

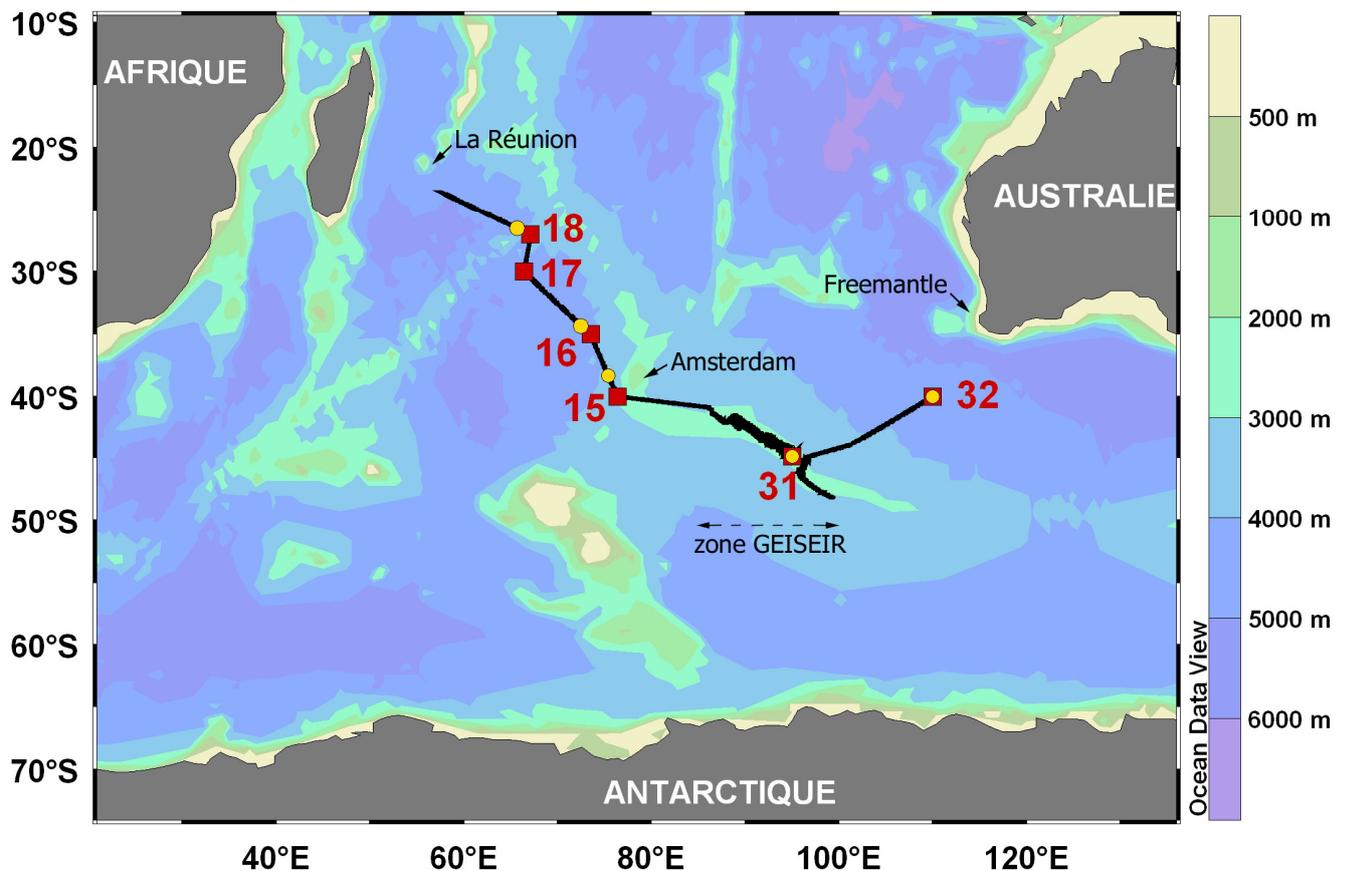
CARAUS/OISO

Observatoire de Recherche en Environnement : Carbone Austral
Service d'Observation de l'Océan Indien

LOCEAN-IPSL-IPEV-INSU

Rapport préliminaire de l'observatoire CARAUS/OISO-17

A bord du Marion Dufresne (IPEV),
campagne MD171-GEISEIR
du 3 Janvier au 12 Février 2009



Carte situant les mesures OISO17 dans les eaux de surface (en noir, données collectées en continu et semi continu, complétées par des mesures de CO₂ dans l'air) et les mesures dans la colonne d'eau au niveau des six stations hydrologiques (carrés rouges). Des profils d'atténuation de la lumière (PAR) ont été réalisés en même temps ou a proximité des stations hydrologiques (ronds jaunes).

AVANT-PROPOS

- Contexte scientifique -

Depuis bientôt cinquante ans, l'augmentation régulière et de plus en plus rapide des concentrations de gaz carbonique (CO₂) dans l'atmosphère est bien observée notamment grâce au réseau mondial de mesures en chimie atmosphérique. Cette augmentation, liée en très grande partie à la combustion des combustibles fossiles et à la modification de l'utilisation des sols, a pour conséquence d'augmenter l'effet de serre des basses couches de l'atmosphère ce qui se traduit par un réchauffement global de la planète et des conséquences climatiques perceptibles mais encore incertaines (IPCC, 2007). Les émissions ne vont pas en diminuant, bien au contraire. Il a été récemment constaté qu'elles se sont fortement accélérées, passant d'environ 6 PgC/an dans les années 90 à près de 8 PgC/an en 2005 (Raupach et al., 2007), et jusqu'à 9.9 PgC/an en 2006 (Canadell et al., 2007) ; cette augmentation des émissions est plus rapide encore que le plus pessimiste des scénarios retenus par l'IPCC pour simuler les prédictions climatiques.

Une partie, environ la moitié, des rejets anthropiques de CO₂ ne reste pas dans l'atmosphère et est piégée par les océans et les surfaces continentales. Contrairement à l'enveloppe atmosphérique, ces deux réservoirs présentent des distributions de CO₂ extrêmement variables dans le temps et l'espace, en raison notamment des composantes biosphériques, des transferts chimiques, des contrastes thermodynamiques, sans compter les milieux très diversifiés composés par les zones côtières, autant de facteurs qui induisent des imprécisions sur les estimations des flux de carbone échangés entre les compartiments atmosphérique, océanique et continental. Réduire ces incertitudes aux échelles globale et régionales représente un défi pour notre communauté, pour non seulement mieux comprendre le cycle du carbone et ses interactions mais aussi répondre aux attentes politiques (e.g. protocole de Kyoto, Conférence de Bali, Décembre 2007).

La complexité des couplages entre processus physique, chimique et biologique rend aussi très délicate la prédiction de l'évolution de ces flux dans le contexte d'un changement climatique et de bouleversement chimique, voire biologique. Grâce aux observations paléoclimatiques, ainsi qu'aux premières observations menées à grande échelle dans l'océan, on sait aujourd'hui que l'océan, qui contient environ 50 fois plus de carbone que l'atmosphère, a joué et joue encore un rôle de régulateur vis-à-vis des variations de CO₂ dans l'air. A l'heure actuelle, l'océan mondial absorberait chaque année environ 1.5 à 2.5 PgC/an (Le Quéré et Metzl, 2003; Takahashi et al., 2002, 2009), ce qui représente jusqu'à 40% des rejets anthropiques de CO₂. Son rôle dans le futur sera sans doute déterminant pour le climat planétaire, soit en qualité de régulateur si l'océan continue à piéger le CO₂ en excès, soit, ce qui est moins réjouissant, en qualité d'amplificateur du réchauffement si les processus de réaction océanique réduisent sa capacité à absorber le CO₂ atmosphérique, comme nous l'avons récemment observé dans l'Océan Austral (Le Quéré et al., Science, 2007; Metzl, 2008).

- Contexte international -

Jusqu'à dans les années 80, très peu de mesures répétitives de carbone inorganique dissous (CT), de l'alcalinité (AT) et de la pression partielle de CO₂ (pCO₂) existaient pour le compartiment océan. Dans les années 90 les expériences internationales WOCE et JGOFS ont

permis d'accroître considérablement ces observations. Les résultats de ces expériences associées à d'autres mesures sur le terrain ont, en particulier, permis d'établir une première climatologie mondiale des flux air-mer de CO₂ (Takahashi et al., 2002) permettant de valider les modèles océaniques et contraindre les méthodes d'inversions atmosphériques (e.g. Bousquet et al., 2000; Metzl, 2008). Elles ont aussi montré que la variabilité des flux air-mer de CO₂ pouvait être importante notamment dans le secteur du Pacifique Equatorial en liaison avec ENSO (Feely et al., 2002; Ishii et al., 2009) ou plus récemment dans les hautes latitudes sud (S.O. OISO, Metzl, 2005a,b; 2008) en liaison avec les changements climatiques (Le Quéré et al., 2007; Metzl, 2008). La synthèse des données acquises durant WOCE/JGOFS ont enfin permis de dresser pour la première fois un inventaire de carbone anthropique dans l'océan mondial (Sabine et al., 2004) avec, il faut le noter, de grandes incertitudes dans l'Océan Austral (Lo Monaco et al., 2005a,b ; Vasquez et al., 2009).

Fort de cet élan initié durant les années 90, la communauté internationale a décidé de renforcer ce type d'observations, tant sur les séries de surface (cadre du programme SOLAS/IGBP) que sur la colonne d'eau (cadre de CLIVAR/WCRP et IMBER/IGBP). Ces observations, accompagnées de travaux de synthèses, globale ou régionales, permettent d'acquérir des informations déterminantes sur l'état du système biogéochimique dans l'océan, sa variabilité et son évolution (suivre l'accroissement du CO₂ dans les eaux de surface), comment l'océan régule l'accroissement du CO₂ atmosphérique (piégeage du CO₂), voire de quelle manière il subit les impacts anthropiques (acidification et déplacement des niveaux de saturation des carbonates). L'ensemble des projets d'observations et leurs synthèses sont aujourd'hui coordonnés au niveau international dans le cadre d'IOCCP et du groupe SOLAS-IMBER-CARBON (figure 1, Metzl et al., 2007).

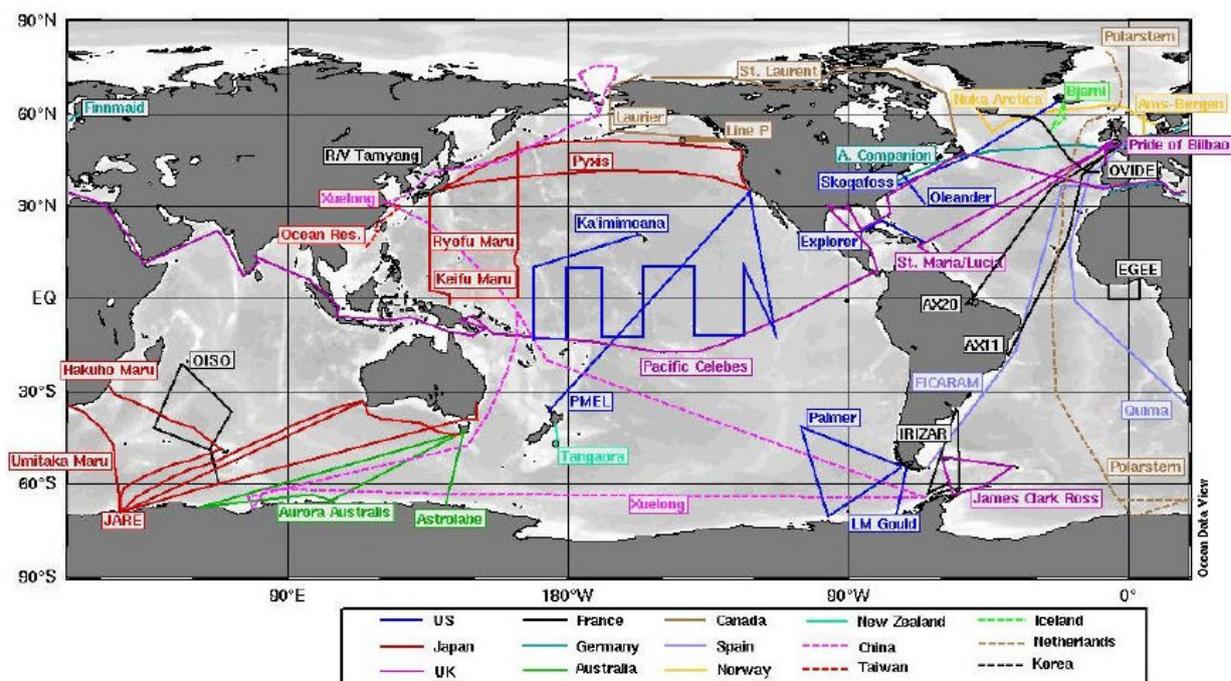


Figure 1 : Compilation des séries de mesures de surface de CO₂ au niveau mondial. Le S.O. OISO complète les observations dans l'Océan Indien Sud et le secteur Antarctique correspondant. Les lignes rouges (Japon) dans l'Océan Indien Sud sont nouvelles et non répétitives. Figure extraite du rapport IOCCP, www.ioc.unesco.org/ioccp/pCO2_2007.htm (Metzl et al., 2007)

- Objectifs du Service d'Observation OISO -

Le S.O. OISO (Océan Indien Service d'Observation) a été labellisé Service d'Observation par l'Institut National des Sciences de l'Univers en Juillet 1997. Ce réseau couplé d'observations océaniques et atmosphériques à long terme a pour objectif d'étudier la variabilité spatio-temporelle du cycle du CO₂ océanique, les échanges air-mer de CO₂ associés, ainsi que de détecter le CO₂ anthropique dans l'océan et d'analyser son évolution décennale en zones subtropicale, subantarctique et australe. L'observation et la compréhension des variations saisonnière, interannuelle et décennale du cycle du carbone océanique sont primordiales pour estimer les bilans contemporains de carbone à l'échelle planétaire (bilan des flux de CO₂ air-mer, inventaire de CO₂ anthropique) et, d'autre part, pour paramétrer puis valider les modèles climatiques prédictifs (modèles couplés climat/carbone, scénario IPCC).

Toutes les campagnes OISO, conduites à bord du Marion Dufresne (IPEV/TAAF), sont programmées dans l'Océan Indien Sud et le secteur Antarctique correspondant. Depuis 2003, le S.O. OISO est associé au programme MINERVE conduit à bord de l'Astrolabe (IPEV, trajet Tasmanie - Terre Adélie) dans le cadre d'un Observatoire de Recherche en Environnement, l'O.R.E. CARAUS (Carbone Austral), qui vise à maintenir sur une longue durée l'observation des propriétés océaniques et atmosphériques liées au cycle du carbone dans l'Océan Austral. Au niveau international, notamment pour la connaissance des flux air-mer de CO₂ à l'échelle planétaire et les inventaires de CO₂ anthropique, les observations CARAUS/OISO sont complémentaires des mesures réalisées dans d'autres secteurs océaniques par des partenaires étrangers (figure 1).

La réussite de cette mission est celle de toutes et tous à bord.

Nous tenons à remercier vivement le commandant François Duchene et tout l'équipage du Marion Dufresne. De la machine à la passerelle ou sur le pont, en cuisine, au restaurant, français ou malgaches, nous avons bénéficié de leur efficacité et apprécié leur enthousiasme.

Nos remerciements vont également à Bernard Ollivier, responsable des opérations, Pierre Sangiardi et Xavier Morin (IPEV) dont l'aide permanente a été précieuse.

Enfin nous ne saurions oublier de remercier Christophe Hémond, chef de la mission GEISEIR, avec lequel nous avons collaboré en harmonie pour mener à bien les deux programmes, ainsi que toute l'équipe GEISEIR et le Docteur Gaële Bonnard pour leur amitié.

Merci à tous pour la bonne humeur qui n'a pas quitté le navire malgré les caprices de l'océan.

A bord, le 12 Février 2009
Claire Lo Monaco, Coordinatrice O.R.E. CARAUS

CAMPAGNE OISO17

- Liste des participants -

Equipe OISO

Christian Brunet (LOCEAN-IPSL, Paris)
Claire Lo Monaco (LOCEAN-IPSL, Paris)
Claude Mignon (LOCEAN-IPSL, Paris)
Doris Thuillier (LOCEAN-IPSL, Paris)
Virginie Racapé (LOCEAN-IPSL, Paris)
Céline Ridame (LOCEAN-IPSL, Paris)

Equipe IPEV

Xavier Morin (IPEV, Brest)
Bernard Ollivier, OPEA (IPEV, Brest)
Pierre Sangiardi (IPEV, Brest)

LOCEAN: Laboratoire d'Océanographie et du Climat : Expérimentations et Analyse Numérique
IPSL: Institut Pierre Simon Laplace
IPEV: Institut Français Paul Emile Victor

1. Stratégie de la campagne OISO17

La campagne OISO17 s'est déroulée du 3 Janvier au 12 Février 2009 à bord du Marion Dufresne (IPEV, campagne MD171), conjointement au programme GEISEIR (étude des hétérogénéités isotopiques de la ride Sud-Est Indienne). Pour cette campagne, qui fait suite à dix années de mesures OISO dans l'Océan Indien Sud, la stratégie de mesure a été adaptée au trajet du navire au départ de La Réunion, en direction de la ride Sud-Est Indienne. Cette première partie du trajet a permis de répéter la radiale Réunion-Amsterdam déjà réalisée à sept reprises depuis le début du programme OISO en janvier 1998, mais qui n'avait pas été revisitée depuis 2002. La suite du trajet, en vue des travaux effectués sur la dorsale Sud-Est Indienne pour le programme GEISEIR, et le retour vers Freemantle ont été l'occasion de couvrir de larges zones encore inexplorées en terme de CO₂ (figure 2).

Des mesures hydrologiques ont été effectuées dans les eaux de surface sur l'ensemble du trajet, mais également dans la colonne d'eau au niveau de six stations hydrologiques qui sont soit des répétitions de stations OISO (radiale Réunion-Amsterdam), soit des répétitions de stations historiques (GEOSECS en 1978, INDIGO1 en 1985 et WOCE 1995) (figure 3). Pour la première fois au cours des campagnes OISO, des mesures de production primaire ont été réalisées sur la colonne d'eau aux six stations OISO et en surface durant l'ensemble du trajet. Pour la première fois également dans cette région océanique, des échantillons d'eau de mer (surface et couche euphotique) ont été prélevés afin de détecter la présence éventuelle d'organismes phytoplanctoniques diazotrophes (i.e utilisant l'azote moléculaire dissous N₂ comme source d'azote inorganique dissous) et d'évaluer ainsi leur contribution dans le pompage biologique du CO₂ dans cette région. En effet, la diazotrophie ou fixation d'azote atmosphérique, joue un rôle central, à l'échelle globale, dans les systèmes oligotrophes où elle assure un apport significatif d'azote "nouveau" dans les eaux de surface contribuant alors à la production nouvelle et à la production exportée (Capone et al., 1997). La fixation de N₂ peut alimenter jusqu'à la moitié de la production nouvelle dans le Pacifique nord, comme l'ont montré Karl et al. (1997). Ce processus a été étudié dans divers océans mais à l'heure actuelle, aucune donnée n'est disponible concernant l'océan Indien. La campagne OISO permettra donc de caractériser et quantifier ce processus dans l'océan Indien afin d'en établir son importance et sa contribution dans le piégeage biologique du CO₂.

Les observations recueillies permettront d'approfondir la connaissance des flux air-mer de CO₂ (variabilité spatiale et temporelle), apporteront des informations nouvelles sur la pompe biologique de CO₂ (production primaire, fixation d'azote) et compléteront les séries de mesures internationales qui servent de base aux études sur la variabilité décennale du carbone dans l'océan (variabilité naturelle et accumulation de carbone anthropique).

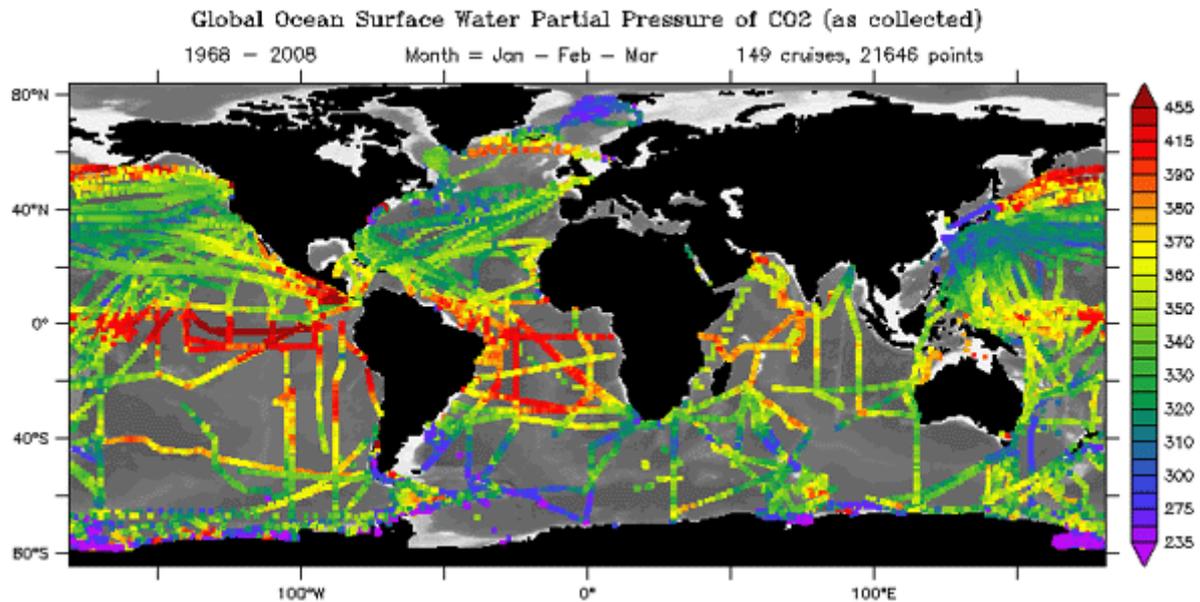


Figure 2 : Données mondiales de pCO₂ collectées dans les eaux de surface en été austral (Janvier -Mars) depuis 1968, incluant les données OISO (compilation réalisée par Takahashi et al., 2009).

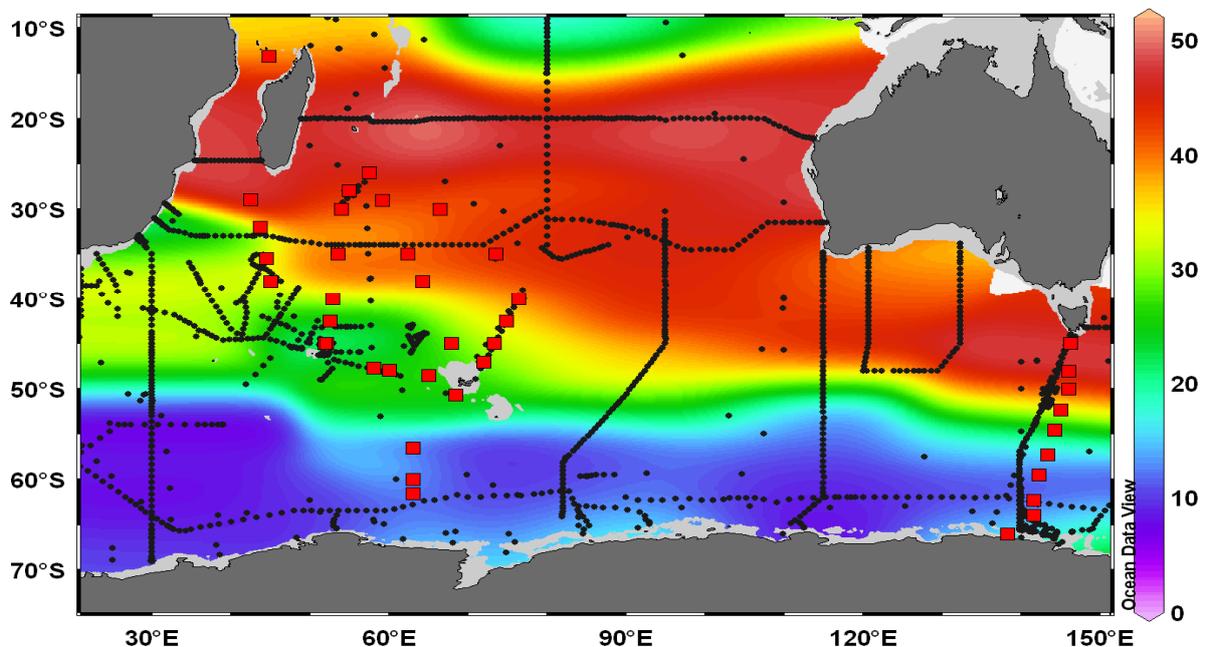


Figure 3 : Accumulation de carbone anthropique à 500m de profondeur estimée à partir d'observations recueillies dans les années 90 pendant les campagnes WOCE et OISO. Les stations OISO (en rouge) complètent idéalement le réseau international (en noir, bases de données GLODAP sur la période 1978-1996 et CARINA sur la période 1992-2005).

2. Détail des opérations OISO17

Les observations recueillies pendant la campagne OISO17 peuvent être classées en 5 groupes selon qu'elles aient été acquises en surface ou dans la colonne d'eau, en continu ou semi-continu.

- Liste des paramètres mesurés - (*paramètres mesurés à bord)

- Par pompage des eaux de surface (en continu) :
 - hydrologie : température*, salinité*
 - pression partielle de CO₂ (pCO₂) dans l'eau* (et dans l'air*)
 - carbone inorganique dissous (TCO₂)* et alcalinité totale (TA)*
 - oxygène*
 - fluorescence*

- Par prélèvements de surface toutes les 4 à 8 heures :
 - salinité (pour calibration du thermosalinographe)
 - oxygène* (pour calibration de l'optode)
 - chlorophylle-*a* (pour calibration du fluorimètre) et pigments chlorophylliens (Divinyl chl_a, chlorophylle-*b*, chlorophylle-*c*, pheophytine...)
 - sels nutritifs (nitrates, silicates, phosphates)
 - isotopes stables du CO₂ ($\delta^{13}\text{C}$) et de H₂O ($\delta^{18}\text{O}$)

- Par prélèvements de surface toutes les 24 heures :
 - production primaire (à l'aide de l'isotope stable ¹³C)
 - fixation d'azote atmosphérique par les cyanobactéries diazotrophes (à l'aide de l'isotope stable ¹⁵N₂)
 - concentration de phycoérythrine (pigment caractéristique des cyanobactéries)
 - carbone et azote particulaires

- Par prélèvements dans la colonne d'eau (stations) :
 - salinité
 - carbone inorganique dissous (TCO₂)* et alcalinité totale (TA)*
 - oxygène*
 - chlorophylle-*a* et pigments chlorophylliens
 - sels nutritifs (nitrates, silicates, phosphates)
 - isotope stable du CO₂ ($\delta^{13}\text{C}$) et de H₂O ($\delta^{18}\text{O}$)
 - production primaire
 - fixation d'azote atmosphérique
 - concentration de phycoérythrine
 - carbone et azote particulaires

- En route :
 - observations météo (P atm, vent, mer, ciel)*
 - ADCP*
 - bathymétrie*

3.1. Mesures de surface

Des observations de surface en continu ont été acquises sur l'ensemble du trajet, incluant des mesures de CO₂ en continu auxquelles s'ajoutent des mesures régulières de CO₂ atmosphérique. En complément de ces analyses automatiques, des échantillons d'eau de surface ont été prélevés toutes les 4 à 24 heures pour réaliser des analyses manuelles, soit directement à bord ou de retour à terre (voir ci-dessus : Liste des paramètres mesurés).

3.2. Mesures en station

Des mesures ont été réalisées dans la colonne d'eau au niveau de six stations hydrologiques (voir ci-dessous Tableau des stations). Les échantillons d'eau de mer, prélevés à différentes profondeurs au moyen d'une rosette équipée de 24 bouteilles Niskin (figure 4), sont soit analysés directement à bord, soit conservés pour être traités de retour à terre (voir ci-dessus : Liste des paramètres mesurés). L'ensemble rosette-CTD était complété par un capteur d'oxygène, un fluorimètre et une sonde PAR (photosynthetically active radiation).

Cinq profils de PAR ont été réalisées au cours de la campagne, dans la couche euphotique (figure 5). On remarque que les stations 15 à 18 ayant été échantillonnées de nuit, les profils d'irradiance correspondants ont dû être réalisés de jour avant l'arrivée en station (stations 15P, 17P et 18P, voir Tableau des stations).

- Tableau des stations -

Station	Date jj-mm	Heure TU début / fin	Position (fin descente)	Opération	Prof. (fond) (m)
<i>TRAJET REUNION-AMSTERDAM</i>					
18P	05-01	13z/14z30	26°28,32'S-065°41,16'E	CTD-PAR	250
18	05-01	22z29/03z23	26°59,61'S-067°08,39'E	CTD-Rosette	5000 (5180)
17	06-01	18z05/22z08	29°59,90'S-066°25,03'E	CTD-Rosette	4360 (4440)
16P	08-01	10z43/11z43	34°20,90'S-072°32,49'E	CTD-PAR	500
16	08-01	16z36/18z06	35°00,12'S-073°30,01'E	CTD-Rosette	1000 (4304)
15P	09-01	10z30/10z50	38°20,39'S-075°24,82'E	CTD-PAR	300
15	09-01	20z27/22z03	39°59,82'S-076°24,47'E	CTD-Rosette	1000 (3233)
<i>RIDE SUD-EST INDIENNE</i>					
31P	26-01	05z50/06z25	44°55,40'S-095°00,59'E	CTD-PAR	400
31	26-01	06z27/08z59	44°55,40'S-095°00,59'E	CTD-Rosette	2650 (2710)
<i>TRAJET RETOUR FREEMANTLE</i>					
32B	09-02	18z37/22z35	40°00,00'S-110°00,05'E	CTD-Rosette	4500 (4630)
32A	10-02	00z08/00z31	39°59,94'S-110°00,14'E	CTD-Rosette-PAR	1000 (4630)



Figure 4 : Rosette équipée de 24 bouteilles Niskin de 12L servant à l'échantillonnage de l'eau de mer le long de la colonne d'eau. Cette rosette est également équipée de capteurs de température, conductivité, pression, fluorescence, oxygène et PAR.

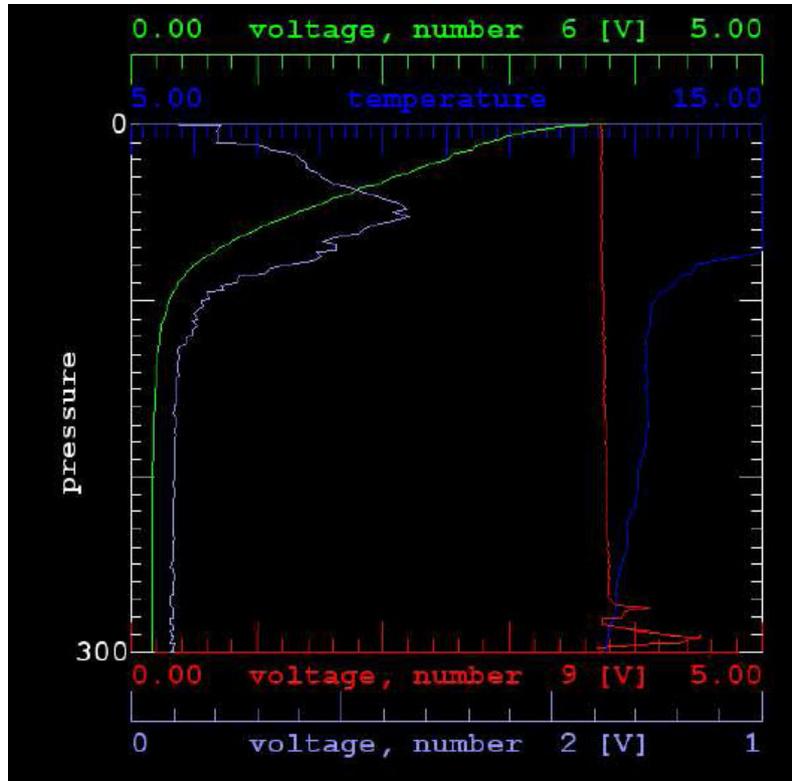


Figure 5 : Profils de PAR (données brutes en volt) dans la colonne d'eau (en vert), de PAR de surface (données brutes en volt) en rouge, de fluorescence (données brutes en volt) en gris et de température en bleu établis près de la station 15.

La station 18, qui n'a pas été échantillonnée lors des précédentes campagnes OISO, est la réoccupation d'une station historique visitée pour la première fois en 1978 pendant la campagne GEOSECS (station 454) puis en 1985 pendant la campagne INDIGO1 (station 25). Les niveaux d'échantillonnage ont été répartis sur toute la colonne d'eau, tous les 500m dans les eaux profondes (2000-5000m), puis tous les 250m, puis 100m et 50m dans les eaux intermédiaires et les eaux de modes (100-2000m), pour terminer par un pas d'échantillonnage compris entre 25m et 10m dans les 100 premiers mètres de l'océan. Les mesures acquises dans les eaux profondes ont pour but de détecter un éventuel défaut d'étalonnage des capteurs et des méthodes de mesure : les caractéristiques physico-chimiques de ces eaux les plus anciennes (formées avant la révolution industrielle) ne varient pas, ou très peu, sur une échelle de temps de quelques décennies.

Trois autres stations ont été réalisées sur le trajet Réunion-Amsterdam qui sont des répétitions de stations OISO. Les niveaux d'échantillonnage sont les mêmes que ceux définis pour les précédentes campagnes : la station 17 est échantillonnée jusqu'au fond suivant une stratégie similaire à celle de la station 18, ceci afin d'assurer la cohérence de l'ensemble des données OISO, tandis que pour les stations 15 et 16 seuls les 1000 premiers mètres sont échantillonnés, ce qui permet de réduire de moitié le temps passé en station.

La station 31 a été réalisée au niveau de la dorsale à la position 45°S 95°E qui correspond au croisement de la section WOCE-I08S échantillonnée en décembre 1994 (Figure3). La rosette-CTD a été descendue jusqu'à 50m du fond (2700m) et des échantillons d'eau de mer ont été collectés sur toute la colonne d'eau. On notera que trois bouteilles ont été fermées à 2650m afin de collecter un grand volume d'eau dans une zone homogène (eaux profondes) pour réaliser des tests de vieillissement des échantillons destinés à la mesure simultanée de carbone inorganique dissous et d'alcalinité.

La station 32 a été réalisée sur le trajet du retour vers Freemantle sur 4630m de fond. Cette dernière station a pu être échantillonnée en 2 palanquées, afin de réduire le pas d'échantillonnage à environ 200m dans les eaux profondes (>2000m) et 100m dans les eaux intermédiaires et les eaux de mode (300-1500m).

Un pré-traitement des données CTD a été réalisé à l'aide du logiciel SBE Data Processing - Win32 fourni par B. Ollivier. Seule la première étape de traitement a été réalisée (Data Conversion) en utilisant les polynômes des précédentes calibrations des sondes de pression, température et conductivité. Les données d'oxygène en revanche n'ont pas pu être traitées à bord, n'ayant pas à disposition la feuille de calibration de la sonde. Ces informations devront nous être transmises après la campagne, de même que le résultat des calibrations post-campagne des sondes de température et conductivité, afin de procéder au traitement final des données CTD.

Le capteur PAR ayant été calibré avant le départ en mission, les données brutes de PAR (volt) ont pu être traitées par le logiciel SeaBird. Afin de déterminer précisément la profondeur de la couche euphotique ainsi que les profondeurs correspondant aux atténuations clés dans les expérimentations de production primaire et fixation d'azote atmosphérique (cf §3.4), les données brutes de SPAR (irradiance à la surface de l'eau) doivent être traitées avec SeaBird. Nous attendons les calibrations post-campagne du SPAR pour traiter les données de SPAR.

Les données acquises en station ont été comparées aux données acquises lors de précédentes campagnes (GEOSECS, INDIGO, WOCE et OISO). Les profils hydrologiques (température, salinité) sont cohérents, de même que les données de carbone inorganique dissous et d'alcalinité. Les mesures réalisées dans les eaux profondes sont en très bon accord avec les mesures antérieures, tandis que dans l'océan supérieur (0-1500m) des variations saisonnières, interannuelles et décennales sont détectées (Figure 12). Il faut noter que les données sont encore préliminaires mais pour le carbone inorganique dissous et l'alcalinité, notamment, le traitement post-campagne n'engendre qu'une faible correction.

3.3. Mesure de l'oxygène dissous

La mesure chimique de l'oxygène dissous (méthode de Winkler), indispensable à l'étalonnage des sondes de mesure physiques de ce paramètre, a été abandonnée pendant quelque temps après le départ du laboratoire des personnels qui en étaient chargés. Il était cependant urgent de reprendre ces mesures étant donné l'importance de ce paramètre pour les études touchant à l'évolution des caractéristiques biogéochimiques dans la colonne d'eau et l'estimation du CO₂ anthropique. A la différence des précédentes campagnes OISO, il a été décidé de réaliser un dosage chimique sur l'ensemble des bouteilles de prélèvement pour répondre aux standards internationaux (le capteur d'oxygène, qui permet d'obtenir un profil continu, nécessite une calibration rigoureuse avant de pouvoir intégrer les données dans les bases dédiées).

La mise au point et la préparation de la chaîne de mesure et des réactifs ont été effectuées au laboratoire au mois d'août 2008, grâce au soutien de l'IPSL (V. Racapé, étudiante à l'Université Paris 6, sous la supervision de C. Brunet). Pendant la campagne OISO 17, en parallèle avec les mesures des échantillons prélevés en surface et à toutes les profondeurs échantillonnées en station (environ 230 échantillons), des séries de tests ont également été réalisées en vue de certifier la méthode et fixer le protocole opératoire. Les tests ont montré que la reproductibilité est largement compatible avec les recommandations WOCE (Carpenter, 1991) : 2 écarts type < 0.010 ml/l soit 0.4 µmol/kg).

Le matériel devait être utilisé par des collègues non chimistes sur le Marion Dufresne lors de la campagne TRACK qui succédait à OISO 17 ainsi que sur un navire allemand, le Polarstern, sur lequel avait été embarqué du matériel similaire; Il a donc été rédigé les documents nécessaires à une utilisation par du spécialiste non spécialiste.

Il convient de noter que le dosage chimique de l'oxygène nécessite l'utilisation de produits potentiellement polluants (Mn²⁺, I⁻,...). Pris de court et n'ayant pas les éléments pour prendre une décision pertinente, il a été décidé de garder à bord les résidus de dosage. De retour au laboratoire, des spécialistes de la gestion des déchets nous ont indiqué qu'étant donné la très faible quantité de produit rejetée et la présence naturelle des ces éléments dans l'eau de mer, il était moins nocif de rejeter les déchets à la mer au fur et à mesure que d'en rapporter plusieurs litres à traiter en métropole. Des consultations vont se poursuivre en vue de prendre une décision quant au devenir des déchets de dosage lors des prochaines campagnes.

3.4. Mesure de production primaire et fixation d'azote atmosphérique

Des incubations d'eau de mer ont été réalisées sur le pont afin de mesurer la production primaire et la fixation d'azote atmosphérique par les organismes diazotrophes. De l'eau de mer a été prélevée en surface toute les 24 heures et dans la couche euphotique au niveau des 6 stations CTD-Rosette. Pour les mesures en station, des échantillons d'eau de mer ont été collectés à 4 profondeurs caractéristiques d'une luminosité réduite de 25%, 50% et 75% par rapport à la lumière incidente ; la 4ème profondeur correspondant à de l'eau de surface. Afin de connaître la luminosité arrivant à la surface de l'eau et déterminer les profondeurs de prélèvement pour les incubations un PAR de surface a été installé sur la DZ (pont hélicoptère) en complément du PAR immergé (figure 6).

Une fois les échantillons collectés (5L d'eau de mer par échantillon, et duplicat d'échantillons aux 4 profondeurs), ceux-ci ont été enrichis en ^{13}C et $^{15}\text{N}_2$ afin de mesurer la production primaire (fixation de $^{13}\text{CO}_2$) et la fixation d'azote atmosphérique (fixation de $^{15}\text{N}_2$) puis incubés 24h dans les incubateurs de pont. Les incubateurs étaient alimentés en continu par de l'eau de mer de surface. Trois d'entre eux étaient équipés de filtres de lumière afin d'atténuer la luminosité de 25%, 50% et 75% (figure 7) et ainsi être représentatif des conditions d'éclairement aux différentes profondeurs étudiées; le dernier incubateur dépourvu de filtre de lumière permettait d'incuber des échantillons d'eau de mer prélevée en surface.



Figure 6 : A gauche, le capteur PAR installée sur la structure de la rosette permettant la mesure de l'irradiance dans la colonne d'eau (0-1000m) ; à droite, capteur PAR installée sur le pont du bateau mesurant l'irradiance incidente.

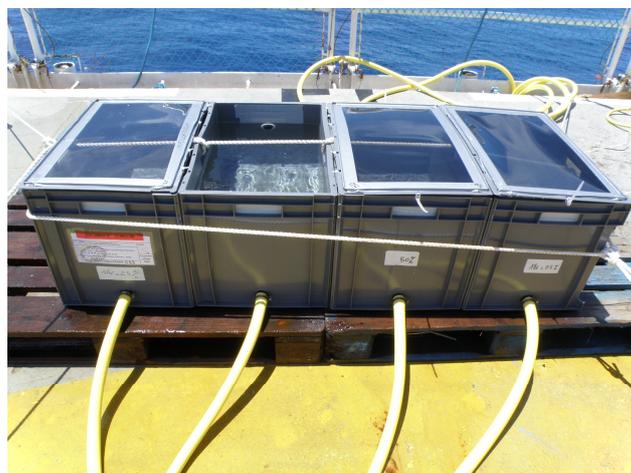


Figure 7 : Incubateurs placés sur la DZ du Marion Dufresne nécessaires à l'incubation d'échantillons d'eau de mer en vue de la détermination de la production primaire et de la fixation d'azote atmosphérique.

3. Déroulement de la campagne

3.1. Escale à La Réunion : Mise en place des instruments (du 31/12/08 au 03/01/09)

L'équipe OISO est arrivée à La Réunion le 31 décembre 2008 vers midi. L'appareillage, initialement prévu le 2 janvier, a finalement été retardé au 3 janvier, ce qui nous a permis de bénéficier de deux jours et demi à quai pour mettre en place les instrumentations.

Les stands de mesures de pCO₂, TCO₂/TA, oxygène, les rampes de filtration et les caisses d'échantillons, ont été placés dans les labos 5053, 5052 et 5012. Le SAS hydro est utilisé pour la préparation des séquences de prélèvements à la rosette. La rosette-CTD bord et le système d'acquisition ont été mis en place par l'équipe IPEV. Le capteur de pression (SBE9plus #0402) ainsi que les capteurs de conductivité (SBE4 #2317) et température (SBE3 #1821) ont été calibré chez Sea-Bird Electronics (Washington) en mai 2005 pour le premier et en août 2005 pour les suivants, ce qui fait plus de trois ans ; ils devraient être de nouveau calibrés après la campagne. Le capteur de PAR immergé (QSP-2300), prêté par la DT INSU (C. Marec) a été calibré en octobre 2008. Le capteur PAR de surface (IPEV) doit être calibré au retour de la mission.

3.2. Trajet Réunion - Amsterdam (du 03/01/09 au 10/01/09)

L'appareillage a eu lieu le 3 Janvier à 09h. Au départ de La Réunion les pompes de surface (moyen débit et petit débit eau de mer propre) ont été mises en route pour rinçage. Après une phase de tests, calibrage, étalonnage, les mesures de surface en continu (pCO₂ eau et air, TCO₂/TA, fluorescence, oxygène, température et salinité) ont débuté le 4 janvier à 05h20 (TU+4) à la position 23°35'S - 057°37'E, ainsi que les prélèvements semi-continu de surface (à 14h, heure du bord) et les notes météo.

Les 24 bouteilles de 12 l ont été grées sur la rosette dans la journée du 5 janvier et des tests de fermeture ont été réalisés par l'équipe IPEV. Ces tests ont montré que la commande de fermeture des bouteilles devait parfois être exécutée une seconde fois pour être effective, à la suite de quoi il a été décidé d'exécuter cette commande deux fois systématiquement pour assurer la fermeture de toutes les bouteilles (procédure suivie aux six stations d'échantillonnage). Les capteurs de PAR, immergé et de surface, ont été installés respectivement sur la rosette et sur la DZ par l'équipe IPEV. Un premier profil de PAR a été réalisé avec succès le 5 janvier vers 17h (heure du bord) à la station 18P (voir Tableau des stations). L'instrumentation était opérationnelle pour la première station hydrologique réalisée dans la nuit du 5 au 6 janvier sur la radiale Réunion-Amsterdam (station 18).

3.3. Ride Sud-Est Indienne (du 10/01/09 au 07/02/09)

Les mesures de surface en continu, les prélèvements en semi-continu et les mesures de production primaire ont été poursuivis pendant toute la durée de la mission GEISEIR sur la ride Sud-Est Indienne. On notera toutefois que l'arrivée d'eau de mer a été coupée à trois reprises entre le 25 et le 27 janvier suite à l'inondation des deux labos et de l'hôpital situé en dessous provoquée par une fuite dans les tuyaux d'évacuation (tuyaux bouchés). En conséquence, les mesures et les prélèvements de surface ont été interrompus pour une durée

totale de 38 heures. Une réparation provisoire a permis de reprendre les mesures, et une demande de travaux a été effectuée par le second mécanicien pour le prochain arrêt technique du navire. Un thermosalinomètre, installé sous la flottaison à l'avant du navire mesure les paramètres hydrologiques de surface: (température et salinité). Par forte houle, des bulles d'air pénètrent dans l'appareil. D'une part, les valeurs de salinité sont alors totalement aberrantes et d'autre part, les mauvaises données provoquent l'arrêt du programme d'acquisition, ce qui nécessite de le relancer rapidement afin de limiter la perte de données.

La station 31 a été réalisée au niveau de la dorsale à la position 45°S 95°E sur 2700m de fond. Un profil de PAR a d'abord été réalisé jusqu'à 400m afin de déterminer la profondeur de la couche euphotique et les niveaux de prélèvement pour les incubations (25, 50 et 75% de la lumière incidente). Le capteur PAR, qui ne doit pas être descendu à plus de 100m, a ensuite été retiré afin de descendre la rosette-CTD jusqu'à 50m du fond pour collecter des échantillons d'eau de mer sur toute la colonne d'eau en une seule palanquée.

3.4. Retour vers Freemantle (du 07/02/09 au 12/02/09)

Les mesures en continu, les prélèvements en semi-continu et les mesures de production primaire ont été poursuivies sur le trajet du retour jusqu'au 10 février à la latitude de 40°S où la station 32 a été réalisée en 2 palanquées (voir Tableau des stations). Un profil de PAR a été réalisé pendant la seconde palanquée (0-1000m).

Les deux derniers jours du transit ont été consacrés au rangement du matériel devant être expédié à Paris ou restant à bord. Il était en effet nécessaire de démonter complètement les installations des laboratoires en vue des travaux qui doivent être réalisés au niveau des évacuations et de la climatisation. Le banc de mesure de pCO₂ a été mis en caisse pour être rapatrié à Paris pour une mise à jour. Le banc de mesure d'ATCT, qui reste à bord, a également été démonté et mis en caisse afin de libérer l'accès au plafond. Ces caisses, ainsi que tout le matériel conservées sous les paillasses (essentiellement des pièces de rechange) ont été regroupés et stockés au centre du labo pour libérer l'accès aux évacuations. Les caisses de flacons d'ATCT et de salinité ont été rangées dans le container orange. En revanche, tout le matériel nécessaire à la mesure de l'oxygène dissous est resté en place pour être utilisé pendant la campagne TRACK.

Le navire est arrivé à Freemantle le 12 février. L'ensemble du matériel était rangé le soir de l'arrivée. Les participants à la campagne TRACK ont embarqué ce jour, ce qui a permis à Fabien Roquet et Isabelle Durand (MNHN, Paris), en charge des mesures d'oxygène dissous pour TRACK, de bénéficier d'une journée avec Christian Brunet et Virginie Racapé pour se familiariser avec le matériel que nous leur laissons à bord.

4. Résultats préliminaires

Note: Dans ce rapport, nous choisissons de présenter et discuter des résultats préliminaires issus des observations en continu de CO₂ en surface (pression partielle notée pCO₂ ou fugacité notée fCO₂) et de mesures de carbone inorganique dissous dans la colonne d'eau (TCO₂) obtenues sur le trajet La Réunion-Amsterdam et dans la zone d'exploration de la dorsale Sud-Est Indienne. Il faut noter que sur les figures, les observations sont brutes, c'est à dire non calibrées. Pour le CO₂ toutefois, une correction de 4%/°C a été appliquée, pour prendre en compte la différence de température entre la cellule d'équilibrage (au laboratoire) et l'eau de mer de surface. Cette différence est généralement de l'ordre de 0.5 °C à 1°C, conduit à une correction de l'ordre de 7 à 15 µatm sur les mesures de CO₂.

4.1. Distribution du CO₂ dans les eaux de surface

Les mesures en continu de CO₂ de surface acquises pendant la majeure partie de la campagne sont représentées sur la figure 8. Sur le trajet La Réunion - Amsterdam les enregistrements de 2009 sont conformes à ceux des années précédentes (Figure 11): la pCO₂ océanique est supérieure ou proche de l'équilibre avec l'atmosphère dans les eaux chaudes de la zone subtropicale (région source), puis chute brutalement au niveau du Front Subantarctique (~35°S) pour atteindre des niveaux bien inférieurs au CO₂ atmosphérique (région puits).

Les mesures de CO₂ collectées dans la zone d'exploration de la dorsale, entre 40°S et 48°S, montrent des résultats inattendus : le puits de CO₂ diminue vers le sud (ou vers l'est), jusqu'à un retour à l'équilibre dans la partie sud-est de la zone explorée (45-48°S, 95-100°E). Il est possible que ce gradient traduise un contraste est-ouest dans la distribution des puits et sources de CO₂. Ceci pourrait être lié à la distribution de la chlorophylle dont le maximum observé dans la zone subantarctique s'atténue dans la partie est du bassin (Figure 9). Ces observations s'opposent à l'idée selon laquelle la zone subantarctique est dans son ensemble un puits important de CO₂. Il est toutefois possible que le gradient de CO₂ observé dans la zone GEISEIR ne soit pas un signal persistant, mais plutôt une anomalie liée aux variations interannuelles de la température de surface (SST), comme le suggère la carte satellitale des anomalies de SST pour la semaine du 25 au 31 janvier 2009 (Figure 10b).

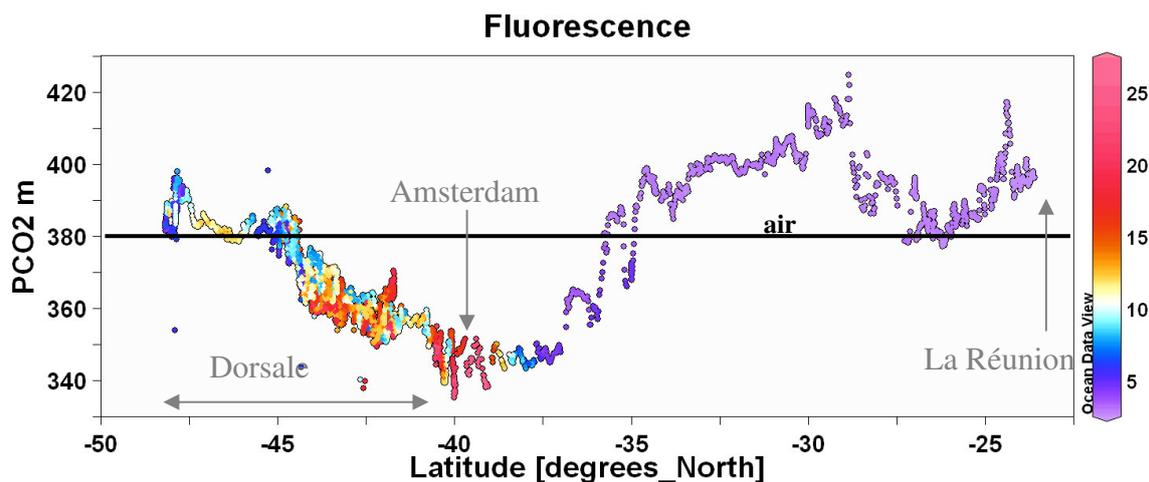


Figure 8 : Distribution latitudinale du CO₂ de surface (pression partielle, pCO₂ en ppm) observée en janvier 2009 entre La Réunion (56°E) et l'extrémité est de la zone d'exploration GEISEIR (100°E). La différence entre la mesure de CO₂ dans l'air (en noir) et dans l'eau nous renseigne sur le sens et l'intensité du flux air-mer (puits ou source de CO₂). Le code de couleur utilisé pour la fluorescence renseigne sur l'abondance de phytoplancton, donc sur l'intensité pompage biologique de CO₂.

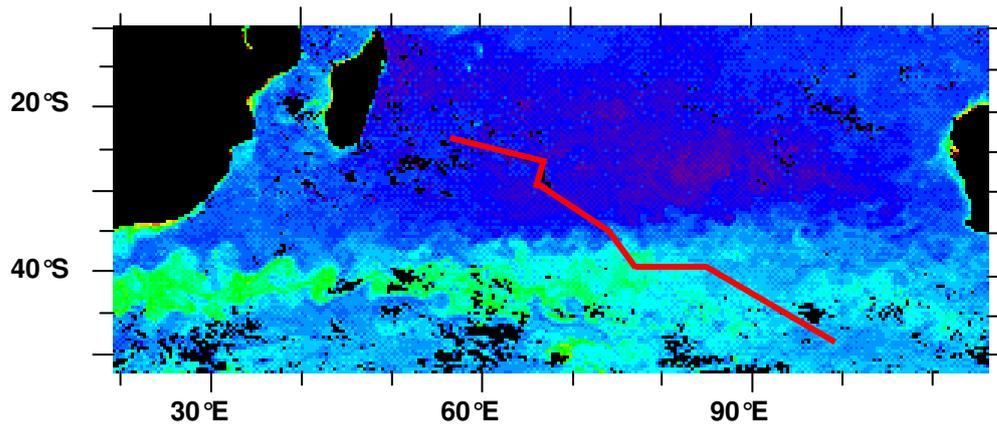


Figure 9 : Distribution moyenne de la chlorophylle-a dans les eaux de surface en janvier 2009 (données satellitaires Seawifs). Les zones riches en chlorophylle (phytoplancton) situées dans la zone frontale et dans les eaux côtières sont indiquées en vert (maximum en rouge), tandis que la zone la plus pauvre située au centre du bassin dans la gyre subtropicale est indiquée en violet. Le trajet du navire en rouge permet de situer les mesures présentées sur la Figure 8.

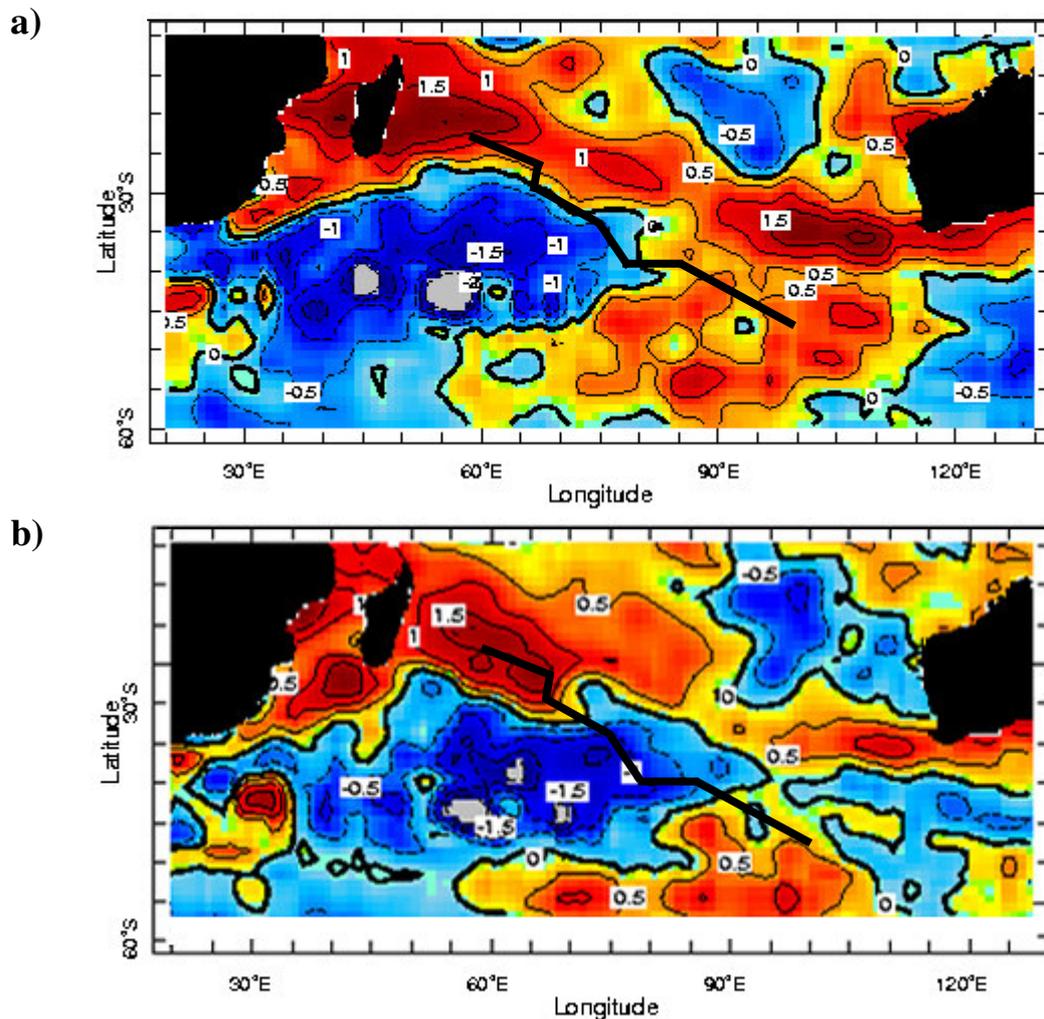


Figure 10 : Anomalie de température de surface (SST, données satellitaires) pour a) la semaine du 4 au 10 janvier 2009 et b) la semaine du 25 au 31 janvier 2009. Les anomalies positives (en rouge) indiquent des eaux plus chaudes que la normale. Le trajet du navire en noir permet de situer les mesures présentées sur la Figure 8.

4.2. Variabilité interannuelle à décennale du CO₂ en surface

Les mesures de CO₂ de surface réalisées entre La Réunion et Amsterdam s'ajoutent aux données collectées en été austral le long de la même radiale lors de cinq campagnes OISO réalisées entre 1998 et 2002 (Figure 11). En cela elles apportent une information précieuse sur l'évolution décennale du CO₂ dans l'océan. Ainsi, dans les eaux de surface subtropicales (au nord de 35°S), où des valeurs extrêmes ont été enregistrées (>420 μatm), il ne fait pas de doute que le CO₂ océanique a augmenté sur la période considérée en réponse à l'accroissement de CO₂ dans l'atmosphère. Une étude réalisée à partir des premières observations OISO comparées à des données historiques suggère une augmentation moyenne de 2,2 à 2,4 μatm/an sur la période 1991-2007, soit légèrement supérieure à l'accroissement de CO₂ dans l'atmosphère évaluée à 2,11±0.007 μatm/an (Metzl, 2008). Une étude plus approfondie, intégrant plus de données, devra être menée pour évaluer avec précision le taux d'augmentation du CO₂ dans ces eaux sur la période plus récente. Une difficulté majeure pour répondre à cette question reste en effet de pouvoir s'affranchir de la variabilité interannuelle qui bien souvent brouille le signal recherché (Figure 11). Pour cela il est nécessaire de continuer l'acquisition de données dans cette zone, un objectif que vise le programme OISO.

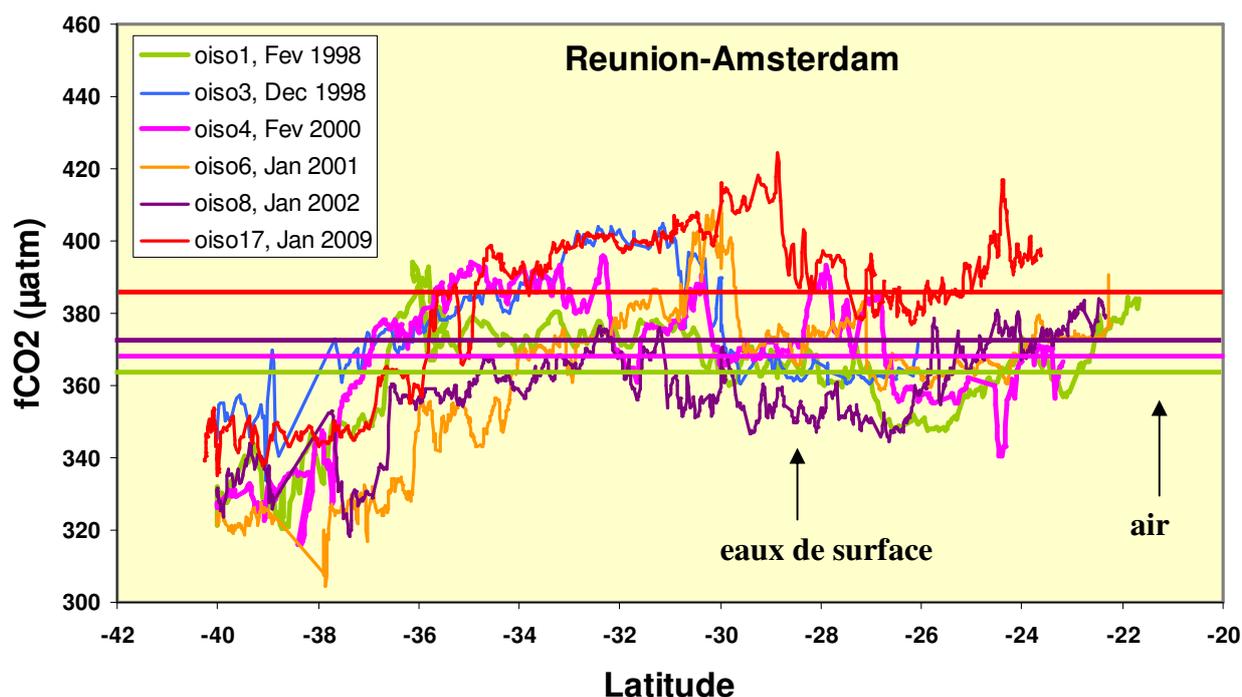


Figure 11 : Comparaison des mesures de CO₂ dans les eaux de surface (fugacité, fCO₂) et dans l'air sur le trajet La Réunion - Amsterdam. La pCO₂ atmosphérique mesurée pendant la campagne OISO17 indique un accroissement de 100 ppm en 2 siècles (par rapport à sa valeur préindustrielle). On remarque que un cinquième de cet accroissement s'est produit sur la période la plus récente : +20 ppm sur les 11 années couvertes par les observations OISO.

4.3. Evolution décennale du carbone inorganique dissous dans la colonne d'eau

Les concentrations de carbone inorganique dissous (TCO_2) mesurées en station dans la zone subtropicale et dans la zone subantarctique sont comparées à celles collectées 24 ans plus tôt pendant la campagne INDIGO1 (Figure 12). Sur ces deux zones on observe une augmentation du TCO_2 dans les 500 à 600 premiers mètres de l'océan (de l'ordre de 15 à 30 $\mu\text{mol/kg}$) qui peut être en grande partie attribuée à l'invasion de carbone anthropique dans les eaux de surface (de l'ordre de 1 $\mu\text{mol/kg/an}$) et les eaux de mode ($<1 \mu\text{mol/kg/an}$). On note également un très bon accord entre les données OISO collectées en profondeur à la station 18 et les données INDIGO1 lorsque ces dernières sont corrigées de 10 $\mu\text{mol/kg}$ comme suggéré par Sabine et al. (1999) et Lo Monaco et al. (in prep.).

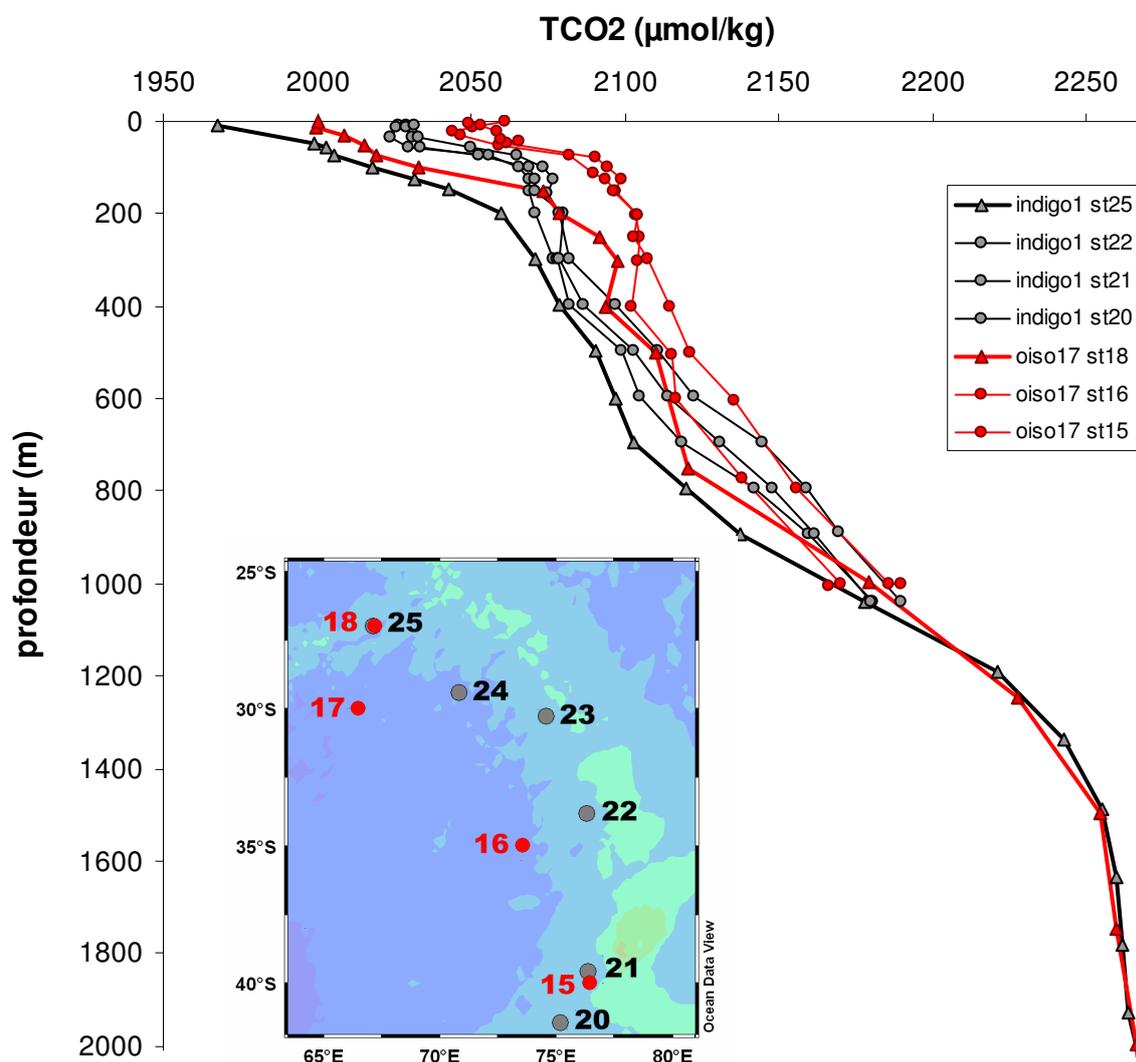


Figure 12 : Evolution du carbone inorganique dissous (TCO_2) dans la colonne d'eau entre février 1985 (INDIGO1, en noir) et janvier 2009 (OISO17, en rouge). Les données INDIGO et OISO comparées ici, collectées à 27°S, 34-35°S et 40-42°S sur le trajet Réunion-Amsterdam à bord du Marion Dufresne, ont été obtenues suivant les mêmes techniques d'analyse à l'exception des standard internationaux (Certified Reference Material) utilisés pendant les campagnes OISO mais qui n'existaient pas dans les années 80. En conséquence, il n'est pas surprenant que les données historiques présentent un décalage systématique. Ici les données INDIGO1 ont été corrigées de 10 $\mu\text{mol/kg}$ (Sabine et al., 1999 ; Lo Monaco et al., in prep.).

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Bousquet, P., P. Peylin, P. Ciais, C. LeQuéré, P. Friedlingstein, et al., 2000. Regional Changes in Carbon Dioxide Fluxes of Land and Ocean since 1980. *Science*, 290, 1342-1346.

Canadell, J. G., C. Le Quéré, M. R. Raupach, C.B. Field, E. T. Buitenhuis, P. Ciais, T. J. Conway, N. P. Gillett, R. A. Houghton, and G. Marland, 2007. Contributions to accelerating atmospheric CO₂ growth from economic activity, carbon intensity, and efficiency of natural sinks. *PNAS*, doi/10.1073/pnas.0702737104.

Capone, D.G., J.P. Zehr, H.W. Paerl, B. Bergman, and E.J. Carpenter, 1997. Trichodesmium, a globally significant marine cyanobacterium. *Science*, Vol. 276, No. 5316, 1221-1229.

Feely, R. J. Boutin, C. Cosca, Y. Dandonneau, J. Etcheto, H. Inoue, M. Ishii, C. LeQuere, D. Mackey, M. McPhaden, N. Metzl, A. Poisson, and R. Wanninkhov, 2002. Seasonal and interannual variability of CO₂ in the Equatorial Pacific. *Deep Sea Research*, 49 (13-14), 2443-2469.

IPCC, 2007. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I of the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller, eds.). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 996 pp.

Ishii, M., H. Y. Inoue, S. Saito, T. Tokieda, D. Sasano, T. Midorikawa, A. Nakadate, K. Nemoto, N. Metzl, C. Sabine, R. Feely, R. Wanninkhof, and C. S. Wong, 2009. Spatial variability and decadal trend of the oceanic CO₂ in the western equatorial Pacific warm/fresh water. *Deep-Sea Research II*, doi:10.1016/j.dsr2.2009.01.002.

Karl, D.M., R. Letelier, L. Tupas, J. Dore, J. Christian, and D. Hebel, 1997. The role of nitrogen fixation in biogeochemical cycling in the subtropical North Pacific Ocean. *Nature*, Vol. 388, 533-538.

Le Quéré, C., C. Rödenbeck, E. T. Buitenhuis, T. J. Conway, R. Langenfelds, A. Gomez, C. Labuschagne, M. Ramonet, T. Nakazawa, N. Metzl, N. Gillett, and M. Heimann, 2007. Saturation of the Southern ocean CO₂ sink due to recent climate change. *Science*, doi: 10.1126/science.1136188.

Le Quéré, C., and N. Metzl, 2003. Natural processes regulating the oceanic uptake of CO₂. In "The Global Carbon Cycle: Integrating Humans, Climate, and the Natural World", (C.B. Field and M.R. Raupach eds.) SCOPE 62, Island Press, Washington, D.C., pp 243-255.

Lo Monaco C., M. Álvarez, R. M. Key, T. Tanhua, B. Tilbrook, D. C. E. Bakker, S. van Heuven, M. Hoppema, N. Metzl, A. F. Ríos, C. L. Sabine and A. Velo, 2009. Assessing internal consistency of the CARINA database in the Indian sector of the Southern Ocean (*in prep. for Earth System Science Data*).

Lo Monaco C., N. Metzl, A. Poisson, C. Brunet, and B. Schauer, 2005a. Anthropogenic CO₂ in the Southern Ocean: Distribution and inventory at the Indo-Atlantic boundary (WOCE line I6). *Journal of Geophysical Research*, 110, doi:10.1029/2004JC002643.

- Lo Monaco C., C. Goyet, N. Metzl, A. Poisson, and F. Touratier, 2005b. Distribution and inventory of anthropogenic CO₂ in the Southern Ocean: Comparison of three data-based methods. *Journal of Geophysical Research*, 110, doi:10.1029/2004JC002571.
- Metzl, N., 2009. Decadal increase of oceanic carbon dioxide in Southern Indian Ocean surface waters (1991-2007), *Deep-Sea Research II*, doi:10.1016/j.dsr2.2008.12.007.
- Metzl, N., B. Tillbrook, D. Bakker, C. Le Quéré, S. Doney, R. Feely, M. Hood and R. Dargaville, 2007. Global Changes in Ocean Carbon: Variability and Vulnerability. *EOS*, 88 (28).
- Metzl, N., 2005a. CO₂ fluxes in the Southern Ocean: towards a coherent view. Science Highlights in *SOLAS Newsletter*, Issue 1, January 2005.
- Metzl, N., 2005b. Air-sea CO₂ flux variations in the Southern Ocean: New observations, new questions. *IGBP News Letters*, 61, 7-11, March 2005.
- Sabine, C. L., et al., 2004. The oceanic sink for anthropogenic CO₂. *Science*, 305, 367-371.
- Sabine, C. L., R. M. Key, K. M. Johnson, F. J. Millero, A. Poisson, J. L. Sarmiento, D. W.R. Wallace, and C. D. Winn, 1999. Anthropogenic CO₂ inventory of the Indian Ocean, *Marine Chemistry*, 13(1), 179-198.
- Raupach, M. R., G. Marland, P. Ciais, C. Le Quéré, J. G. Canadell, G. Kleppe, and C. B. Field, 2007. Global and regional drivers of accelerating CO₂ emissions. *PNAS*, 104, 10288-10293.
- Takahashi, T., S. C. Sutherland, R. Wanninkhof, C. Sweeney, R. A. Feely, D. Chipman, B. Hales, G. Friederich, F. Chavez, A. Watson, D. Bakker, U. Schuster, N. Metzl, H. Y. Inoue, M. Ishii, T. Midorikawa, C. Sabine, M. Hoppema, J. Olafsson, T. Amason, B. Tilbrook, T. Johannessen, A. Olsen, R. Bellerby, H. De Baar, Y. Nojiri, C. S. Wong, B. Delille, and N. Bates, 2009. Climatological Mean and Decadal Change in Surface Ocean pCO₂, and Net Sea-air CO₂ Flux over the Global Oceans. *Deep-Sea Research II*, doi:10.1016/j.dsr2.2008.12.009.
- Takahashi, T., S. C. Sutherland, C. Sweeney, A. Poisson, N. Metzl, B. Tilbrook, N. Bates, R. Wanninkhof, R. A. Feely, C. Sabine, J. Olafsson, and Y. Nojiri, 2002. Global Sea-Air CO₂ Flux Based on Climatological Surface Ocean pCO₂, and Seasonal Biological and Temperature Effect. *Deep Sea Research II*, 49 (9-10), 1601-1622.
- Vázquez-Rodríguez, M., F. Touratier, C. Lo Monaco, D.W. Waugh, X.A Padin, R.G.J. Bellerby, C. Goyet, N. Metzl, A.F. Ríos, and F. F. Pérez, 2009. Anthropogenic carbon distributions in the Atlantic Ocean: data-based estimates from the Arctic to the Antarctic. *Biogeosciences*, 6, 439-451.