océanographiques françaises, dans le Pacifique ouest et central, australiennes, dans le Pacifique ouest, japonaises à l'ouest et au centre et américaines dans les parties ouest, centre et est. Ajoutons les mesures faites à l'occasion des campagnes d'intervention sur les mouillages et celles faites sur les navires d'opportunité.

Enfin, il a manqué pendant une partie du programme, une couverture satellitaire de la couleur de l'eau, indice de la biomasse superficielle du plancton végétal. Il a fallu attendre 7-8 ans pour que soient lancés POLDER-ADEOS en août 1996 et SeaWiFS en septembre 1997.

**Les résultats du programme JGOFS/Pacifique équatorial : le cycle du carbone en relation avec la variabilité interannuelle**

(1) Quand on compare l'évasion de CO<sub>2</sub> (en utilisant la différence de fugacité entre l'océan et l'air, ΔfCO<sub>2</sub>) dans les deux parties du Pacifique équatorial, la « warm pool » et la zone de remontée, on observe que cette dernière exporte 60 fois plus par unité de surface, que la « warm pool » (Figure 3).

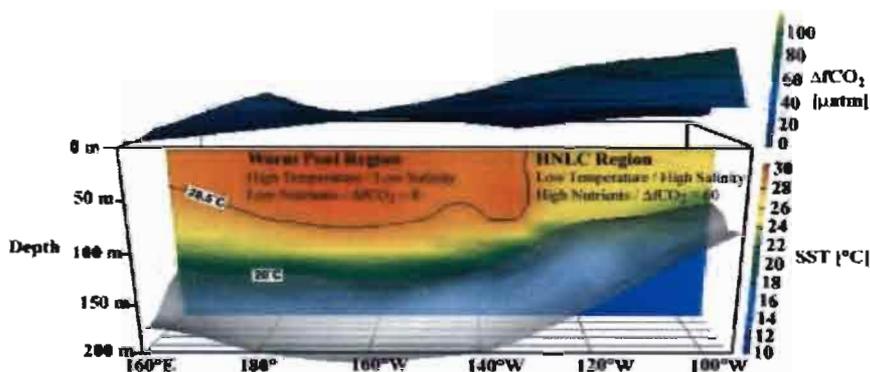


Figure 3 : Différence de fugacité air-mer (ΔfCO<sub>2</sub>) dans la « warm pool » et la zone de remontée (HNLC). (in : Le Borgne, Feely et Mackey, 2002).

(2) Une comparaison analogue peut-être faite pour la pompe biologique dont on a séparé les différents éléments (Figure 4).

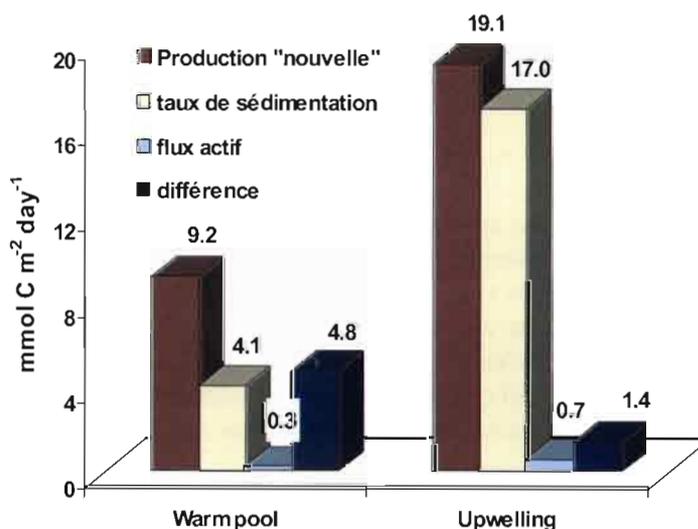


Figure 4 : Les éléments de la « pompe biologique dans la « warm pool » et la zone de remontée (d'après Le Borgne et Rodier (1997) et Rodier et Le Borgne (1997)).

Les apports en provenance des couches profondes sont à l'origine d'une production photosynthétique « nouvelle », se distinguant de la production de régénération, qui provient des éléments recyclés dans la couche éclairée, superficielle. Dans le cas d'un système en équilibre, où les apports sont compensés par les pertes, la production « nouvelle » sera égale aux pertes, représentées par la sédimentation des particules, d'une part et le transfert lié aux migrations verticales du zooplancton (dénommé « flux actif »), d'autre part. L'ensemble de ces processus (production « nouvelle », sédimentation, flux actif) constitue la « pompe biologique ». A noter que la « différence » de la Figure 4 correspond à l'incertitude sur les bilans et à des pertes en matière organique dissoute.

La Figure 4 fait apparaître que la production nouvelle, rapportée à l'unité de surface et de temps, double dans la zone de remontée. En d'autres termes, il y a deux fois plus de carbone exporté vers les couches profondes dans l'upwelling.

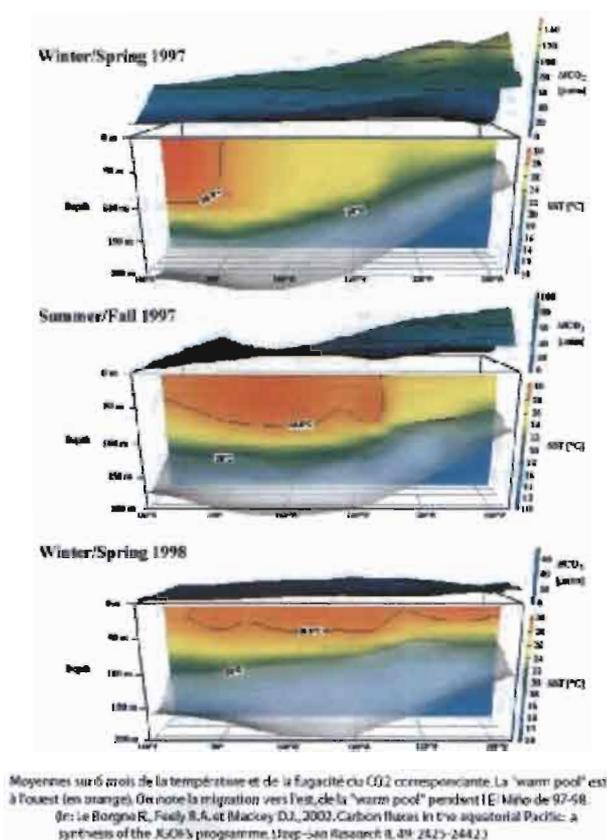


Figure 5 : L'évasion de CO<sub>2</sub> pendant l'El Niño de 97-98 (In : Le Borgne, Feely et Mackey, 2002)

Notons que cette production nouvelle ou production exportée, est inférieure à celle à laquelle on pourrait s'attendre au vu des concentrations importantes de sels nutritifs apportées par l'upwelling. Deux expériences réalisées en grandeur nature dans le cadre de JGOFS (IronEx I et II) tendent à démontrer que l'élément limitant serait le fer, dont l'origine n'est vraisemblablement pas éolienne mais un transport par le sous courant équatorial en provenance des côtes de Nouvelle Guinée.

(3) La comparaison des bilans de carbone des deux régions doit prendre en compte leurs superficies et celles-ci dépendent de la situation climatique. Prenons l'exemple de l'El Niño de 97-98 (Figure 5).

Début 97, l'El Niño s'installe à un moment où la warm pool est encore à l'ouest de la ligne de changement de date (180°), longitude moyenne de la limite entre la warm pool et la zone d'enrichissement. L'exportation de CO<sub>2</sub> est celle d'une situation climatique moyenne.

Au fur et à mesure que l'El Niño se maintient, la limite entre zone d'enrichissement et warm pool se déplace vers l'est. L'exportation de CO<sub>2</sub> diminue dans la zone équatoriale.

Arrive le moment, où il n'y a plus de zone d'enrichissement, ni d'évasion de CO<sub>2</sub>, car la warm pool occupe tout le Pacifique équatorial.

Lui succédera (mais ce n'est pas sur la figure) une situation de La Niña au cours de laquelle la zone d'enrichissement occupera tout le Pacifique équatorial et où l'évasion de CO<sub>2</sub> sera maximum, en raison à la fois de l'étendue de la région et de l'intensité de la remontée d'eaux profondes.

Faisons donc le point (Tableau ci-dessous):

|  | Pompe biologique<br>= puits (5°N-5°S) | Evasion = source<br>(10°N-10°S) | Source - puits |
|--|---------------------------------------|---------------------------------|----------------|
| Forts El Niños (1)                         | 380-480                               | 200-400                         | <0             |
| Autres périodes (2)                        | 570-720                               | 800-1000                        | >0             |
| (1) / (2)                                  | 0.67                                  | 0.25                            |                |
| Pacifique équatorial/<br>Océan mondial (%) | 26 <sup>(a)</sup>                     | 72 <sup>(b)</sup>               |                |

<sup>(a)</sup> Chavez et Toggweiler (1995) <sup>(b)</sup> Feely et al. (2002)

- La pompe biologique et l'évasion de CO<sub>2</sub> sont moins fortes en situation d'El Niño qu'aux autres périodes.
- Mais l'écart entre les deux périodes est moins fort pour la pompe biologique en raison de la lenteur d'utilisation des sels nutritifs, lenteur due à la limitation par le fer.
- En période de fort El Niño, le Pacifique équatorial est une zone « puits » et n'exporte plus de CO<sub>2</sub>. Aux autres périodes, il exporte.
- Le Pacifique équatorial est responsable de 72% de l'évasion globale de carbone et sa pompe biologique représente 26% du total. C'est dire son rôle au niveau global.

L'une des meilleures illustrations de ce rôle est la suivante. Le taux d'augmentation de la teneur de l'air en CO<sub>2</sub> n'est pas constant et l'on remarque pour la période 1980-2003 qui est présentée sur la Figure 6, des périodes d'augmentations plus fortes qui correspondent aux phases de La Niña (1988, 1996, 1999) et des périodes d'augmentation plus faibles, voire négatives, qui correspondent aux El Niños (82-83, 87, 91-94, 97-98). Une partie de ces variations (30%) sont attribuables à l'évasion de CO<sub>2</sub> de la zone équatoriale, l'évasion étant faible en El Niño et forte en La Niña, ce que l'on retrouve au niveau atmosphérique.

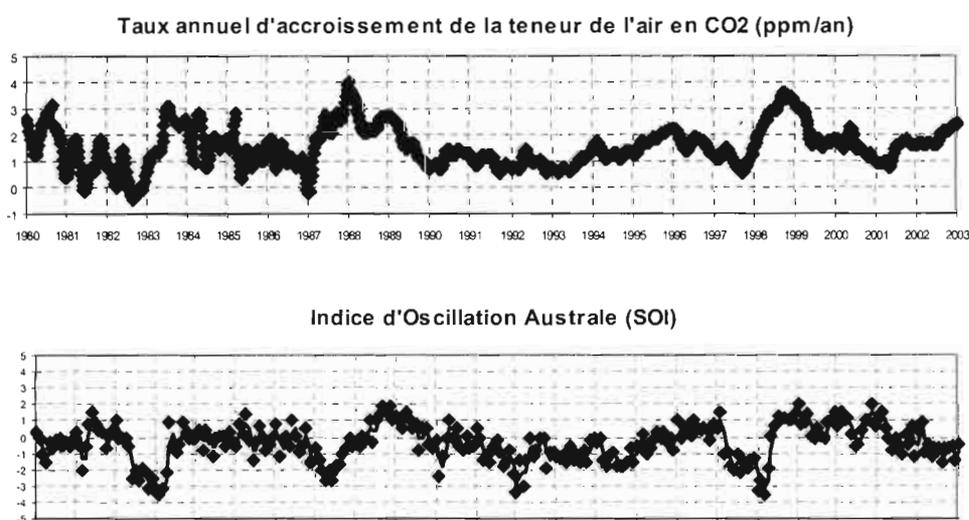


Figure 6 : (N. Metzl, IPSL, Univ. Paris 6, communication personnelle)

## Les recherches en cours

Le programme JGOFS s'est arrêté le 31 décembre 2003 mais les recherches sur la thématique « cycle du carbone » continuent dans le Pacifique intertropical. Ils ont pour objectifs de suivre les variations d'un certain nombre de paramètres et de comprendre certains processus. Il s'agit :

- au niveau américain, de continuer à suivre les teneurs en CO<sub>2</sub> et en plancton et d'étudier l'origine et le devenir du fer.
- aux niveaux japonais et français, de poursuivre les efforts sur l'étude du front entre la warm pool et l'upwelling et sur sa position en fonction de la situation climatique.
- aux niveaux français et américain, de considérer les eaux oligotrophes tropicales, qui couvrent la majeure partie de la superficie de l'océan mondial, avec l'estimation de la quantité de carbone produite par les organismes diazotrophes, qui utilisent l'azote moléculaire (ou di-azote). Il s'agit de programmes menés à partir d'Hawaii et de Nouméa. La question est celle de savoir si l'on a sous-estimé jusqu'à présent le rôle de la pompe biologique de l'océan en négligeant cette diazotrophie.

## L'avenir ? Un observatoire dans le Pacifique sud

On peut, sans exagérer, dire que la compréhension et donc la prévision du rôle de l'océan dans le cycle global du carbone bute sur le nombre insuffisant de stations d'observations. Ces stations permettent la mesure de paramètres que l'on ne peut pas mesurer automatiquement, sur la description des variations en fonction de la profondeur et sur la validation des données satellitales. L'existence de ces stations suppose la disposition de navires, la proximité d'un laboratoire de recherche et de ses moyens techniques et, surtout, une vision à long terme de la recherche. Dans le domaine de la biogéochimie marine du Pacifique, qui nous concerne, il existe une station au nord d'Hawaii (station HOT) et une station japonaise au large de l'île d'Hokkaido, plus récente. L'une et l'autre, parce qu'elles n'étaient pas que de simples stations d'observation mais qu'elles disposaient d'équipes de recherche, ont donné des renseignements précieux sur les variations à long terme du milieu pélagique et de son fonctionnement. Rien n'existe pour le moment dans l'hémisphère sud bien qu'un certain nombre de conditions soient réunies à Nouméa. C'est une question de politique scientifique...

## Références bibliographiques

- Chavez, F.P., J.R. Toggweiler, (1995). Physical estimates of global new production: the upwelling contribution. *In: Summerhayes, C.P., Emeis, K.C., Angel, M.V., Smith, R.L., Zeitschel, B. (Eds.). Upwelling in the ocean: modern processes and ancient records. John Wiley and sons. Chichester, pp. 313-320.*
- Feely, R. A., J. Boutin, C.E. Cosca, Y. Dandonneau, J. Etcheto, H.Y. Inoue, M. Ishii, C. Le Quéré, D. Mackey, M. McPhaden, N. Metzl, A. Poisson, R. Wanninkhof, (2002). Seasonal and interannual variability of CO<sub>2</sub> in the equatorial Pacific. *Deep-Sea Res., Part II*, 49, 2443-2469.
- Le Borgne, R., M. Rodier, (1997). Net zooplankton and the biological pump: a comparison between the oligotrophic and mesotrophic equatorial Pacific. *Deep-Sea Research, Part II*, 44, 2003-2023.
- Le Borgne, R., R.A. Feely, D.J. Mackey, (2002). Carbon fluxes in the equatorial Pacific: a synthesis of the JGOFS programme. *Deep-Sea Res., Part II*, 49, 2425-2442.
- Rodier, M., R. Le Borgne, (1997). Export flux of particles at the equator in the western and central Pacific ocean. *Deep-Sea Research Part II*, 44, 2085-2113.

Assises de la Recherche Française dans le Pacifique



# Actes des Assises

24-27 août 2004, Nouméa, Nouvelle-Calédonie

[www.assises-recherche-pacifique.org](http://www.assises-recherche-pacifique.org)  
[arfp2004@offratel.nc](mailto:arfp2004@offratel.nc)