

Les Zones de Minimum d'Oxygènes (OMZs) : des Zones de Maximum de Carbone (CMZs).

Une étude focalisée dans le Pacifique Sud-Est

A. Paulmier^{1,2}, D. Ruiz-Pino², V. Garçon¹, I. Masotti^{3,2}

Mots-clés: Zones de Minimum d'Oxygène (OMZs) – CO₂ – Océan - Pacifique Sud-Est - Biogéochimie Marine - Zone de Maximum de Carbone (CMZ) – New DIC – Reminéralisation - Effet de serre.

Les Zones de Minimum d'Oxygène (OMZs) sont des couches suboxiques s'étendant en subsurface sur plusieurs centaines de mètres, localisées dans le Pacifique Est et l'Indien Nord et associées à des zones d'upwelling. Les OMZs dans l'océan actuel présenteraient des conditions chimiques (acides) et biologiques (bactéries archéennes) similaires à celles de l'océan primitif, et sont caractérisées par le processus de dénitrification. A travers ce processus, les OMZs contribueraient à réguler non seulement le contenu en azote de l'océan et la productivité, mais également la production océanique de N₂O, 5-10 fois supérieure à celle de l'océan oxygéné (e.g. Cornejo et al., 2006; Farias et al., 2007), un gaz à effet de serre ~300 fois plus efficace, mais 1000 fois moins abondant que le CO₂.

Cette étude propose comme hypothèse centrale que les OMZs puissent exercer un autre effet de rétroaction positif sur les gaz à effet de serre, à travers une production accrue de CO₂. Cette hypothèse repose sur l'intense consommation de O₂, associée *a priori* à une reminéralisation très intense, et indissociable de la formation et intensification de l'OMZ. Cette forte reminéralisation impliquerait la remise en solution de grandes quantités de CO₂, qui, en période d'extension des OMZs (périodes chaudes), pourraient intensifier l'effet de serre en tant que source océanique de CO₂. Pour tester cette hypothèse, l'objectif est de déterminer la structure de CO₂ associée à l'OMZ et d'analyser les processus biogéochimiques qui réguleraient simultanément la production de CO₂ et la formation de l'OMZ.

L'approche s'est focalisée dans l'OMZ du Pacifique Sud-Est (ESP), une des OMZs les plus intenses ($1 \leq O_2 \leq 20 \mu M$) et proche de la surface (~20-50 m, Paulmier et al., 2006). L'OMZ de l'ESP a été documentée à la fois en O₂ (technique Winckler améliorée détectant des concentrations jusqu'à O₂ < 1 μM) et TCO₂ (potentiométrie avec une reproductibilité de < 3 μM), durant 4 campagnes océanographiques (2000-2002) au large du Chili (Paulmier, 2005). L'hypothèse d'une production de CO₂ dans les OMZs à échelle globale a été testée en utilisant les bases de données internationales du World Ocean Atlas (WOA2005: 1883-2004; limite de détection < 10 μM) pour O₂ et du Carbone Dioxide Information Analysis Center (CDIAC: 1992-1998) pour CO₂. Les 4 campagnes conduites

¹ LEGOS/CNRS, 18 av. Ed. Belin, 31401 TOULOUSE cedex 9, FRANCE

² LOCEAN/UPMC, 4. pl. Jussieu, 75005 PARIS, France

³ LSCE/CEA, case courrier 129, Orme des Merisiers, 91191 Gif-sur-Yvette cedex, France

Corresponding author: aurelien.paulmier@legos.obs-mip.fr

dans l'OMZ de l'ESP, complétées par un suivi mensuel (2000-2001), ont permis d'analyser trois situations d'OMZ et d'upwelling différentes à:

- Iquique (21°S), documentation d'un transect cross-shore de la côte vers le large, et une OMZ intense ($O_2 < 1 \mu M$) et proche de la surface (5-20 m);
- Coquimbo (30°S) avec une OMZ 10-20 fois moins intense et 2-4 fois plus profonde que pour 21°S;
- Concepción (36°S) en baie semi-fermée, station où l'OMZ se forme saisonnièrement au début du printemps et est détruit à la fin de l'automne (Paulmier et al., 2006).

Les données de TCO_2 ou DIC pour l'ensemble de l'échantillonnage au large du Chili présentent, comme pour les profils classiques, les plus faibles concentrations en surface (ici entre 1950 et 2100 μM) et une augmentation avec la profondeur (Figure 1b). Cependant, cette augmentation se focalise autour de l'oxycline dans les 100 premiers mètres et est 5 fois plus intense que celle pour le profil classique hors OMZ (Cf. profil en trait noir continu: Figure 1b). Les concentrations de DIC atteignent des concentrations jusqu'à 2250 μM sur toute l'épaisseur du core de l'OMZ (entre 50 et 450 m: Figure 1a), et peuvent même atteindre des valeurs extrêmes à l'oxycline jusqu'à plus de 2400 μM . Ces forts DIC sont similaires aux plus fortes concentrations reportées dans la région hors OMZ du Pacifique Est, mais pour des profondeurs supérieures à 800 m (Cf Point à $\sim 2300 \mu M$ correspondant aux DIC maximaux référencés dans la littérature: Figure 1b). Le fait que le maximum de DIC corresponde au minimum de O_2 du core de l'OMZ permet de définir, par analogie, une Zone de Maximum de Carbone ou CMZ, caractérisée par un excès défini par: $DIC_{mesuré\ in\ situ\ dans\ l'OMZ} - DIC_{estimé\ hors\ OMZ}$.

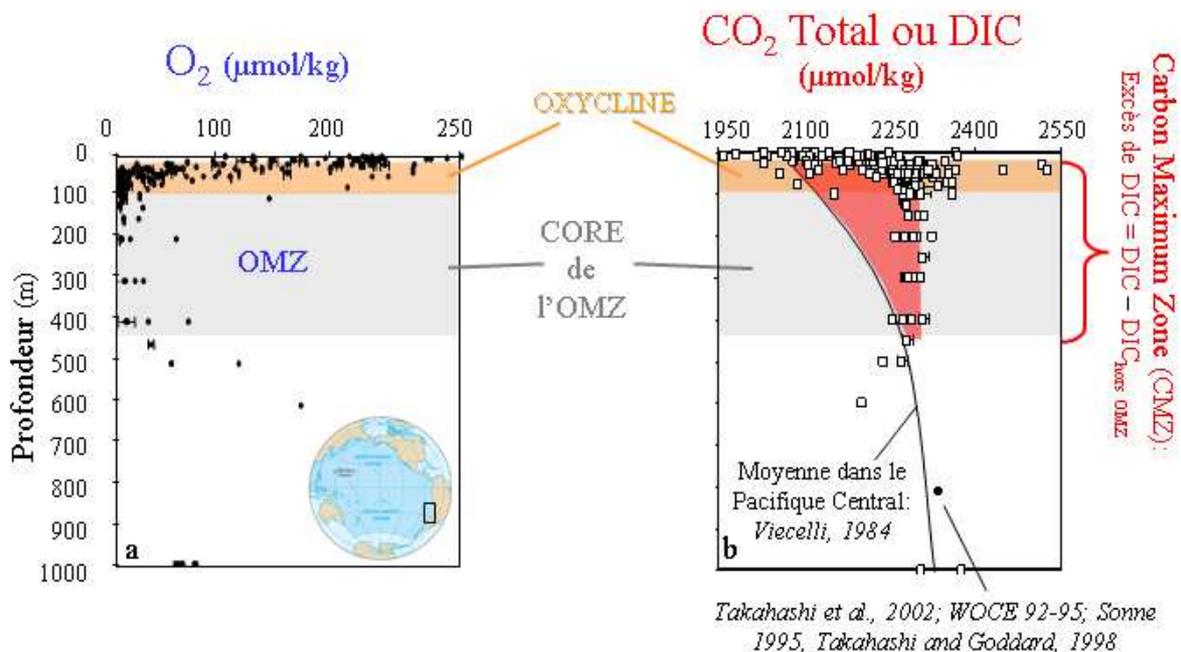


Figure 1: Profils de O_2 (OMZ: a) avec localisation de la zone d'étude dans le Pacifique Sud-Est (rectangle) sur une carte de l'océan Pacifique global et TCO_2 ou DIC (CMZ: b), pour un total de 20 stations et 192 mesures obtenues durant 4 campagnes à 21°S et 30°S (2000-2002) et un suivi mensuel saisonnier à 36°S (2000-2001), le long de la composante chilienne de l'OMZ de l'ESP. Pour les méthodes analytiques, cf. le texte.

L'excès de DIC peut s'expliquer, grâce aux résultats d'un bilan de l'effet d'advection en O_2 pour l'OMZ de l'ESP et de méthodes inverses de mélange de masse d'eau, par une contribution dynamique

régionale (40%) et biogéochimique locale (~60%). La contribution dynamique correspondrait à une advection d'un DIC «ancien» par le Sous-Courant Pérou-Chili (PCU) qui transporterait depuis l'Equateur une masse d'eau appauvrie en O₂ (<40 μM, 2.5 moins que hors OMZ) et enrichie en CO₂ (>2240 μM, ~50 μM de plus que hors OMZ). De plus, la variation de DIC due à des processus biogéochimiques, positive ($\Delta\text{DIC}>0$) sur la totalité des stations échantillonnées, indique une production intense locale et sur toute l'épaisseur de l'OMZ. Cependant, cette production de DIC d'origine biogéochimique n'est ni uniforme, ni constante, tel que le suggèrent les pics de ΔDIC environ 3 fois plus intenses à l'oxycline que dans le core de l'OMZ, 5 fois plus intenses au large qu'à la côte, et jusqu'à 20 fois plus intenses au printemps et à l'automne par rapport à l'été. La prédominance des processus biogéochimiques dans la production de ces fortes concentrations de DIC et la variation (spatiale et temporelle) concomitante de la production de DIC ($\Delta\text{DIC}>0$) et de la consommation de O₂ ($\Delta\text{O}_2<0$) permettent de proposer le concept d'un DIC «nouveau» (New DIC en anglais). Ce «nouveau» DIC serait produit par une reminéralisation aérobie intermittente: les phases actives ($\Delta\text{O}_2\geq 20$ μM) de fortes production de DIC et consommation de O₂ alternent avec des phases passives ($\Delta\text{O}_2<20$ μM: Paulmier et al., 2006). Le terme de «nouveau» correspond à un DIC qui serait d'une part nouvellement et localement produit à l'oxycline par opposition au DIC « ancien » advecté par le PCU. D'autre part, ce DIC serait intensément produit, puisque sa contribution, jusqu'à 100 μM, est 2 à 5 fois plus importante que la contribution qui serait due à la reminéralisation maximale estimée dans l'océan oxygéné.

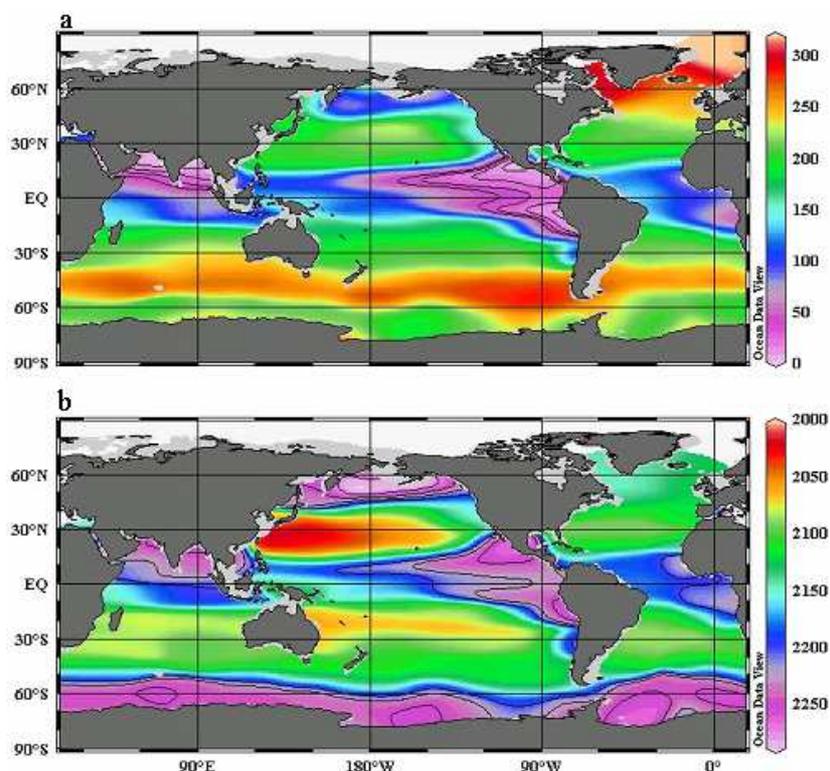


Figure 2: O₂ (a) d'après les données WOA2005 (1883-2004; précision et reproductibilité <10 μM) et DIC (b) d'après les données WOCE (1992-98; précision et reproductibilité <3 μM), en μM à la profondeur de 250 m, permettant de localiser à échelle globale les principales OMZs et CMZs respectivement. Noter l'échelle inversée pour le DIC.

A échelle globale, les principales OMZs en océan ouvert (Pérou, Pacifique Nord Tropical Est, Mer d'Arabie, Baie du Bengale) présenteraient des concentrations intenses de DIC (>2225 μM : Figure 2), sur toute l'épaisseur du core compris entre 20 et 1200 m environ (Figure non-montrée). Les distributions horizontales et verticales de O_2 et DIC confirment que toutes les OMZs peuvent constituer des CMZs et que les extensions des OMZs (30.4 ± 3 millions de km^2 , soit $\sim 8\%$ de la surface océanique totale: Paulmier et Ruiz-Pino, 2007) et CMZs sont comparables. Ces résultats suggèrent que la reminéralisation ne serait pas uniforme dans l'océan, mais aurait lieu dans les régions privilégiées que sont les OMZs.

Le principal impact de ce travail est que l'OMZ puisse exercer un effet de rétroaction positif sur l'effet de serre. Les OMZs se contracteraient en périodes froides et s'étendraient en périodes chaudes, en réponse aux changements climatiques et environnementaux. Ainsi, dans le contexte du changement climatique (augmentation de la stratification; augmentation de la température, donc diminution de la solubilité de O_2), les OMZs s'étendraient ou s'intensifieraient depuis le début de l'ère industrielle et dans les décennies à venir. Cette extension actuelle des OMZs, en plus de l'effet connu lié à la production de N_2O , accentuerait le Réchauffement Climatique, selon cette étude, *via* le CO_2 par deux effets dit:

- i) «réserve», associé à la CMZ qui peut être upwellée. Les OMZs constitueraient les plus intenses réserves de carbone proches de la surface, estimée à 2000 GtC, soit près de 2.5 fois la réserve totale de CO_2 dans l'atmosphère. La fraction des CMZs qui pourrait être upwellée, en supposant une profondeur maximale d'upwelling moyenne de 100 m, induirait alors une contribution d'environ $\sim 15\%$ de l'augmentation observée depuis le début de l'ère industrielle (15 ± 1 ppmv à la teneur de CO_2 atmosphérique);
- ii) «barrière», limitant l'exportation du carbone vers l'océan profond du fait d'une reminéralisation intermittente intense dans des régions fortement productives de l'océan.

Références:

- Cornejo, M., Farias, L. and A. Paulmier (2006), Temporal variability in N_2O content and its air-sea exchange in an upwelling area off central Chile (36°S). *Mar. Chem.*, 101 (1-2), 85-94.
- Farias, L., Paulmier, A., et M. Gallegos (2007), Nitrous oxide and N-nutrient cycling along the oxygen minimum zone off northern Chile. *Deep-Sea Res.*, 54(2), 164-180.
- Paulmier, A. (2005), Zones de Minimum d'Oxygène (OMZs) de l'océan moderne. Une étude focalisée dans le Pacifique Sud Est. *Ph.D. Thesis*, pp 248, Univ. P&M Curie, Paris, France.
- Paulmier, A., Ruiz-Pino, D., Garçon, V. et L. Farias (2006), Maintaining of the East South Pacific Oxygen Minimum Zone (OMZ) off Chile. *Geophys. Res. Lett.*, 33, L20601, doi:10.1029/2006GL026801.
- Paulmier, A., et D. Ruiz-Pino (2007), Oxygen Minimum Zones (OMZs) in the Modern Ocean. *Progress in Oceanogr.*, soumis le 5 September 2007.
- Takahashi, T. et J. Goddard (1998) Measurements of Total CO_2 Concentration and Total alkalinity in Seawater collected during the SONNE Cruise 102, May-June, 1995. *Final Technical Report*, March 15.
- 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 CO_2 Flux Based on Climatological Surface Ocean pCO_2 , and Seasonal Biological and Temperature Effect. *Deep Sea Res. II*, 49, 1601-1622.
- Viccelli, J.A. (1984) The atmospheric carbon dioxide response to oceanic primary productivity fluctuations. *Climatic Changes*, 6, 203-215.