

Résumé Pour reconstruire de façon fiable les mécanismes régissant le climat, des données décrivant son évolution passée à partir de l'hémisphère sud font encore défaut. Pour pallier cette lacune, la campagne de carottages sédimentaires PACHIDERME (Pacifique-CHILI : Dynamique des Eaux interMÉdiaires) a été organisée en février 2007 dans le cadre du programme international IMAGES (International Marine Global changES) à bord du N.O. Marion Dufresne entre 39°S et 60°S le long de la région des fjords chiliens. Cette zone occupe une situation particulière quant à la formation de masses d'eaux qui sont ensuite re-distribuées à une grande partie de l'océan mondial. C'est aussi la seule région émergée à ces latitudes, faisant ainsi obstacle aux vents et aux courants d'ouest et induisant de très fortes précipitations à terre. D'épaisses calottes dont les reliquats existent encore à l'heure actuelle couvraient les hauts reliefs de la cordillère andine pendant les périodes glaciaires et leur fonte a livré des charges très importantes de sédiments en mer. Les capacités uniques de carottage du Marion Dufresne (IPEV) nous ont permis de prélever de longues séries à fort taux de sédimentation dans cette région encore peu explorée malgré sa situation clé pour les études paléoclimatiques et paléocéanographiques.

Abstract Data describing past evolution of climate from southern hemisphere are still too sparse to accurately constrain climate models. In order to fill this gap, the PACHIDERME coring cruise (Pacifique-CHILI : Dynamique des Eaux interMÉdiaires) took place in February 2007, in the framework of the IMAGES program (International Marine Global changES) on board the R. V. Marion Dufresne between 39°S and 60°S along the southern Chilean margin. It is a key region for the formation of water masses which are then re-distributed to the global ocean. It is also the only emerged lands at these latitudes, stopping the westerly winds and currents and inducing extremely heavy precipitations on land. Finally, thick ice sheets, with some significant remainings still present today, were covering the high summits of the Andean Cordillera in this region during the glacial periods. The melting of these ice sheets delivered high amount of sediments at sea. The unique coring facilities of the R. V. Marion Dufresne (IPEV) allowed us to retrieve from this area long sedimentary sequences with high deposition rates, therefore covering long time periods still poorly studied before from a paleoceanographic and paleoclimatic point of view.

Le sud-est Pacifique - sud Chili : une région clé pour les études paléocéanographiques et paléoclimatiques

Kissel Catherine - Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement/IPSL, CEA/CNRS UVSQ, - Avenue de la Terrasse, 91198 Gif-sur-Yvette Cédex, France - kissel@lscce.ipsl.fr



Recouvrant presque trois quarts de notre planète, l'océan joue un rôle fondamental dans le climat. Il est le siège de formation et de mouvements de masses d'eaux qui ont chacune leurs caractéristiques physico-chimiques particulières et qui échangent de la chaleur et de l'humidité avec l'atmosphère. Les lieux de formation de ces masses d'eaux, leur devenir dans l'espace d'un océan à l'autre et dans le temps sont des éléments essentiels à comprendre pour mieux cerner les mécanismes climatiques.

En cela, les données provenant de l'hémisphère sud font à l'heure actuelle cruellement défaut pour comprendre le rôle des hautes et basses latitudes dans les forçages climatiques et les interactions inter-hémisphériques. Les séries de données instrumentales existantes sont beaucoup moins abondantes qu'au nord et surtout beaucoup moins longues dans le temps.



Figure 1.

Dans ce contexte, le projet PACHIDERME (Figure 1) (Pacifique-CHILI : Dynamique des Eaux interMÉdiaires) à bord du N. O. Marion Dufresne (IPEV) a eu pour but de contribuer à combler cette lacune de données paléocéanographiques et paléoclimatologiques dans les moyennes et hautes latitudes sud en prélevant des séries sédimentaires longues sur la zone du sud-est Pacifique, le long de la marge chilienne.

La zone a été choisie en fonction de sa position tout à fait particulière puisque ses 9° de latitude sud sont l'unique obstacle terrestre aux vents d'ouest et aux courants marins induits par ces vents. Par ailleurs, cette côte très fragmentée, caractérisée par un système complexe de fjords et de chenaux est particulièrement vulnérable aux changements climatiques et à l'influence anthropique.

Contexte océanographique du sud-est Pacifique

La région sud-chilienne est idéalement située pour contrôler les changements dans la circulation océanique et ses relations avec l'atmosphère. La circulation océanique de surface dans cette région est en effet dominée par le Courant froid circumpolaire Antarctique (ACC) se propageant d'ouest en est et contrôlé par les vents d'ouest (Figure 2a). A l'heure actuelle, ce courant touche la côte chilienne entre 40°S et 45°S et se sépare alors en deux courants : le courant Pérou-Chili qui part vers l'équateur en longeant la côte occidentale de l'Amérique du sud sur environ 40° de latitude (Berger et al., 1987) et le courant du cap Horn qui se dirige vers le pôle (Strub et al., 1998) (Figure 2). Le degré de mobilité en latitude de cette zone de divergence au cours du temps n'est pas encore connu et c'est l'un des buts de PACHIDERME.

Les courants plus profonds incluent les Eaux antarctiques intermédiaires (AAIW) relativement douces se dirigeant vers le nord entre environ 500 et 900 m de profondeur (Figure 2). Le Pacifique du sud-est, au large du Chili, est un des premiers lieux de formation de cette masse d'eau intermédiaire dans l'hémisphère sud par processus convectifs et plongement de ce qui est appelé tout d'abord l'eau subantarctique (McCartney, 1977 ; Piola and Georgi, 1982 ; Talley, 1996). De part son lieu et ses mécanismes de formation, cette eau représente une source majeure d'oxygène et d'eau douce vers l'océan global et elle joue donc un rôle primordial à grande échelle. Elle est située au-dessous de la majorité des thermoclines océaniques et est décrite comme un « conduit » à travers lequel les anomalies des hautes latitudes sont transmises vers les basses latitudes. Depuis son premier lieu de formation à l'ouest de la région sud-chilienne (McCartney, 1977; Talley, 1996), l'AAIW se propage ensuite soit vers l'ensemble du sud-pacifique soit à travers le passage de Drake où ses propriétés sont largement modifiées. Des modèles suggérant que des variations de son flux ou de ses propriétés modifient les températures de surface tropicales pacifiques à l'échelle décennale (Gu and Philander, 1997) ou à l'échelle glaciaire/interglaciaire (Bush and Philander, 1999) doivent encore être validés ou infirmés par l'obtention de données permettant de caractériser l'AAIW proche de son lieu de formation et d'en définir l'évolution dans le temps.

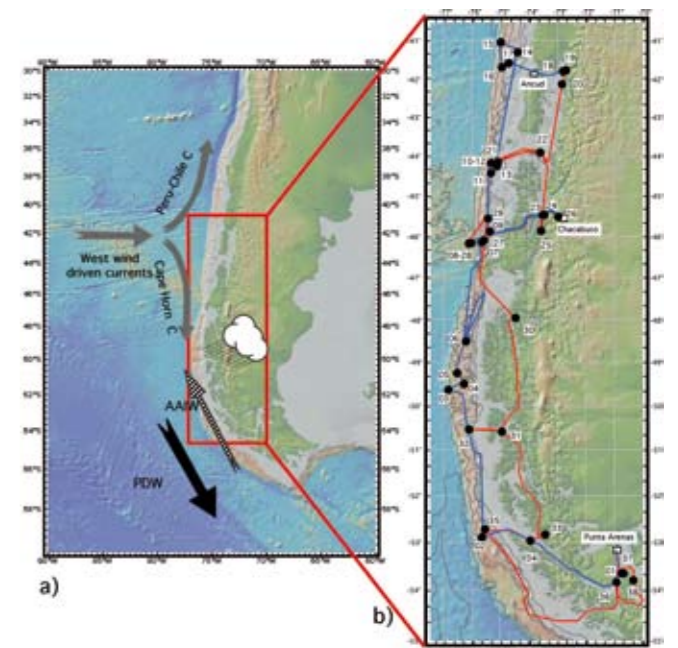


Figure 2. Zone géographique couverte par la campagne MD159-PACHIDERME.

a. Répartition des courants de surface (en gris), intermédiaires (en hachuré) et profonds (en noir) dans la zone sud-est Pacifique. La divergence des vents d'ouest induit de très fortes précipitations à terre.
b. Trajet de la campagne (sud-nord en bleu et nord-sud en rouge).

Figure 1. Logo de la campagne MD159-PACHIDERME (Pacifique-CHILI : Dynamique des Eaux interMÉdiaires)/IMAGES XV

Plus profondément dans l'océan, à environ 3 km de profondeur, le Courant circumpolaire profond (CPDW) se propage vers le nord (Tsuchiya and Talley, 1998). Après avoir transité vers le Pacifique nord où elle accumule des nutriments, cette masse d'eau retourne vers le sud et devient l'Eau Pacifique Centrale entre 1 et 3 km de profondeur (PCW) (Figure 2a). Cette eau de retour, riche en nutriments et pauvre en oxygène, joue un rôle important pour la distribution globale des nutriments (Reid, 1973 ; Berger et al., 1997).

La région sud-est Pacifique où toute une partie de ces courants se forme est une région clé pour comprendre leur évolution passée.

Les fjords chiliens

Les fjords du sud-Chili s'étendent actuellement sur 1600 km entre 41°-56°S et couvrent une surface de 241 000 km². La plupart des fjords drainent les glaciers patagoniens et la calotte de la Cordillère Darwin. Entre les fjords et les chapelets d'îles existent des bassins profonds formés par l'érosion glaciaire pendant le Quaternaire et par la subsidence tectonique de la vallée centrale chilienne (Borgel, 1970). L'extension de la couverture de glace pendant la dernière période glaciaire n'est pas précisément connue, ni d'ailleurs dans quelle mesure les décharges d'icebergs délivrant des grains détritiques en mer sont intervenus dans les processus sédimentaires de la marge continentale. Il est probable que les langues glaciaires et le système de rivières associées ayant atteint le Pacifique aient favorisé le développement de deltas sédimentaires (Lamy et al., 2004, Schonfeld et al., 1995) mais ce n'est cependant certainement pas le cas partout, les sédiments glaciaires étant souvent rejetés du côté atlantique de la cordillère (Bourgois et al., 2000). Au dernier maximum glaciaire, quand le niveau moyen des mers était à -120 m, des bassins étendus et profonds ont formé des lacs, isolés de l'océan Pacifique par des seuils émergés. Le retrait de la calotte patagonienne, commencé il y a 17 000 ans au sud du district des lacs (Denton et al., 1999), est associé à une forte baisse de salinité des eaux de surface témoignant des arrivées d'eaux douces de fonte. La remontée du niveau marin et l'inondation de ces bassins ont créé un système complexe de fjords, chenaux, baies (Silva et Prego, 2002). A la suite de cela, les enregistrements marins sont de plus en plus influencés par le régime des précipitations (Lamy et al., 2001).

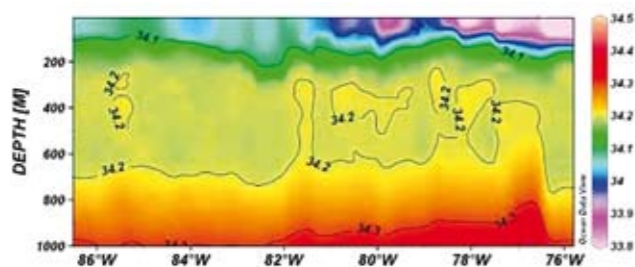


Figure 3. Répartition de la salinité (en ‰) depuis la côte vers le Pacifique. La langue d'eau douce venant des fjords est marquée par la couleur mauve-rose. (profil ARGO Float à 52°S, Courtesy W. Schneider and Kissel and the Shipboard Scientific party, 2008).



En effet, les vents d'ouest sont la source de précipitations importantes sur les montagnes côtières et sur les Andes. Le climat actuel de cette région est caractérisé par des précipitations annuelles fortes (Lamy et al., 2001), variant de 1000 à 7000 mm/an et l'ensemble des eaux continentales sortant par ces systèmes de fjords est similaire aux plus grands deltas du monde avec des gradients de sel (Figure 3) et une variation de la chimie des eaux qui laissent leurs marques dans les sédiments. Ce fort taux de précipitation, couplé à un haut relief de glaciers, contribue à l'apport très important à l'océan de sédiments terrigènes. Ainsi, la marge sud-chilienne comprend une série de bassins profonds qui contiennent des séquences sédimentaires épaisses tardi-glaciaires et holocènes qui sont des cibles de choix pour des études paléoclimatiques à haute résolution.

La campagne de carottage MD159 - PACHIDERME à bord du N. O. Marion Dufresne

Au-delà des données instrumentales, les indicateurs paléoclimatiques doivent être utilisés pour estimer la variabilité climatique dans le passé et les changements dans les régimes atmosphériques à grande échelle. Les reconstructions paléoclimatiques à l'aide de ces marqueurs des variations à l'échelle de la dizaine d'années, voire inter-annuelles sont peu nombreuses et dispersées dans cette région. Les premières évidences de variabilité climatique décennale ont été obtenues à terre à partir de l'analyse des anneaux d'arbres qui représentent toutefois des séries temporelles très courtes. Les séries lacustres ont été et sont encore très étudiées mais elles ne dépassent pas les derniers 15000 ans, la marge continentale ayant été entièrement couverte par la glace pendant la période glaciaire.

Dans l'océan, la variabilité océanographique associée à la variabilité des calottes et glaciers andins est relativement bien documentée aux latitudes plus basses que 41°S, mais peu de données existent au sud. Des analyses notamment des taux de sédimentation ont été faites sur d'anciennes carottes prélevées en 1993 par le N.O. américain Polar Duke tout au long de la marge sud-chilienne (Leventer et al., 1995). Toutefois, étant très courtes, ces carottes ne permettent pas de couvrir une grande période temporelle avec la résolution nécessaires aux études climatiques actuelles. Malgré la situation idéale de cette région faite de forts taux de sédimentation, d'évidences d'une bonne préservation des marqueurs géochimiques et d'une grande abondance biologique dans cette région clé d'un point de vue climatique, très peu de carottes sédimentaires avaient donc été prélevées dans le but de reconstituer l'histoire climatique régionale et son impact sur le climat global avant la réalisation de la campagne MD159-PACHIDERME en 2007.

La campagne MD159-PACHIDERME s'est déroulée à bord du N. O. Marion Dufresne en février 2007 de Punta Arenas à Punta Arenas, financée à 83% par la France et le reste par d'autres partenaires du projet puisque cette campagne a impliqué des scientifiques de Norvège, Allemagne, Chili et France dans le cadre du programme IMAGES (International Marine Global changES).

Les carottes prélevées sont réparties sur 31 sites sur un total de 36 en océan ouvert et dans les fjords depuis le détroit de Magellan à 54°S sud jusqu'au nord-est de l'île d'Ancud à 41°S (Figure 2b). Ces carottes sont réparties en latitude à la fois en océan ouvert pour avoir accès à la variabilité de la dynamique océanique et dans les fjords et bassins arrière-îles pour définir l'interaction avec les glaciers sud-américains, la variabilité du régime des précipitations, autant d'objectifs scientifiques décrits plus hauts.

Grâce à la spécificité, unique au monde, du Marion Dufresne en termes de carottages, nous avons pu réaliser des carottes très longues (la plus longue fait 46,33 m) en utilisant le carottier Calypso, surtout dans les fjords où les sédiments étaient bien plus mous qu'en océan ouvert, couplées parfois au carottier Calypso Square (Casq) pour préserver les premiers mètres, en général perturbés au sommet des carottages à piston.

La systématique du traitement des carottes et des analyses faites à bord pendant les campagnes IMAGES a été suivie pour tous les sites. Les sédiments ont été décrits à bord, photographiés et leurs propriétés physiques (porosité, densité, susceptibilité magnétique, couleur) ont été mesurées tous les deux centimètres. Grâce à ces mesures non destructrices, un certain nombre d'hypothèses ont été faites à bord sur la corrélation entre les séries prélevées et leur âge possible.

L'exemple de la station 6 est donné dans la Figure 4 où il est clair qu'une corrélation très précise peut être obtenue entre les deux carottes Casq et Calypso grâce ici à un des paramètres de couleur mesurés à bord (b*).

Nous avons également parfois tiré partie, notamment dans les fjords de la structure en chenal de ceux-ci avec des séquences en biseau. En carottant à deux endroits différents choisis sur la base des profils échosondeurs réalisés à bord et en comparant les deux séries obtenues par la susceptibilité magnétique par exemple (Figure 5), on peut obtenir une série composite très longue.

Nous avons ainsi pu obtenir des séries d'âge Holocène extrêmement dilatées dans les fjords puisque la carotte de 46,33 m de long mentionnée plus haut n'atteint pas la base de l'Holocène à 10000 ans. En océan ouvert, nous avons pu échantillonner les différentes masses d'eau en présence comme le montre la répartition en profondeur des stations 14 à 17 à l'extrémité nord de notre zone d'étude (Figure 6).

La campagne a donc été extrêmement riche en échantillons de valeur et les analyses de très nombreux indicateurs sédimentologiques, géochimiques, volcaniques, magnétiques, micropaléontologiques, organiques, etc., sont maintenant en cours dans les différents laboratoires impliqués dans le projet et feront dans les mois et années à venir l'objet de synthèses scientifiques qui apporteront leur « brique » à la compréhension du système climatique et du rôle qu'y joue l'océan Austral.

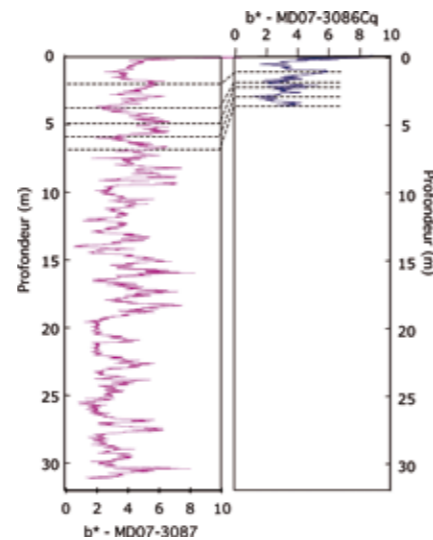


Figure 4. Exemple de corrélation (paramètre de couleur b*) entre deux carottes Calypso et Casq prélevées à la station 6 pendant la campagne MD159-PACHIDERME. En combinant les deux séquences (Casq pour le sommet puis Calypso), on peut donc reconstruire une série sédimentaire non perturbée d'environ 28 m.

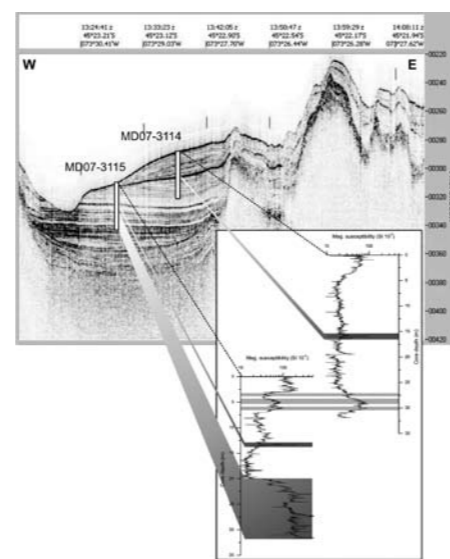


Figure 5. Profil d'échosondeur à la sortie du fjord Aysen montrant le biseautage des séries et le choix des deux stations 23 et 24. La corrélation entre les deux carottes Calypso (MD07-3114 et MD07-3115), basée sur la susceptibilité magnétique, montre que l'ensemble nous a permis de prélever environ 55 m de sédiment en continu avec une superposition d'environ 7 m.

REMERCIEMENTS,

Je tiens à remercier l'IPEV et IMAGES pour leur soutien. Le commandant J. P. Hedrich, le chef des opérations H. Leau, l'équipage du Marion Dufresne, l'équipe embarquée de l'IPEV ainsi que les scientifiques (chercheurs, techniciens, étudiants) qui ont rendu cette mission possible et fructueuse.

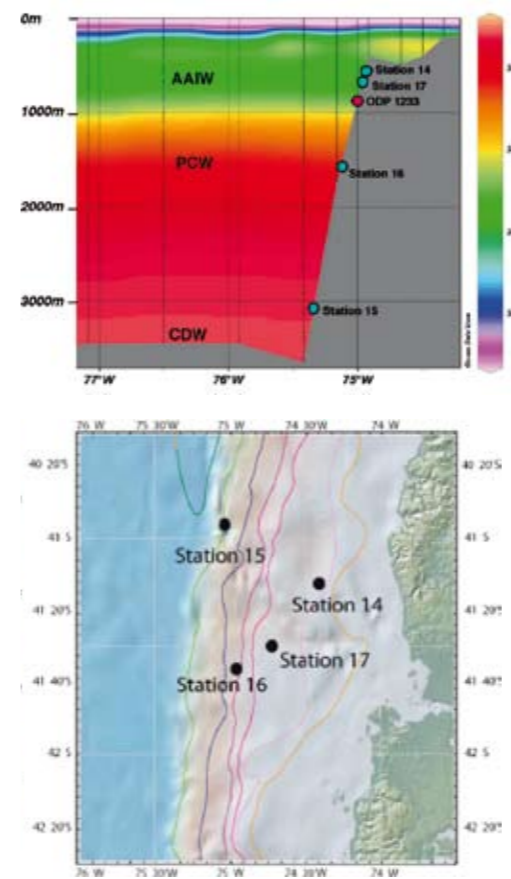
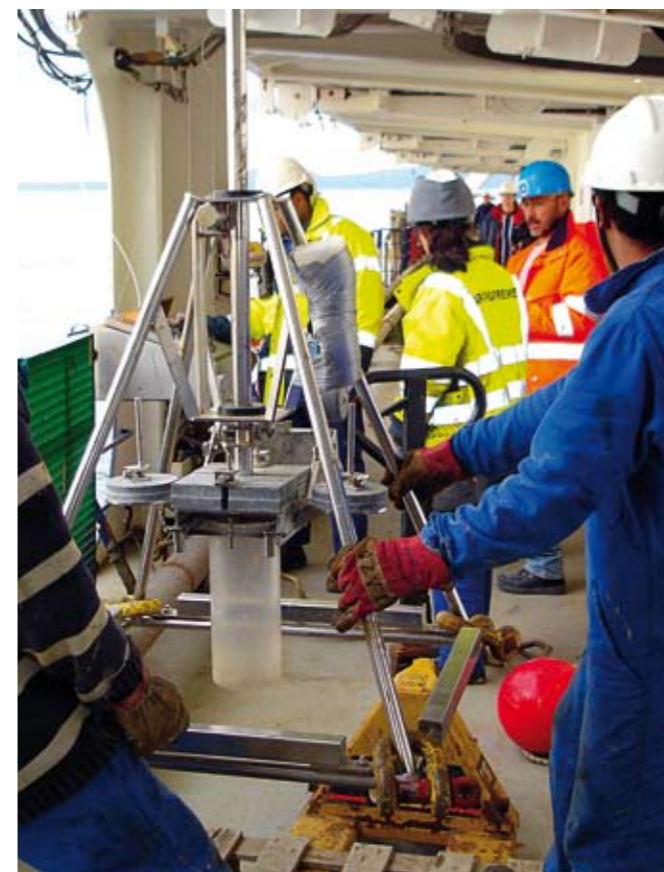


Figure 6. Stations de carottages les plus septentrionales de la campagne MD159-PACHIDERME (41°-42°S) en carte (à droite) et le long d'un profil de salinité WOCE (à gauche). Les stations de carottages sont situées dans la masse d'eau antarctique intermédiaire (AAIW), dans l'eau pacifique centrale (CDW) et au sein de l'eau profonde circumpolaire (PCW).



REFERENCES,

- Ocean productivity and organic carbon flux. Part I. Overview and maps of primary production and export production. Berger, W. H., K. Fischer, C. Lai, G. Wu. **SIO** - Reference 87-30, 1987.
- Silica depletion of the thermocline in the eastern North Pacific during glacial conditions: Clues from Ocean Drilling Program Site 893, Santa Barbara Basin, California. Berger, W.H., C.B. Lange, and A. Weinheimer. **Geology** - 25, 619-622, 1997.
- Geomorfología de las regiones australes de Chile. Revista Geográfica de Chile. Borgel, R. «**Terra Australis**» - 20: 135-140, 1970.
- Glacial-interglacial trench supply variation, spreading ridge subduction, and feedback controls on the andean margin development at the Chile triple junction area (45-48°S). Bourgeois J, Guivel C, Lagabrielle Y, Calmus T, Boulegues J, Daux V. **JGR** - 105, B4, 8355-8386, 2000.
- The climate of the Last Glacial Maximum: Results from a coupled atmosphere-ocean general circulation model. J. Geophys. Res. Bush A B G, Philander S G H. **Atm** - 104 (D20), 24509-24525, 1999.
- Interhemispheric linkage of paleoclimate during the last glaciation. Denton, G.H., Heusser, C.J., Lowell, T.V., Moreno, P.L., Andersen, B.G., Heusser, L.E., Schluchter, C., and Marchant, D.R. **Geografiska Annaler** - 81A, 107-153, 1999.
- Interdecadal climate fluctuations that depend on exchanges between the tropics and extratropics. Gu D.F, Philander S.G.H. **Science** - 275 (5301), 805-807, 1997.
- MD159-PACHIDERME-IMAGES XV, cruise report, Les rapports de campagne à la mer. Kissel, C. and the shipboard Scientific party. **Institut Paul-Emile Victor** - Ref OCE/2007/01.
- Holocene rainfall variability in southern Chile: a marine record of latitudinal shifts of the southern Westerlies. Lamy, F., Hebbeln, D., Röhl, U., Wefer, G. **Earth Planet. Sci. Lett.** - 185, 369-382, 2001.
- Antarctic timing of surface water changes off Chile and Patagonian ice-sheet response. Lamy F, Kaiser, J., Ninemann, U., Hebbeln, D., Arz, H and Stoner, J. **Science** - 304, 1959-1962, 2004.
- Holocene sedimentation rates on the Southern Chilean margin. Leventer, A.R., S. Aavang, J. Stravers, S. Ishman, and L. Krissek. **Antarctic Journal of the U.S.** - 25, 13-16, 1995.
- Subantarctic Mode Water, in M. Angel. McCartney, M.S. (ed.) **A Voyage of Discovery, Pergamon, Elmsford, N.Y.** pp. 103-119, 1977.
- The shallow salinity minima of the Pacific Ocean. Reid, J.L. **Deep-Sea Res.** - 20 (1), 51-68, 1973.
- Proceedings of the Ocean Drilling Program. Schonfeld, J., Spiegler, D., and Erlenkeuser H. **Scientific Results** - vol 141, 235-240, 1995.
- El aporte de la Escuela de Ciencias del Mar, Facultad de Recursos Naturales. Silva, N. **Universidad Católica de Valparaíso, al conocimiento de los fjordos y canales australes chilenos (41°20'S-55°58'S)**. <http://www.oceanografia.cl/ECM/Fjordos.pdf>, 2002.
- Coastal ocean circulation off Western South America, in: A. R. Robinson, K. H. Brink. Strub, P. T., Mesias, J. M., Montecino, V., Tuttlant, J., Salinas, S. (eds), **The Global Coastal Ocean, Regional Studies and Syntheses** - Wiley - New York, 1998, pp273 - 315.
- Antarctic Intermediate Water in the South Atlantic, in G. Wefer et al. Talley, L.D. eds., **The South Atlantic: Present and Past Circulation, Springer-Verlag** - N.Y., pp. 219-238, 1996.
- A Pacific hydrographic section at 88 degrees. Tsuchiya M. and Talley L.D. W: **Water-property distribution, J. Geophys. Res - oceans** - 103 (C6): 12899-12918, 1998.