



L'OCEAN AUSTRAL, MARE INCOGNITA

une source d'incertitudes sur le puits de CO₂

La quantification des flux air-mer de CO₂ aux échelles interannuelles jusqu'à quelques décennies est nécessaire si l'on veut préciser aujourd'hui, et prédire dans le futur, le rôle de l'océan vis-à-vis de l'accroissement des gaz à effet de serre, y compris les inventaires de carbone anthropique dans l'océan. De nombreuses régions de l'océan sont en voie d'être observées de façon pérenne pour acquérir des données de CO₂ océanique et estimer la variabilité des flux de CO₂ à l'interface air-mer. C'est notamment le cas de l'Atlantique nord et du Pacifique nord et équatorial. Pour les régions des hautes latitudes sud, l'océan Austral, la stratégie de mesure internationale est loin d'être organisée. Cela est principalement lié aux difficultés de déplacer souvent (en été comme en hiver) et longtemps des navires dans des régions difficiles d'accès, où l'utilisation de navires marchands est hors de propos et où la couverture nuageuse limite très fortement la qualité des observations satellitales. Cet effort doit toutefois être entrepris dans la mesure où d'une part, les zones australes présentent les incertitudes les plus importantes sur les estimations des flux de carbone contemporain, et que d'autre part la réponse de l'océan Austral serait particulièrement sensible à l'accroissement de l'effet de serre dû aux activités anthropiques : des changements notables sur les structures thermiques, sur la circulation océanique et sur l'activité biologique conduiraient à une répartition différente des sources et puits de CO₂ océaniques qu'il faut pouvoir observer dès maintenant. C'est ce qui est entrepris depuis 1998 à travers le programme d'observations OISO à bord du *Marion Dufresne*. Deux résultats importants sont présentés. L'un concerne les variations saisonnières des échanges de CO₂ dans l'océan Austral, peu observés jusqu'à présent, et qui suggèrent de réviser les bilans carbone dans les hautes latitudes sud. D'autre part, nous décrivons pour la première fois des variations interannuelles significatives des échanges air-mer de CO₂ depuis les régions subtropicales, jusqu'aux hautes latitudes. Certaines semblent associées à des événements climatiques intenses, comme l'ENSO de 1997-1998.

Nicolas Metz

Laboratoire de Biogéochimie et Chimie Marines
LBCM/IPSL, UPMC-CNRS, Case 134,
4 Place Jussieu 75252 Paris Cedex 05 - France
Email : metzl@ccr.jussieu.fr

15

Rapport d'activité PEV 2002

Observing and understanding the seasonal, interannual and decadal variations of the oceanic carbon cycle is crucial to better estimate the global carbon budget and to validate diagnostic and prognostic climate models. Several regions, such as the north atlantic or the north and tropical pacific, are now regularly sampled to obtain oceanic CO₂ data and estimate variabilities of the air-sea CO₂ fluxes. In the southern hemisphere, especially south of 40°S, the international strategy of such measurements is not yet accomplished, mostly because the use of merchant-ship is clearly not appropriate. However, long term monitoring of biogeochemistry in the Southern Ocean, including CO₂ data, is highly recommended because in this sector there are still very large uncertainties attached to the present knowledge of global carbon budget. On the other hand, the Southern Ocean is recognized to be very sensitive to climate change in the context of futur anthropogenic forcing. This concerns many processes, thermodynamic, circulation, mixing and biogeochemistry, all

that could change the distribution of ocean CO₂ sources and sinks, and that has to be observed as soon as possible. Since 1998, the OISO cruises conducted onboard the R.V. Marion Dufresne aims at obtaining repeated hydrological and biogeochemical observations in the Indian ocean, including the Indian sector of the Southern Ocean. Two important results are presented in this paper. Summer and winter OISO observations indicate that the Southern Ocean is not acting as a permanent CO₂ source or a sink. The observed seasonality of air-sea CO₂ fluxes suggests to revise previous annual carbon budget estimated through indirect methods. On the other hand, thanks to the regular sampling conducted during the period 1998-2002, we describe for the first time the interannual variability of the air-sea CO₂ fluxes in the southern hemisphere, from the subtropical zone to high latitudes. Interestingly, the observed interannual signal of both temperature and CO₂ could be associated to large-scale climatic events such as the strong ENSO event that occurred in 1997-1998.

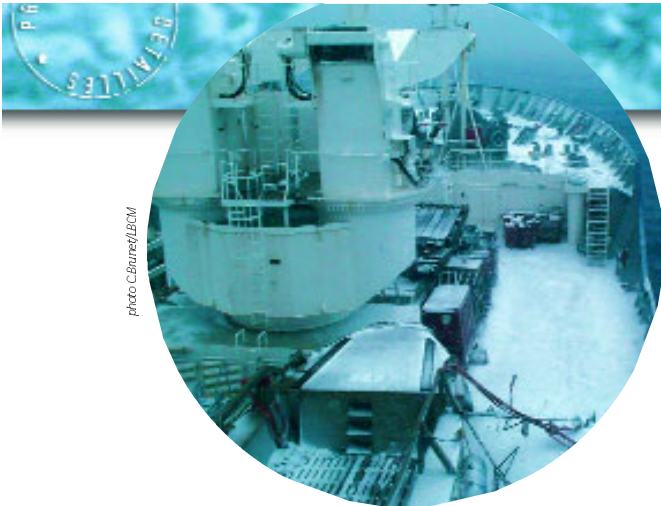


photo C.Barret/LBCM

Le Marion Dufresne à bord duquel sont réalisées les campagnes océanographiques OISO (Océan Indien Service d'Observations) dans le sud de l'Océan Indien.

L'AUGMENTATION DE L'EFFET DE SERRE : alarmes aujourd'hui, larmes demain ?

Depuis le début de l'ère industrielle, la concentration de gaz carbonique (CO₂) dans l'atmosphère a très fortement augmenté. A cette époque, la concentration de l'air était d'environ 280 ppm (ppm, partie par million). En 1958, lorsque des mesures systématiques ont été entreprises par l'américain Charles Keeling sur le site de Mauna Loa à Hawaii, la concentration de CO₂ dans l'air était de 316 ppm. En Février 2003, au cours d'une récente campagne OISO dans l'océan Indien sud, nous observons une concentration de CO₂ dans l'air proche de 372 ppm, soit près de 100 ppm de plus qu'il y a 100 ans. Dans quelques décennies, la perspective d'un doublement de CO₂ atmosphérique par rapport au niveau préindustriel devient une réalité : comment le climat va réagir à une telle transformation de la composition chimique de l'atmosphère, un changement brusque puisqu'il s'agit de variations 100 à 1 000 fois plus rapides que ce qui a été observé par le passé, au cours des cycles glaciaires inter-glaciaires (Petit et al., 1999). Cette perturbation devient une préoccupation majeure pour la société et une réponse sur le ou les risques probables de changement climatique est d'évidence attendue. Depuis l'holocène, force est de constater que nous entrons depuis un siècle dans une nouvelle ère, "l'anthropocène", qui traduit bien que l'homme est au centre du débat : si l'évolution du climat est probablement perturbée par l'utilisation galopante d'énergie, c'est aussi à l'homme, responsable, d'y répondre, par des décisions politiques et socio-économiques. Quand et comment réglementer pour ne pas dérégler ? Actuellement, il est prévu que l'accroissement de CO₂ dans l'atmosphère pourrait conduire à une augmentation de la température moyenne de la planète entre 1.5°C à 6°C d'ici à la fin du siècle (IPCC, 2001). Ces estimations sont déduites de modèles numériques qui souffrent en particulier d'un manque de données pour être pleinement qualifiés ou ne représentent pas encore correctement certains processus dynamiques, hydrologiques, voire biogéochimiques. Des rétroactions, positives ou négatives, mal ou non prises en compte, peuvent conduire à réviser ces estimations en réduisant les incertitudes, soit à la baisse ou, plus alarmant, à la hausse (des réchauffements planétaires moyens >6°C !). Les incertitudes sur l'impact de l'accroissement de l'effet de serre sur l'accélération du

réchauffement climatique, conduisent d'évidence à des ralentissements sur les décisions politiques (e.g. protocole de Kyoto).

Chaque année, entre 6 et 7 milliards de tonnes de carbone (environ 1 tonne de carbone par habitant et par an) sont injectées dans l'atmosphère via les activités humaines. Or, grâce aux mesures de CO₂ de l'air effectuées sur une soixantaine de stations, plus ou moins bien réparties dans les deux hémisphères, nous savons, qu'en moyenne, la moitié de ces émissions anthropiques reste accumulée dans l'atmosphère. L'autre moitié doit être absorbée par la biosphère terrestre et/ou par les océans. Cette répartition des "puits de carbone" régionaux est source d'incertitudes, même si des progrès significatifs ont été obtenus ces dernières années, notamment grâce à la représentation numérique des échanges entre les différents réservoirs de carbone, l'atmosphère, la végétation continentale et les sols, et l'océan. Actuellement et suivant les méthodes employées (modélisations océanique et atmosphérique, extrapolation d'observations éparses), les estimations du puits de CO₂ océanique global varient entre 1,5 et 3,7 GtC/an (Gigatonnes de Carbone par an), ce qui représente entre 20 et 50% des rejets anthropiques annuels. Les incertitudes actuelles sont, en particulier, liées au manque d'observations répétées à l'échelle régionale, et notamment dans les latitudes polaires de l'hémisphère sud (Gurney et al., 2002).

CLIMATS PASSE ET FUTUR : l'océan Austral serait-il un climatiseur ?

Les observations des paléoclimats obtenues grâce aux carottages des glaces antarctiques (notamment au site Vostok, Petit et al., 1999), indiquent sans conteste, que température et CO₂ varient de concert depuis 400 000 ans. Selon de nombreux auteurs, l'océan Austral (la zone océanique située au sud des quarantièmes rugissants) a pu jouer un rôle primordial pour expliquer la cohérence des cycles de température et de CO₂ révélés dans les bulles de glaces : une situation glaciaire froide pourrait augmenter la solubilité du gaz (pompage thermodynamique de CO₂) ou accroître les apports de matières nutritives nécessaires pour la photosynthèse (pompage biologique de CO₂) : c'est en effet dans l'océan Austral que siègent des remontées d'eaux profondes enrichies en sels nutritifs. La vérification de ces hypothèses est difficile, et des études doivent être poursuivies pour préciser ces scénarii paléoclimatiques. Concernant le climat futur, les prédictions

Préparation de la mise à l'eau de la CTD-Rosette à bord du Marion-Dufresne



photo M.Merz/LBCM



Mise à l'eau de la CTD-Rosette à bord du Marion-Dufresne durant une campagne OISO

des modèles numériques indiquent qu'à l'horizon 2050-2100, la réponse de l'océan Austral serait particulièrement sensible au changement climatique. Des variations significatives de la température et de la salinité, de la circulation verticale océanique et de l'activité biologique conduiraient à une répartition différente des sources et puits de CO₂ océanique, autant de facteurs qui changeraient dans le futur le rôle de l'océan en tant que régulateur de CO₂. Ces résultats doivent être considérés avec précautions car encore très incertains. En particulier, les représentations numériques de la vie marine sont actuellement très simplifiées. D'autre part, les vérifications de ces modèles (il s'agit de confronter l'océan numérique à l'océan réel, on parle ici de validation), sont loin d'être assurées, car les observations sont encore trop rares dans l'océan Austral. La comparaison entre différents modèles devient une nécessité pour conforter les conclusions concernant les prédictions du climat futur. Récemment, les modèles couplés de l'IPSL et du Hadley Center (UK) ont été comparés (Friedlingstein et al., 2003) : c'est précisément dans l'océan Austral que l'on rencontre les différences les plus importantes, notamment parce que les façons de paramétriser le couplage glace-océan, les processus de convection océanique ou l'activité biologique marine, sont différentes. Pour paramétriser correctement ces processus, il faut les comprendre et cela nécessite de mettre en place des programmes d'observations dédiés

DU PASSE AU FUTUR être présent en maintenant des réseaux d'observations.

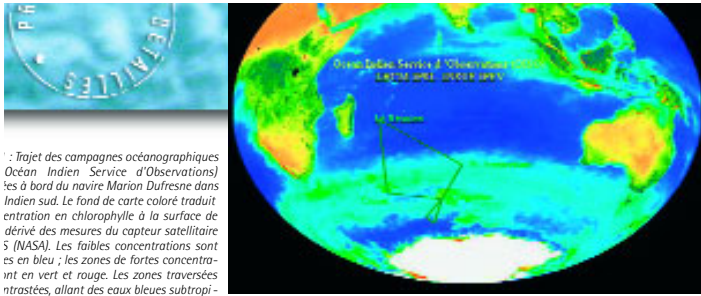
Si pour le climat passé, comme pour le climat futur, de nombreuses questions sont encore non résolues (par exemple la prise en compte des processus de fertilisation par le fer, cadre du projet de campagne océanographique KEOBS du programme national PROOF, ou mieux caractériser les diverses populations phytoplanctoniques et leurs évolutions), force est de constater que pour l'actuel, et contrairement à d'autres secteurs océaniques (Atlantique nord, Pacifique nord et Equatorial), le rôle de l'océan Austral en qualité de source ou puits de CO₂ est mal connu. Dans cette région éloignée, où les conditions météorologiques sont parfois extrêmes, où l'utilisation de navires marchands

est hors de propos, les observations in-situ sont rares. Les observations satellitales peuvent être utilisées, mais elles sont souvent masquées par une couverture nuageuse abondante, notamment en hiver. Il faut donc actuellement compter sur des méthodes indirectes (des modèles mathématiques qui représentent les échanges de carbone entre les réservoirs) pour estimer les flux de carbone, mais, et c'est un problème depuis maintenant 10 ans, suivant les approches employées, les résultats sont divergents : les méthodes diagnostiques basées sur les observations atmosphériques suggèrent que l'océan Austral serait une source de CO₂, tandis que la plupart des modèles océaniques composent numériquement des puits de CO₂ apparemment trop intenses par rapport aux rares observations. Des estimations basées sur les observations océaniques in-situ ont été récemment proposées à partir d'un travail de synthèse de mesures obtenues depuis une trentaine d'années par des équipes internationales, dont un nombre important des données françaises récoltées durant les campagnes menées à bord du *Marion Dufresne* dans l'océan Indien sud (programme MINERVE piloté au LBCM/Paris). Le résultat de la plus récente synthèse proposé par Takahashi et al. (2002), indique que l'océan Austral (au sud de 50°S) "pompe" annuellement entre 0,5 et 1 GtC/an ce qui représente environ 25 à 30 % du puits de carbone océanique global, qui serait de l'ordre de 1,5 à 3,7 GtC/an. Si on ajoute le puits de CO₂ océanique que nous avons estimé pour zone subantarctique (40°S-50°S) entre 0,5 et 1 GtC/an (Metzl et al., 1999), l'océan au sud de 40°S absorberait entre 1 et 2 GtC/an, soit jusqu'à 70% du puits océanique global. Avec le temps, cette zone, siège de formation d'eaux intermédiaires et profondes qui sont isolées de tout contact avec l'atmosphère sur au moins plusieurs décennies, devient de plus en plus intéressante dès lors que l'on s'intéresse à la régulation de l'accroissement de l'effet de serre.



photo G.Guigand/LBCM

La CTD-rosette est à l'eau. Cet instrument est utilisé durant les campagnes OISO pour récolter des échantillons d'eau de mer à différentes profondeurs, de la surface jusqu'à 5000m. Cela permet l'analyse du CO₂ dans l'océan et d'estimer l'accroissement de CO₂ dans l'océan à toute profondeur (photo G.Guigand/LBCM).



Trajet des campagnes océanographiques Océan Indien Service d'Observations) à bord du navire Marion Dufresne dans l'Indien sud. Le fond de carte coloré traduit l'entration en chlorophylle à la surface de dérivé des mesures du capteur satellitaire 5 (NASA). Les faibles concentrations sont en bleu, les zones de fortes concentrations en vert et rouge. Les zones traversées sont riches en phytoplancton dans la zone subantarctique, allant des eaux bleues subtropicales en passant par des eaux riches en phytoplancton dans la zone subantarctique entre le Sud et les Kerguelen. Au sud de Kerguelen, l'Océan Austral, les concentrations de surface en CO₂ sont plus faibles. L'analyse des mesures de CO₂ effectuées durant ces missions permet d'évaluer le rôle régulateur de l'océan vis-à-vis de l'augmentation du CO₂ dans l'air émis par les activités humaines depuis l'ère industrielle.

of the oceanographic cruises OISO (Océan Indien d'Observations - Indian Ocean Observation aboard the Research Vessel Marion Dufresne in the Indian Ocean. Colors represent chlorophyll concentrations at the surface of the ocean derived from measurements of SeaWiFS (NASA) satellite sensor. Low concentrations are indicated in blue, high concentrations in green and red. The cruise tracks crossed productivity zones from poor subtropical to water rich in phytoplankton in the subantarctic, between Southern Africa and Kerguelen Islands, in the Austral the surface chlorophyll concentrations are lower. Variation of the oceanic CO₂ concentrations during these cruises allows to specify the role of the ocean with respect to atmospheric increase due to human activities since the era.

La climatologie mensuelle globale du CO₂ dans les eaux de surface océanique qui a été composée par Takahashi et al (2002) représente un pas important pour contraindre les modèles atmosphériques et valider les modèles d'océan. Toutefois, ce travail de synthèse doit être amélioré pour deux raisons. Tout d'abord durant l'été austral, il est reconnu que l'activité biologique contrôle la variabilité des propriétés biogéochimiques marines, souvent déterminante à l'échelle de quelques kilomètres (on parle dans ce cas de variabilité à méso-échelle). Ainsi, même si la synthèse utilise un nombre assez important d'observations réalisées durant l'été austral,

l'établissement d'une moyenne régionale pour l'ensemble de l'océan Antarctique sous-estime très certainement la variabilité prononcée du CO₂ de l'eau de mer et donc des échanges de CO₂ à l'interface air-mer. Nous verrons plus loin avec les résultats des récentes campagnes OISO que d'une année à l'autre le puits de CO₂ océanique peut varier du simple au double. D'autre part, en hiver, l'extrapolation peut paraître encore douteuse puisque très peu d'observations sont actuellement disponibles : de nombreuses régions au sud de 50°S n'ont jamais été documentées en hiver austral. Il est donc impossible d'estimer les erreurs sur la méthode d'extrapolation utilisée, ce qui limite les interprétations déduites de ces climatologies.

NOUVELLES OBSERVATIONS l'océan Austral, un puits de CO₂ en été, mais une source en hiver.

Dans ce contexte, il nous a semblé important depuis quelques années de pouvoir conduire des séries de mesures dans l'océan Austral, tant en été qu'en hiver. C'est dans le cadre du Service d'Observation OISO (Océan Indien Service

d'Observations, projet soutenu par trois instituts français (IPEV, INSUE/CNRS et IPSL/UPMC) que sont poursuivis ces objectifs. Depuis 1998, des campagnes océanographiques bi-annuelles sont réalisées dans le secteur Sud de l'Océan Indien à bord du N.O. *Marion Dufresne*, Navire mixte d'Océanographie et de logistique, affrété par l'IPEV pour la recherche polaire et les TAAF pour les logistiques dans les îles subantarctiques françaises (voir le parcours Figure 1). C'est ainsi que plusieurs fois par an, le *Marion Dufresne* effectue un trajet régulier entre La Réunion, Crozet, Kerguelen et les îles St-Paul et Amsterdam. Au cours de ces missions, des mesures hydrologiques et biogéochimiques (dont le CO₂ dans l'eau de mer) sont effectuées en surface et sur la colonne d'eau (des informations complémentaires sur OISO et projets associés peuvent être consultés sur <http://lbmc.jussieu.fr>, <http://ipsl.jussieu.fr>). Pour les observations océanographiques ce parcours est remarquable puisqu'il permet de répéter les mesures dans la même zone, à différentes saisons et cela sur plusieurs années. Ces mesures représentent un complément régional aux mesures effectuées régulièrement par des collègues japonais (Pacifique Nord), anglais (Atlantique Nord),



Stand de mesure de CO₂ en continu dans le laboratoire à bord du Marion-Dufresne

américains (Pacifique Equatorial); sans oublier les travaux de coopérations entre le LBCM et les partenaires australiens (pour la zone Pacifique Sud-Ouest, programme MINERVE) et argentins (pour la Mer de Weddell, programme ARGAU). L'intérêt du parcours OISO est aussi de traverser les régions subtropicales, subantarctiques et antarctiques correspondant à des provinces biogéochimiques contrastées comme en témoignent la distribution des concentrations de chlorophylle de surface (Figure 1). De plus, au Sud de Kerguelen, dans le cadre de OISO, le navire est utilisé à profit scientifique lors des

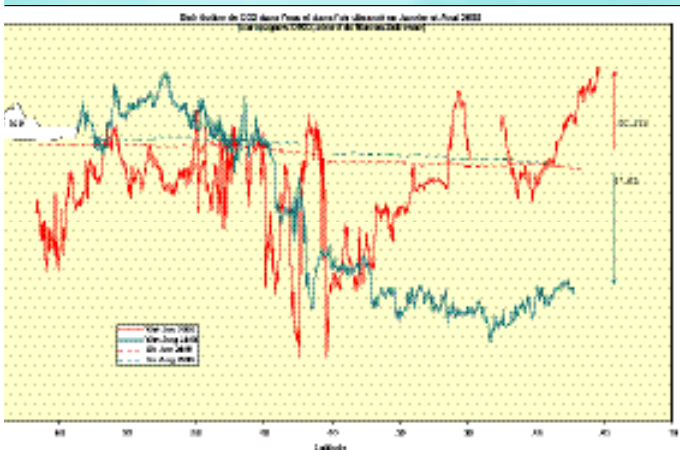
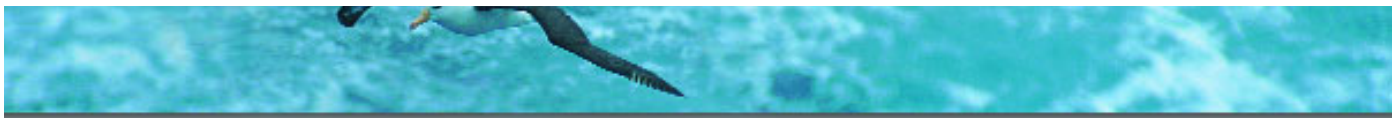


Figure 2 : Distribution de la fugacité de CO₂ dans l'océan (trait plein) et dans l'atmosphère (en pointillé) mesurées en continu depuis La Réunion et jusqu'à 60°S durant les campagnes OISO. Sont présentées ici les mesures effectuées en janvier 2000 (été austral, courbes rouges) et en août 2000 (hiver austral, courbes bleues). Les variations saisonnières du CO₂ océanique sont significatives et pilotent les variations des flux air-mer de CO₂. Les flèches à droite symbolisent le sens du flux, soit vers l'atmosphère (source), soit vers l'océan (puits) suivant que les concentrations de CO₂ des eaux de surface sont supérieures ou inférieures à celles mesurées dans l'air. Des processus couplés, thermodynamiques, mélanges turbulents et activité biologique sont à l'origine des variations spatio-temporelles observées du nord au sud. Ces observations aident en particulier à mieux paramétriser ces processus et leur couplage dans les modèles océaniques et climatiques.

Distribution of the CO₂ fugacity in the ocean (continuous lines) and in the atmosphere (dotted lines) measured in continuous from La Réunion Island to 60°S during the OISO campaigns. Fugacities measured in January 2000 (Austral winter) are represented by the red lines and fugacities obtained in August 2000 (Austral winter) are shown by the blue lines. Seasonal variation of oceanic CO₂ is significant and drives the variations of air-to-sea CO₂ flux. Arrows shown on the right of the figure symbolise the CO₂ flux direction, either towards the atmosphere (source) or towards the ocean (sink) depending on whether CO₂ concentration in surface water is higher or lower than that measured in the air. Coupled processes, thermodynamic, turbulent mixing and biological activity, generates space-time variations observed from North towards South. These observations particularly contribute to a better paramétrisation of these processes and of their coupling in oceanic and climatic models.



logistiques à Port-aux-Français, pour effectuer des observations dans l'océan Austral jusqu'à la zone saisonnière de glace (l'extension de la glace de mer est maximale en hiver vers 58°S dans ce secteur). En particulier, le site KERFIX situé au-delà de 50°S au sud-ouest de Kerguelen est régulièrement visité. Cette station hydrologique avait été mis en place par A. Poisson (LBCM) dans le cadre du programme international WOCE (World Ocean Circulation Experiment), puis maintenue par C. Jeandel (LEGOS) dans le cadre de JGOFS (Joint Global Ocean Flux Study). Les données OISO acquises depuis 1998 vont permettre de poursuivre la série de mesures biogéochimiques effectuée à bord de *La Curieuse* entre 1990 et 1995 et étudier la variabilité décennale de la région.

Grâce à ce parcours régulier, nous pouvons ainsi documenter saisonnièrement et d'une année à l'autre différents secteurs océaniques où les concentrations de CO₂ dans l'eau de mer sont très variables (Figure 2), des variations gouvernées par différents processus dynamique, thermodynamique et biologique. Chaque année des variations saisonnières significatives sont effectivement observées sur l'ensemble des propriétés océaniques mesurées à bord, dont le carbone inorganique total dissous et la fugacité de CO₂ ou pression partielle de CO₂, pCO₂ qui pilotent les échanges air-mer de CO₂ (Figure 2). Dans la zone subtropicale, entre 20°S et 35°S, les variations saisonnières de pCO₂ sont importantes ; dans cette région, c'est en hiver austral, lorsque la température est diminuée que les pCO₂ océaniques sont sous-saturés et que l'océan agit en qualité de puits de CO₂. Dans la zone frontale, entre 35°S et 50°S, les variations de pCO₂ sont très marquées par l'empreinte de l'activité biologique (la production primaire) : les pressions partielles de CO₂ dans l'océan diminuent lorsque la biomasse marine est élevée. On remarquera que les distributions méridiennes de pCO₂ reflètent une variabilité très prononcée à méso-échelle, notamment en été lorsque la photosynthèse est plus active. En moyenne, la zone subantarctique est un puits de CO₂ en été comme en hiver, mais il n'est pas rare d'observer localement des niveaux de pCO₂ sur-saturés (par exemple à 42°S et 45°S, sur la Figure 2). Dans l'océan Austral, au sud de 50°S, l'amplitude saisonnière, apparaît moins importante que dans les autres régions biogéochimiques. Toutefois, cette amplitude est suffisante

pour indiquer que l'océan Austral n'agit pas de façon permanente en qualité de puits ou de source de CO₂ (Figure 3) puisque d'une saison à l'autre les niveaux de concentrations dans l'océan sont soit au-dessus ou soit en-dessous des niveaux de CO₂ dans l'air. Les mesures hydrologiques et biologiques, également effectuées à bord du navire, ainsi que l'utilisation d'un modèle numérique dédié à la zone étudiée, permettent d'expliquer les origines de ces variations (Metzl et al., 2001). En été austral, les faibles concentrations de CO₂ dans l'eau sont principalement régulées par l'activité biologique (consommation de CO₂ par photosynthèse). En hiver, les sur-saturations sont liées à un apport dynamique de CO₂ depuis les couches océaniques de subsurface. On observe enfin que les variations saisonnières dans l'océan sont bien plus élevées que dans l'air. C'est l'océan, la dynamique et la vie marine, qui pilotent les variations des échanges de CO₂ à l'interface air-mer.



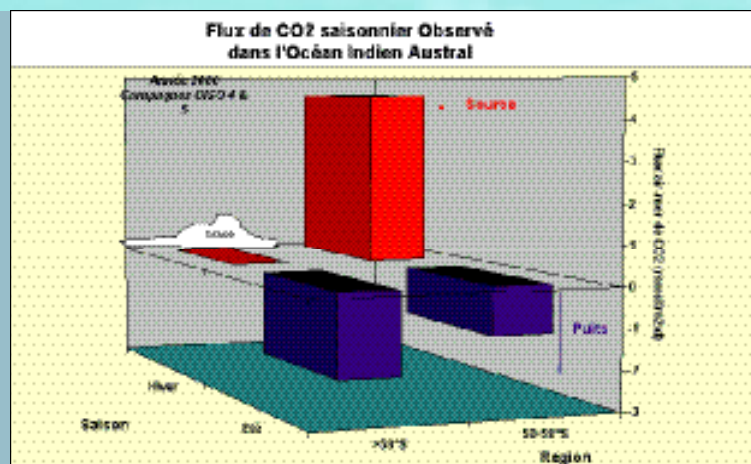
Le Marion Dufresne à bord duquel sont réalisées les campagnes océanographiques OISO (Océan Indien Service d'Observations) dans le sud de l'océan Indien. Ici, le navire au mouillage à Crozet.

MARE INCOGNITA : Mare numerica ne suffit pas.

Actuellement, aucun modèle de l'océan global ne rend compte des variations de CO₂ telles que nous les avons observées dans le sud de l'océan Indien (dans le cadre des projets international IGBP/OCMIP, et européen NOCES, les données OISO ont été récemment comparées à 13 modèles internationaux, aucun n'épouse correctement les observations). Pour assurer la qualification des modèles de climat qui intègrent maintenant la composante carbone (la biosphère continentale et la biosphère marine), il devient urgent d'assurer la pérennité des sites d'observations et de mettre en place de plus nombreux réseaux d'observations océaniques notamment en biogéochimie. Déjà, grâce à des mesures récentes, effectuées dans le cadre des programmes internationaux océanographiques WOCE et JGOFS dans les années 1990, et qui ont réoccupé des sites

Figure 3 : Flux air-mer de CO₂ (en mmol/m²/j) estimés dans l'océan Austral à partir des données OISO de janvier et août 2000. En été austral, toute la zone au sud de 50°S est un puits de CO₂ (en bleu). Par contre, en hiver austral, la zone ouverte océanique (non englacée, 50-58°S) devient une source très importante (en rouge). Ces résultats suggèrent de réviser les estimations des flux air-mer de CO₂ dans l'océan Austral, jusqu'à présent basées uniquement sur des observations obtenues en été austral.

Air-to-sea fluxes of CO₂ (in mmol/m²/j) estimated in the Austral Ocean from OISO data obtained in January and in August 2000. During Austral summer, the whole zone south to 50°S is a sink of CO₂ (in blue). On the other hand, during Austral winter the oceanic open zone (not ice covered, 50-58°S) becomes a very significant CO₂ source (in red). The results inspire revising the estimates of air-to-sea CO₂ fluxes in the Austral Ocean, based only on observations obtained during Austral summer until now.





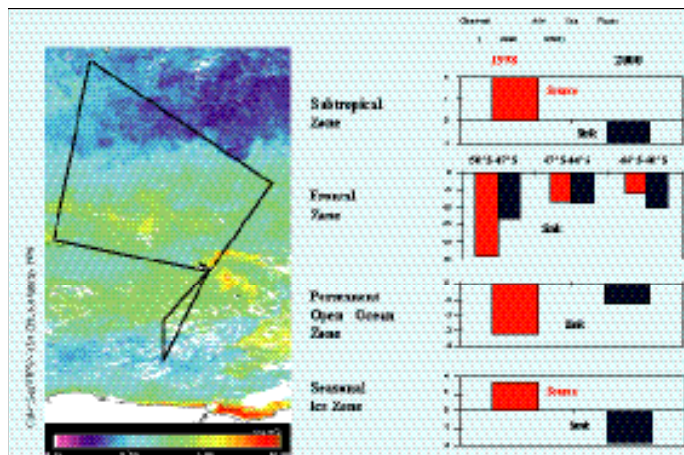
Références bibliographiques

observés, il y a vingt ou trente ans, on sait que le gaz carbonique a augmenté dans certains secteurs de l'océan, mais pour l'instant, cet accroissement n'est pas clairement observé dans l'océan Austral. Lorsque l'océan sera mieux documenté et sur plusieurs années, nous pourrions certainement percevoir les changements et évolutions des compositions chimiques et des concentrations en CO₂, voire des espèces marines, de la même façon qu'on a observé des tendances de réchauffement océanique global à partir des observations de température depuis 1950 (Levitus et al, 2000). Pour la période la plus récente, il est également suggéré que l'océan Austral a été depuis 1994 le théâtre d'un réchauffement en surface significatif, avec des estimations locales pouvant atteindre +2°C entre 1993 et 1999 (Cabanes et al., 2001). Lors de notre première campagne OISO en janvier 1998 (soit juste après le fort événement El Niño de 1997), nous avons effectivement observé des températures de l'océan anormalement élevées au sud de Kerguelen et ce jusqu'au pack antarctique, avec des conséquences notables sur les échanges de CO₂ à l'interface air-mer (Jabaud-Jan et al., 2003, voir figure 4). Température et CO₂ deux propriétés étroitement couplées. Sans un travail complet de validation des modèles numériques sur les cycles de chaleur et du carbone, on ne peut affirmer aujourd'hui que les simulations climatiques futures ne sont pas sous-évaluées. Une chose est sûre, il ne faut pas aujourd'hui sous-évaluer les moyens humains et instrumentaux à mettre en œuvre pour réduire ces incertitudes.

- Cabanes, C., A. Cazenave and C. Le Provost, 2001. Sea level change from Topex-Poseidon altimetry for 1993-1999 and possible warming of the Southern Oceans. *Geophys. Res. Lett.*, 28, 1, 9-12.
- Friedlingstein, P., J.L. Dufresne, P. Cox and P. Rayner, 2001. How positive is the feedback between climate change and the carbon cycle? *Tellus*, 55B, 692-700.
- Gurney, K., R. Law, S. Denning, P. Rayner, D. Baker, et al, 2002. Towards robust regional estimates of CO₂ sources and sinks using atmospheric transport models. *Nature*, 415, 626-630.
- IPCC, 2001. *Climate Change: The Scientific Basis, Third Assessment Report* (édité par J.T. Houghton and D. Yihui). Cambridge University Press, Cambridge, U. K.
- Jabaud A., N. Metzl, C. Brunet, A. Poisson and B. Schauer, 2003. Variability of the Carbon Dioxide System in the Southern Indian Ocean (20°S-60°S): the impact of a warm anomaly in austral summer 1998. *Global Biogeochemical Cycles* (in press).
- Levitus S., J. I. Antonov, T. P. Boyer and Cathy Stephens, *Warming of the World Ocean*, *Science*, 287, 2225-2229, 2000.
- Metzl, N., B. Tilbrook and A. Poisson, 1999. The annual fCO₂ cycle and the air-sea CO₂ flux in the sub-Antarctic Ocean. *Tellus*, 51B, 4, 849-861.
- Metzl, N., C. Brunet, A. Jabaud, A. Poisson and B. Schauer, 2001. Summer and Winter Air-Sea CO₂ Fluxes in the Southern Ocean. *Proceedings of Sixth International Carbon Dioxide Conference*, vol. 2, pp 685-688.
- Petit, J.R., J. Jouzel, D. Raynaud, N. I. Barkov, J.M. Barnola, et al., *Climate and atmospheric history of the past 42000 years from the Vostok ice core, Antarctica*. *Nature*, 399, 429-436
- Takahashi, T., S. C. Sutherland, C. Sweeney, A. Poisson, N. Metzl, et al. 2002. *Global Sea-Air CO₂ Flux Based on Climatological Surface Ocean pCO₂, and Seasonal Biological and Temperature Effect*. *Deep Sea Res. II*, Vol 49, N 9-10, 1601-1622.

Figure 4 : A droite sont présentés les estimations des flux air-mer de CO₂ (en mmol/m²/j) estimés pour deux périodes, Janvier 1998 et Janvier 2000 en moyenne dans la zone subtropicale (20-35°S), zone frontale (35-50°S), et l'océan austral séparé en deux régions (50-58°S et 58-61°S). Ces zones sont repérables sur la carte par des concentrations de chlorophylle (données du capteur SeaWiFS/NASA) de surface variables. On a également représenté le trajet OISO réoccupé à ces deux périodes. On remarquera les changements importants des sources et puits de CO₂ entre les deux périodes, tant dans la zone subtropicale que dans l'océan Austral.

On the right the estimates of air-to-sea CO₂ flux (in mmol/m²/j) are represented for two periods, January 1998 and January 2000, averaged in the subtropical zone (20-35°S), in the frontal zone (35-50°S) and in two areas of the Austral Ocean (50-58°S and 58-61°S). These zones can be located on the map by the variable chlorophyll concentrations (data from the SeaWiFS/NASA sensor). The OISO tracks re-sampled at these two periods are also represented. One will notice the significant changes in CO₂ sources and sinks between the two periods, in the subtropical zone as well as in the Austral Ocean.



Remerciements >>>

De nombreuses personnes ont contribué à assurer la réalisation de l'Observatoire OISO. Je voudrais remercier Mr. G. Jugie et Y. Balut (IPEV) pour avoir permis d'assurer la programmation des campagnes. Au sein de nombreux comités scientifiques, Catherine Jeandel a toujours témoigné beaucoup d'intérêts pour ce projet. La réussite de ces campagnes ne pourrait être accomplie sans les qualités professionnelles et humaines des équipages, ingénieurs, techniciens qui partagent ces missions répétées. Je tiens tout particulièrement à remercier les commandants R. Gauthier, G. Foubert et F. Robic, les équipages du *Marion Dufresne* ainsi que les responsables d'opérations durant les logistiques hivernales des TAAF, notamment H. Gouge pour l'intérêt qu'il a su porter à nos travaux. De très chaleureux remerciements à l'équipe Océano de l'IPEV, en particulier B. Ollivier, J. Hoffmann, A. Jaouen, P. Sangiardi, M. Mellet et F. Rigaud pour leurs aides permanentes au cours des campagnes OISO réalisées depuis 1998.