

L'OCEAN, RESERVOIR ET PIEGE A CARBONE DE LA PLANETE

Depuis plus d'un siècle, l'Homme puise dans les énormes réserves de combustibles fossiles accumulées au cours des temps géologiques dans le sous-sol de notre planète. Mais en brûlant charbon et pétrole, il est aussi à l'origine d'une émission sans précédent de gaz dans l'atmosphère qui risque de bouleverser les équilibres écologiques. Le plus important, par le tonnage, est le dioxyde de carbone (CO_2). On estime à l'heure actuelle que 20 Gt (gigatonnes) de ce gaz sont rejetées chaque année, provoquant ainsi une augmentation moyenne de sa concentration dans l'air de 0,5% (fig 1). Pourtant cet accroissement annuel est inférieur à celui que l'on peut prévoir, car 40% environ de ces 20 gigatonnes sont absorbés par les milieux continentaux et océaniques (fig 2).

Mise à l'eau d'une sonde de mesure de la température et de la salinité avec sa "rosette" de bouteilles à prélèvement.
Photo : Robert le Borgne

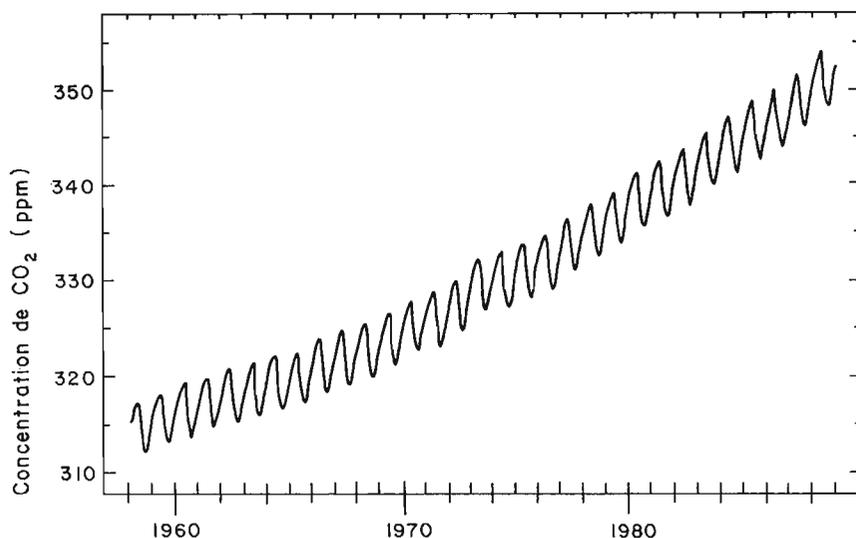


Fig. 1 : Observation de l'augmentation de la teneur de l'atmosphère en CO_2 depuis 1958, au Mauna Loa à Hawaï (d'après Keeling et al. 1989).

On peut se demander si cette capacité d'absorption des milieux naturels continuera indéfiniment et si les changements climatiques seront susceptibles de la modifier, que ces changements soient la conséquence de l'augmentation de la teneur de l'air en CO_2 ou qu'ils soient indépendants des activités de l'Homme. La réponse à ces deux questions n'est pas simple en raison de la diversité des processus physiques, chimiques et biologiques mis en jeu et du caractère global des phénomènes. C'est pour harmoniser ces recherches qui couvrent une grande variété de domaines scientifiques et géographiques, que le Programme International Géosphère-Biosphère (PIGB) a été lancé en septembre 1986 (cf. Orstom Actualités n°32) avec trois objectifs principaux : identifier les processus qui gouvernent le couple Géosphère-Biosphère (ou monde minéral-monde vivant), les décrire et les modéliser. Le programme JGFOS (Joint Global Flux Ocean Study - dont le volet français est intitulé "Flux Océanique"), mis sur pied l'année suivante, reprend ces trois objectifs pour le seul domaine océanique et ses interactions avec les milieux adjacents : atmosphère, fond de l'océan et bordures continentales. Le lien entre JGFOS et PIGB est donc clair, le premier pouvant être considéré comme partie intégrante ("Projet pilote") du second.

LES THEMES SCIENTIFIQUES DU PROGRAMME JGFOS

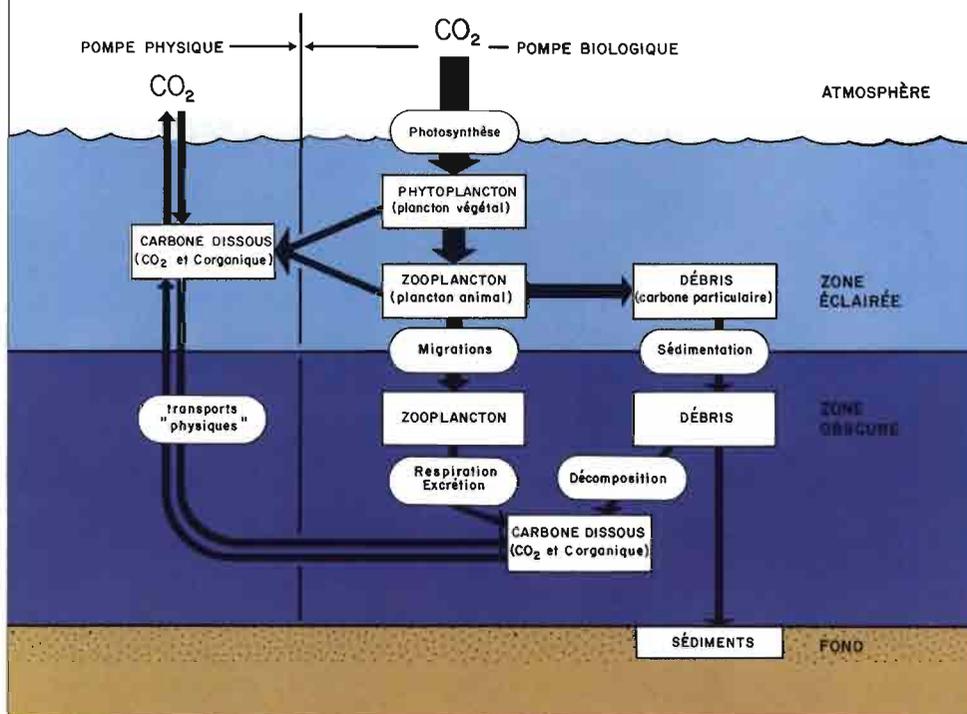
Les échanges de gaz carbonique entre l'océan et l'atmosphère sont sous la dépendance des concentrations de chaque

milieu en CO_2 , de la température et de l'agitation de l'eau. Pour que l'échange se fasse de l'atmosphère vers la mer, à température constante, il est nécessaire que la couche de surface ne soit pas saturée en CO_2 . Cette condition est réalisée lorsqu'il existe une exportation permanente de carbone vers les couches profondes qui peut être assurée par une plongée de l'eau de surface (cas de la convergence antarctique) et par la "pompe biologique".

Ce dernier processus a pour effet de transformer le CO_2 en carbone organique ou minéral et de l'exporter de la couche superficielle vers le fond. Ainsi, dans la

"pompe biologique", le CO_2 est fixé par le plancton végétal de la partie éclairée de l'océan, puis transformé en matière vivante et en calcaire (cas par exemple des tests de foraminifères ou des coquilles de petits mollusques planctoniques). Les particules ainsi formées seront ensuite transférées vers les couches profondes par simple sédimentation ou par les animaux planctoniques lorsqu'ils migrent entre les couches superficielles et profondes (fig. 3). Une petite partie seulement de ce carbone contenu dans les particules se retrouvera sur le fond des océans, considéré comme "piège" de carbone. Une autre partie sera libérée par la dégradation des particules au fur et à mesure qu'elles sédimentent, sous la forme de carbone organique dissous et de CO_2 . Ces derniers peuvent également provenir de la respiration et de l'excrétion du plancton migrant, qui assurera un transfert de ces molécules de la couche superficielle, où il se nourrit, vers les couches profondes. La matière organique et le CO_2 ainsi produits par les organismes vivants ou morts, sont donc perdus par le système superficiel et s'accumulent dans les couches profondes et froides de l'océan. La figure 4 illustre le rôle de ces eaux profondes dans le stockage du gaz carbonique et des carbonates qui lui sont associés, la couche superficielle en contenant beaucoup moins en raison de sa température plus élevée et du rôle de la pompe biologique. On remarquera aussi que les quantités de carbone stockées dans les eaux profondes sont considérablement plus importantes que celles du sol, sur les continents (fig. 2). Le carbone dissous contenu dans les eaux profondes, pourra remonter en sur-

Fig. 3 - Le transfert du gaz carbonique peut être assuré dans le milieu océanique par les processus physiques (pompe physique) et par l'activité des organismes vivants (pompe biologique).



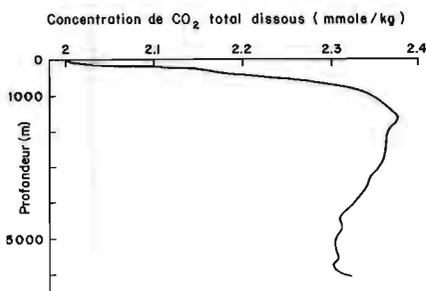


Fig. 4 - Le contraste est très marqué entre les eaux superficielles, chaudes et pauvres en CO₂, et les eaux profondes froides, qui constituent un énorme réservoir de CO₂;

face au bout d'un temps plus ou moins long à la faveur de mouvements ascendants dans les zones de résurgences, appelées "upwellings" par les océanographes. On observe ces upwellings près des côtes, sur les bords orientaux des océans (par exemple, upwellings du Maroc, Mauritanie, Sénégal, Benguela) ou dans les divergences du large, en Antarctique ou à l'Equateur. Un cas particulier de "pompe biologique" est représenté par les récifs coralliens qui fixent le carbone et le stockent sous forme de calcaire dans la zone éclairée de la ceinture intertropicale.

La quantité de carbone qui peut être "pompée" par l'activité des organismes vivants dépend de l'intensité de la photosynthèse dans la couche éclairée de l'océan. Dans le milieu océanique, la photosynthèse n'est pas limitée par la quantité de carbone, car cet élément est toujours en excès. En revanche, la photosynthèse dépend de la présence d'autres éléments dans la couche éclairée, en particulier, des sels nutritifs azotés. L'efficacité de la "pompe biologique" est donc tributaire des apports azotés et l'on comprend que les zones les plus riches de l'océan en éléments nutritifs soient susceptibles de piéger le plus de carbone par ce processus.

Le programme JGFOS a retenu un certain nombre de situations de l'océan mondial, correspondant à des fonctionnements différents de la "pompe biologique" ou à l'existence de phénomènes physiques de remontée (upwellings) ou de plongée (convergences) des eaux. Dans l'Atlantique, il s'est agi de l'étude de la floraison printanière phytoplantonique en 1989, opération internationale de grande envergure, qui a mobilisé plusieurs navires océanographiques. Toujours dans l'Atlantique, les campagnes EUMELI de France-JGFOS ont pour objectif l'étude de trois situations différentes au large de l'Afrique du nord-ouest : une situation d'upwelling côtier, eutrophe (riche), une seconde dans l'océan tropical du large, oligotrophe (pauvre) et la troisième, intermédiaire (mésotrophe). Dans le Pacifique, les efforts se sont concentrés sur la zone équatoriale, mobilisant les grandes nations riveraines : Etats-Unis et Canada pour le Pacifique Est et Central, Japon, Australie, France (Nouvelle-Calédonie) pour le Pacifique Ouest.

toriale, mobilisant les grandes nations riveraines : Etats-Unis et Canada pour le Pacifique Est et Central, Japon, Australie, France (Nouvelle-Calédonie) pour le Pacifique Ouest.

LE PROJET FLUPAC (FLUX dans l'ouest PACifique) CONTRIBUTION À L'ÉTUDE DE LA ZONE ÉQUATORIALE POUR JGFOS

La zone équatoriale du Pacifique constitue un cas particulièrement intéressant lorsqu'on considère le cycle du carbone, en raison de sa taille et parce qu'elle est le siège d'une remontée d'eau, entraînant des apports de sels nutritifs et de carbone dissous (carbone organique

celui de l'upwelling. L'étude de la machine climatique qui règle les alizés, et donc l'upwelling équatorial, est actuellement l'objet du programme international TOGA. Les conséquences sur les échanges de CO₂ avec l'atmosphère et sur la "pompe biologique" sont l'objet des recherches de JGFOS.

La zone du Pacifique équatorial, située à l'ouest de la ligne de changement de date, sera considérée par le programme FLUPAC du Centre Orstom de Nouméa. Cette région contient la limite ouest de l'upwelling équatorial et de l'enrichissement en sels nutritifs. C'est celle aussi qui est la mieux connue des océanographes de l'Orstom depuis les premières campagnes du navire océanographique

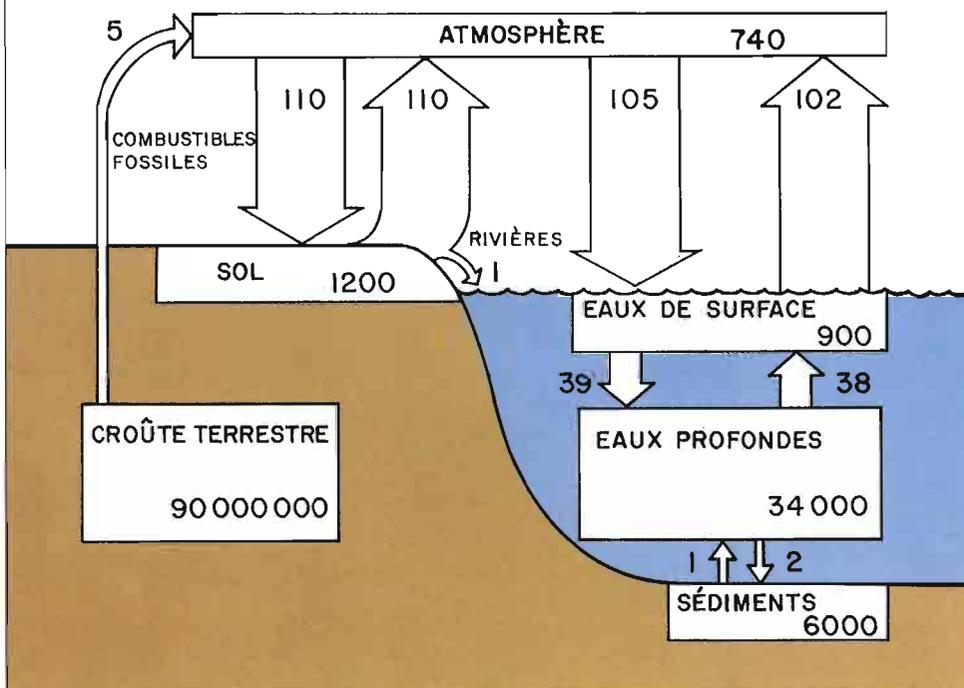
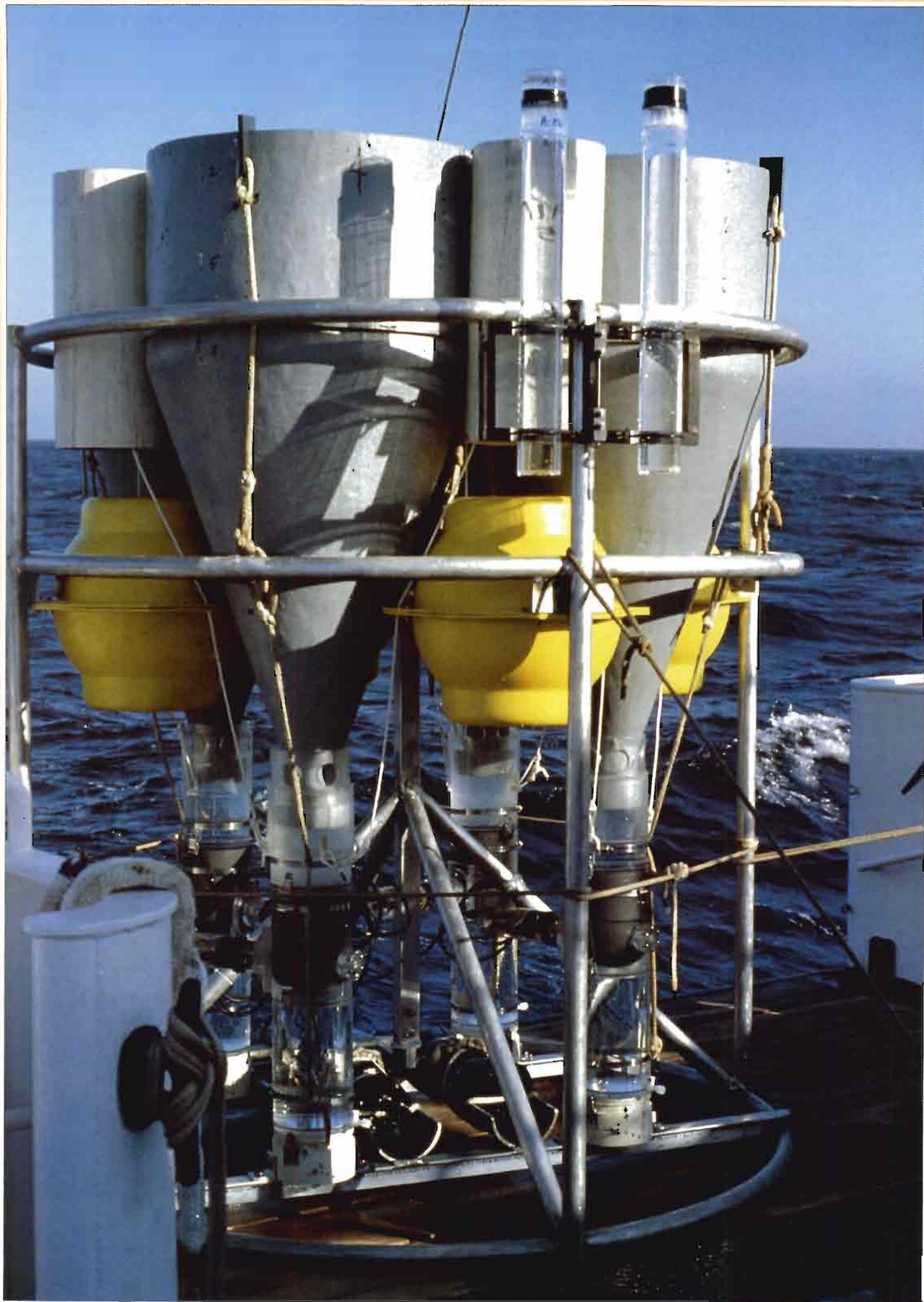


Fig. 2 - Le cycle du carbone sur notre planète (d'après BOFS, contribution britannique à JGFOS). Unités en gigatonnes.

et gaz carbonique). Elle représente un exemple à la fois de zone exportatrice de carbone vers l'atmosphère par la remontée d'eaux froides des couches profondes et d'exportation vers le fond par "pompage biologique" en raison de sa richesse en sels nutritifs. La remontée d'eau est créée par la déviation vers le Nord et le Sud des courants équatoriaux sous l'effet de la rotation de la terre. Le moteur de ces courants de surface est l'alizé, dont la présence conditionne l'existence de l'upwelling équatorial et son extension vers l'Ouest : lorsque les alizés soufflent sur la majeure partie du Pacifique, les courants équatoriaux qui circulent d'Est en Ouest engendrent un upwelling continu d'un bout à l'autre du Pacifique, sur une distance représentant près de la moitié de la circonférence de la terre; l'arrêt des alizés, observé lors des épisodes El Niño, entraîne

Coriolis en 1965. FLUPAC associera un suivi dans le temps de la zone d'enrichissement équatorial et des études fines de processus.

Le suivi ne peut être réalisé par des campagnes océanographiques, en raison des distances considérables dans le Pacifique : ainsi, il a fallu deux mois au navire "Le Noroît" pour réaliser en janvier-février 1991 la radiale équatoriale ALIZE 2 entre Panama et la longitude de la Nouvelle-Calédonie (165°E); trois semaines sont nécessaires pour un aller et retour entre Nouméa et la zone équatoriale. La solution passe donc par l'utilisation du réseau de navires marchands du programme TOGA-SURTROPAC (notamment pour la mesure de la pression partielle de CO₂) et par celle des satellites à capteur "couleur de l'eau", qui permettent de délimiter l'extension géographique de la zone d'enrichissement équatoriale (fig.5). Le



satellite SeaWiifs devrait être lancé en 1993 par la NASA et le satellite ADEOS en 1995 par les Japonais.

Le second volet du programme FLUPAC concerne des études de mécanismes, réalisées en quelques points seulement de la zone équatoriale, au cours d'opérations d'une semaine environ en point fixe. L'une des questions à laquelle on tâchera de répondre est celle de savoir quelle quantité de sels nutritifs est apportée par les processus physiques (fig. 3) dans la couche superficielle éclairée. Ces apports, par upwelling ou mélanges, sont très mal évalués à l'heure actuelle, alors que leur connaissance est indispensable aux études des échanges entre l'océan et l'atmosphère. Une campagne océanographique est prévue sur ce thème, à la fin de l'année 1992, pendant l'opération internationale TOGA-COARE : on saisira ainsi l'occasion de disposer, au même moment, de plusieurs navires dans le Pacifique équatorial occidental. L'évaluation de la quantité de CO_2 fixée par photosynthèse dans l'océan, consti-

tue, quant à elle, l'objectif premier des mesures du programme FLUPAC. Les données actuelles concernant la zone équatoriale du Pacifique varient dans un rapport de 1 à 4, pour des raisons tenant probablement aux méthodes employées par les différents laboratoires. Si l'on veut pourtant chiffrer le rôle de la "pompe biologique", il est essentiel de disposer de données plus fiables. Il est donc prévu de mesurer la fixation de CO_2 par le plancton végétal, en utilisant simultanément plusieurs méthodes différentes et en répétant les mesures au cours de périodes de plusieurs jours. Ceci pourra être fait en 1993 sur le navire "Atalante", dernier né de la flotte océanologique française. Parallèlement à ces mesures de fixation photosynthétique, la quantité de carbone sédimentant sous forme de fines particules sera évaluée grâce à l'utilisation de pièges à sédiments, dispositifs constitués de collecteurs placés à différentes profondeurs dans les 500 premiers mètres de l'océan, récupérés après fermeture. Aucune mesure de ce type n'a été faite,

à notre connaissance, dans cette partie du Pacifique équatorial.

Enfin, des prélèvements de zooplancton auront pour but de quantifier le rôle de ces organismes migrateurs dans les transferts de carbone.

Le projet FLUPAC mettra en oeuvre de gros moyens venant s'ajouter à ceux des autres nations étudiant la zone équatoriale du Pacifique (citons, à titre d'exemple, les 9 campagnes Eqpac américaines en 1992). Ce vaste projet international JGFOS Pacifique devrait permettre de mieux connaître le rôle de la zone d'enrichissement la plus étendue du globe dans le cycle du carbone et de préciser sa réponse aux variations climatiques, particulièrement marquées dans le Pacifique équatorial ouest ■

Robert Le Borgne
Département Terre, Océan, Atmosphère
UR "Environnement et ressources
hauturières"

*Dispositif immergé de récolte
des particules marines en cours
de sédimentation.
Photo : Martine Rodier*

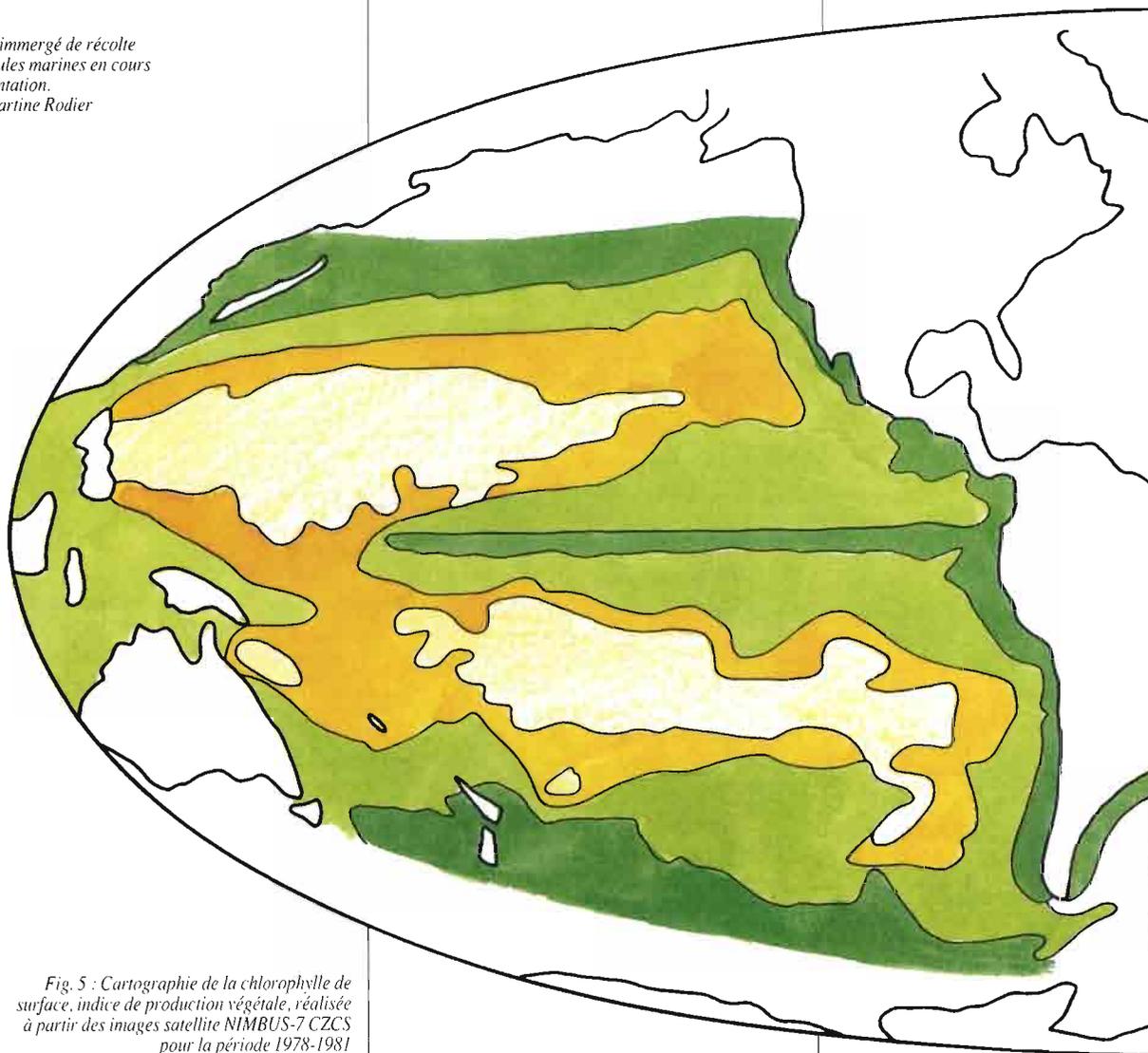


Fig. 5 : Cartographie de la chlorophylle de surface, indice de production végétale, réalisée à partir des images satellite NIMBUS-7 CZCS pour la période 1978-1981 (d'après Feldman, Nasa, 1989).

Mise à l'eau d'un filet à plancton pour l'étude des transferts de carbone entre couche superficielle et couches profondes par migrations verticales.
Photo : C. Dupouy

Pour en savoir plus

Blanchot J. et al. (1991). Proposition pour une participation au programme international JGFOS d'étude de la zone équatoriale du Pacifique : FLUX dans l'ouest du PACifique. Doc. multigraph. Centre Orstom de Nouméa, 50 p.

Blanchot J., Rodier M., Le Bouteiller A. (1991). Effect of El Niño Southern Oscillation events on the distribution and abundance of phytoplankton in the Western Pacific tropical ocean along 165° E. *Journal of Plankton Research*, 14 (1) : 137-156.

Dandonneau Y. (1986). Monitoring the surface chlorophyll concentration in the tropical Pacific : consequences of the 1982-83 El Niño. *Fishery Bulletin*, vol. 84, n°3, pp. 687-695. Response to El Niño signals of the epipelagic copepod populations in the eastern tropical Pacific. *Journal of Geophysical Research*, vol. 92, n°C13, pp. 14393-14403.

Donguy J.R., Hénin C. (1983). Fluctuations of the equatorial current system connected with the hydroclimatic conditions in the Western Pacific. *Océanographie tropicale*, vol.18, pp. 17-24.

Keeling C.D. et al. (1989). A three-dimensional model of atmospheric CO₂ transport based on observed winds : 1. Analysis of observational data. In : *Aspects of climate variability in the Pacific and Western Americas* (ed. D.H. Peterson), Geophysical Monographs of the American Geophysical Union, vol. 55, pp. 165-236.

Le Bouteiller A., Blanchot J., Rodier M. (1991). Size-distribution pattern of phytoplankton in the Western Pacific : towards a generalization for the tropical open ocean. *Deep-Sea Research* (sous presse).

Longhurst A.R., Harrison W.G. (1989). The biological pump : profiles of plankton production and consumption in the upper ocean. *Progress in Oceanography* vol. 22, pp. 47-123.

Oudot C., Andrié C., Montel Y. (1987). Evolution du CO₂ océanique et atmosphérique sur la période 1982-1984 dans l'Atlantique tropical. *Deep-Sea Research*, vol. 34, n°7, pp. 1107-1137.

SCOR/ICSU (1989). Report of the JGFOS Pacific planning workshop. Honolulu, September 1989. JGFOS report n°3, 69 pp.



The ocean - Earth's biggest carbon pool-Orstom's contribution to the international JGFOS programme

Our planet's carbon balance, CO₂ especially, is now a major focus of international concern - especially as regards the oceans, which constitute by far the biggest carbon pool on Earth. Two factors determine the CO₂ status of the ocean: movements of water masses (currents, convergence and upwelling) and that part of the carbon cycle that involves living things (the "biological pump"), which depends on nutrients brought up to the surface water by upwellings. The ocean currents are determined in turn by the trade winds. The Joint Global Flux Ocean Study (JGFOS) is studying the interactions between the oceans and adjacent environments - atmosphere, ocean floor and continental shores - and is concentrating on ocean regions that represent a range of different features. In the Atlantic, off the N-W coast of Africa, France-JGFOS is studying one coastal upwelling rich in nutrients for oceanic life, one tropical open ocean upwelling poor in

nutrients, and one intermediate situation. The Equatorial Pacific is of special interest, owing to its vast size, its carbon- and nutrient-rich zone of upwelling, and the periodic occurrence of El Niño, a weakening of the trade winds that disrupts the normal pattern. While the international program TOGA is studying the climatic mechanisms governing the trade winds, JGFOS is looking into the impact on CO₂ exchanges with the atmosphere and the "biological pump". Orstom's contribution here is FLUPAC, based at the Orstom center in Nouméa. FLUPAC is studying the western Equatorial Pacific zone - a region which includes the western limit of the nutrient-rich equatorial upwelling. Orstom knows this region well, and will be monitoring the enrichment zone and making a detailed study of the processes involved, eg. by measuring CO₂ fixation by photosynthesis, nutrient salt levels and carbon sedimentation.

Le Borgne Robert

L'Océan : réservoir et piège à carbone de la planète

ORSTOM Actualités, 1992, (36), p. 13-18. ISSN 0758-833X