

Conclusions et perspectives

Nous avons effectué une étude des relations entre les variations climatiques de la fin du Quaternaire et les phénomènes biologiques dans l'océan Pacifique équatorial.

L'océan Pacifique équatorial est actuellement la principale région du globe où du CO₂ est transféré de l'océan à l'atmosphère. L'un des enjeux du projet initial était d'étudier les contributions de cette source aux variations glaciaires/interglaciaires de la concentration atmosphérique en CO₂. Nous avons choisi d'étudier les variations de productivité biologique qui est l'un des facteurs qui influencent les échanges de CO₂ entre l'océan et l'atmosphère, et qui est donc l'un des mécanismes qui peut expliquer la diminution de 30 à 40 % de la concentration atmosphérique de CO₂ lors du dernier maximum glaciaire. Les réponses que nous apportons sont partielles. En revanche, notre étude a permis, d'une part, de résoudre une contradiction apparente entre différents proxies de productivité biologique dans l'océan Pacifique équatorial et, d'autre part, de mettre en évidence l'intérêt d'un nouveau proxy pour les études paléocéanographiques relatives aux variations climatiques de l'ère Quaternaire.

Dans la première partie de ce travail, nous avons utilisé les isotopes des chaînes de désintégration de l'uranium, et notamment le rapport $(^{231}\text{Pa}/^{230}\text{Th})_{\text{xs},0}$, pour étudier les variations de productivité biologique (Walter et al., 1999). Au début de cette thèse, les méthodes de mesures les plus utilisées (comptage α et β) étaient relativement lentes pour des études à grandes échelles. De plus, leur précision atteignait au mieux 5 % (intervalle de confiance à 95 %), et était le plus souvent de l'ordre de 10 %, ce qui empêchait la mise en évidence de faibles variations du rapport $(^{231}\text{Pa}/^{230}\text{Th})_{\text{xs},0}$. L'avènement d'une génération d'ICP-MS permettant d'obtenir des sommets de pics plats nous a permis de développer une méthode qui combine une précision de l'ordre de 1,5 % et une grande rapidité de mesure. L'évaluation des corrections de la mesure des concentrations de ^{231}Pa et de ^{230}Th a permis d'améliorer la précision des résultats, ce qui devrait permettre d'utiliser la méthode pour l'analyse des déséquilibres radioactifs dans les roches volcaniques récentes. Nous avons également testé différentes méthodes de séparation physico-chimique des isotopes du Pa, du Th, et de l'U. Compte tenu des avantages et des

inconvénients de chaque méthode, nous avons finalement préféré l'utilisation de la séparation sur résines échangeuses d'anions (AG1-X8).

Nous avons analysé deux carottes sédimentaires de l'océan Pacifique équatorial, avec une haute résolution, en couvrant les 85 000 dernières années, soit l'Holocène, les stades isotopiques 2, 3 et 4, et la fin du stade isotopique 5. Notre étude prend donc en compte quatre transitions entre périodes tempérées et froides. Nous avons mis en évidence un transfert de ^{231}Pa vers l'océan Pacifique équatorial depuis le reste du bassin Pacifique lors des périodes tempérées, et une diminution systématique du rapport $(^{231}\text{Pa}/^{230}\text{Th})_{\text{xs},0}$ lors des stades isotopiques 2 et 4. Ces données étendent les observations de Lao et al. (1992) qui portaient sur le dernier maximum glaciaire et l'Holocène. Nos observations nous permettent de lier les variations du rapport $(^{231}\text{Pa}/^{230}\text{Th})_{\text{xs},0}$, dans le Pacifique équatorial, aux variations de productivité biologique plutôt qu'à des changements globaux de flux sur l'ensemble de l'océan Pacifique. Une influence de ces derniers n'est cependant pas exclue, mais elle semble mineure. Notre étude met donc en évidence une diminution de la productivité biologique lors des périodes froides, c'est-à-dire lors des stades isotopiques 2 et 4. Au contraire, les taux d'accumulations de carbonate de calcium (Archer, 1991; Lyle et al., 1988), de carbone organique (Lyle et al., 1988), et de sulfate de baryum (Paytan et al., 1996) semblent indiquer une augmentation. Cette apparente contradiction a été résolue par l'étude des flux verticaux de particules, déduits de l'excès de ^{230}Th ($^{230}\text{Th}_{\text{xs},0}$) dans les sédiments. Nous avons ainsi démontré que lors des périodes froides, en particulier au dernier maximum glaciaire, les taux d'accumulation du carbonate de calcium et du sulfate de baryum étaient artificiellement augmentés par une intensification de la redistribution des sédiments par les courants profonds. L'érosion de sédiments hors de la zone équatoriale et leur dépôt dans la zone équatoriale expliquerait ce phénomène (Higgins et al., 1999). Cette conclusion rejoint les observations de Marcantonio et al. (2001).

En nous fondant sur l'hypothèse de la limitation de la productivité biologique par le fer (Martin and Fitzwater, 1988), nous avons proposé que les diminutions de productivité biologique, lors des périodes froides, dans l'océan Pacifique équatorial, sont la conséquence de la baisse de concentration du fer du courant sous-équatorial. Effectivement, ce courant est, d'une part, la source de la remontée d'eau froide, induite

par la convergence des alizés à l'équateur (Tomzack and Bradley, 1994), et, d'autre part, il serait la source principale de fer de l'océan Pacifique équatorial (Coale et al., 1996; Gordon et al., 1997), par le biais des apports érosifs de l'île de la Nouvelle-Guinée (Milliman et al., 1999; Sholkovitz, 1999; Wells et al., 1999). Lors des périodes froides, la baisse du niveau de la mer augmente considérablement la superficie des plateaux continentaux de Nouvelle-Guinée. Cela aurait eu pour conséquences (1) d'augmenter la surface des estuaires des rivières, où a lieu une précipitation de colloïdes de fer induite par le contact entre les masses d'eaux douces et salées (Elderfield et al., 1990, Sholkovitz et al., 1995), et (2) de provoquer une accumulation des apports fluviaux sur ces plateaux (Milliman et al., 1999). Ainsi, les apports sédimentaires particuliers qui alimentent le courant sous-équatorial aurait diminué de manière notable, ce qui aurait entraîné une diminution de la concentration en fer de ce courant et donc une diminution de la productivité biologique dans le Pacifique équatorial. En conséquence, puisque l'efficacité de la pompe biologique diminue, et que des études sur les températures de surface de l'eau de mer (Lyle et al., 1992) et sur les isotopes du bore (Sanyal et al., 1997) montrent une légère intensification de la remontée d'eau froide, le transfert de CO₂ de l'océan vers l'atmosphère dans l'océan Pacifique équatorial aurait été plus important lors des périodes froides.

L'implication est qu'il doit exister une zone où se produit un transfert important de CO₂ de l'atmosphère vers l'océan, lors des mêmes périodes, pour expliquer la baisse de 30 à 40 % de la teneur en CO₂ atmosphérique enregistrée dans les carottes de glaces (Barnola et al., 1987; Jouzel et al., 1993; Raynaud et al., 1993; Petit et al., 1999). De nombreuses études tendent à montrer que l'océan Antarctique aurait pu jouer ce rôle (Knox and McElroy, 1984; Henderson and Slowey, 2000; Sigman and Boyle, 2000). Pendant la période glaciaire, la stratification verticale de l'océan Antarctique, au sud du front polaire actuel, est plus marquée, ce qui aurait diminué le transfert de CO₂ vers l'atmosphère (François et al., 1997; Sigman et al., 1999a) et aurait augmenté le taux d'utilisation des nutriments (Sigman et al., 1999b; Rosenthal et al., 2000). De plus, même si ce dernier argument est l'objet de nombreuses controverses, il semble que la productivité biologique aurait augmenté (Kumar et al., 1995; François et al., 1997) au

nord du front polaire actuel, vraisemblablement en relation avec une augmentation des apports de fer (Martin, 1990).

Dans la deuxième partie de ce travail, nous avons cherché à obtenir des informations paléocéanographiques à partir de la composition isotopique du zinc. En effet, le zinc est incorporé dans de nombreux processus biologiques qui utilisent préférentiellement ses isotopes légers, ce qui crée un fractionnement isotopique. Notre première idée était donc que les variations des compositions isotopiques en zinc étaient liées aux changements de l'activité biologique. En postulant que le zinc contenu dans les squelettes d'organismes marins est proche de l'équilibre avec les ions zinc présents dans l'eau de mer, comme cela semble être le cas pour l'oxygène et le carbone (Margolis et al., 1975, Shackleton and Hall, 1995), nous avons déterminé la composition isotopique du zinc dans la fraction carbonatée des carottes sédimentaires marines. Dans un premier temps, nous avons mis au point une méthode d'extraction spécifique de la fraction carbonatée. L'excellente reproductibilité des mesures, et la cohérence du signal isotopique enregistré pour une carotte de l'océan Pacifique équatorial est, correspondant aux 175 000 dernières années, ont montré l'absence de contamination externe, de contribution des autres fractions du sédiment, et de fractionnement isotopique pendant la préparation chimique des échantillons.

Les résultats indiquent que les variations de la composition isotopique du zinc de la fraction carbonatée semblent, en fait, liées à l'existence d'un isolement saisonnier de la couche euphotique, c'est-à-dire de la couche d'eau superficielle où a lieu le développement biologique. Cette conclusion est en accord avec l'interprétation de Maréchal et al. (2000) pour la composition isotopique du zinc des nodules ferromanganésiens. Nous avons mis en évidence que le signal en $\delta^{66}\text{Zn}$ est modulé par la précession mais ne l'est pas par l'obliquité. L'intervalle temporel couvert par nos données n'a pas permis d'observer une éventuelle modulation par l'excentricité.

L'intensité des alizés étant régulée par la précession (McIntyre and Molino, 1996), nous avons proposé que la baisse de la force des alizés ralentit la remontée d'eau froide à l'équateur, lors des périodes de diminution d'insolation en été austral et

d'augmentation d'insolation en hiver austral. Ce phénomène permettrait le développement d'une thermocline qui isole les eaux de surface. Cet isolement induirait l'appauvrissement rapide des eaux de surface en l'isotope le plus léger du zinc (^{64}Zn), à cause de son incorporation préférentielle dans les réactions biologiques. Nous avons ainsi mis en évidence l'incidence locale d'un phénomène orbital. A notre connaissance, ces travaux sont les premiers sur la fraction carbonatée des sédiments marins, notre interprétation reste à confirmer par de futures recherches.

Plusieurs voies de recherche ont été abordées dans cette étude. Tous les travaux entrepris n'ont pas pu être menés à terme. Certaines de nos conclusions nécessiteraient d'être confirmées par de nouvelles études. Quelques perspectives que nous espérons développer rapidement sont présentées ci-après.

La poursuite de l'étude des rapports $(^{231}\text{Pa}/^{230}\text{Th})_{\text{xs},0}$ de la carotte MW91-9, située sur le plateau de Ontong Java, sous le courant sous-équatorial, permettrait de vérifier l'hypothèse que nous avons proposée pour la réduction de la productivité biologique dans l'océan Pacifique équatorial, lors des périodes glaciaires. Le Pacifique apparaît, en effet, comme une zone idéale pour utiliser le rapport $(^{231}\text{Pa}/^{230}\text{Th})_{\text{xs},0}$ afin de reconstruire les variations de productivité biologique à différentes époques du Quaternaire. Nous avons éliminé les apports éoliens comme source principale de variabilité du rapport $(^{231}\text{Pa}/^{230}\text{Th})_{\text{xs},0}$ dans l'océan Pacifique équatorial. Cependant, une reconstruction de la productivité biologique à l'échelle du bassin Pacifique nécessiterait de coupler l'étude du rapport $(^{231}\text{Pa}/^{230}\text{Th})_{\text{xs},0}$ à une étude relative aux apports éoliens. La taille des particules éoliennes fournit des indications sur l'intensité des vents tandis que les taux d'accumulation, normalisés au $^{230}\text{Th}_{\text{xs},0}$, de ces particules renseignent sur la disponibilité de matériel transporté; enfin, la composition des particules éoliennes reflète leur source (Rea et al., 1985; Nakai et al., 1993). Les variations du rapport $(^{231}\text{Pa}/^{230}\text{Th})_{\text{xs},0}$ des carottes situées dans la zone de circulation giratoire de l'océan Pacifique nord sont extrêmement faibles. Les mesures par spectrométrie alpha et bêta, effectuée par Lao et al. (1992), ne permettaient pas de les mettre en évidence. La technique de mesure que nous avons développée devrait permettre de les déterminer. Enfin, cette approche pourrait être

couplée à la poursuite du développement d'un modèle de transport latéral fondé sur un modèle de boîte (Albarède, 2001).

La source des sédiments qui se déposent à l'équateur à la suite à leur érosion par les courants de fond n'est pas identifiée. En se fondant sur des études actuelles de courants de fond, au site C du projet MANOP, Marcantonio et al. (2001) ont proposé que ce site était le lieu d'érosion des sédiments qui se déposent au niveau du Pacifique équatorial central. La mesure du $^{230}\text{Th}_{\text{xs},0}$, à basse résolution, sur quatre à cinq carottes qui forment un transect nord-sud, de part et d'autre de l'équateur permettrait de déterminer à quelle distance se trouve la source des sédiments redéposés à l'équateur. Cette étude pourrait être complétée par d'autres mesures, sur des transects est-ouest, qui permettraient d'estimer l'extension spatiale de la source et de ses éventuelles variations temporelles.

La poursuite de l'étude de la composition isotopique du zinc de la fraction carbonatée de carottes de sédiments marins, dans l'océan Pacifique équatorial, permettrait de vérifier l'hypothèse que nous avons proposée. Un autre moyen de vérification serait d'utiliser les particules carbonatées collectées dans des pièges à particules dans une zone où se développe une thermocline saisonnière. Une extension de cette approche serait l'enregistrement de la fréquence des phénomènes de type El-Niño au cours du Quaternaire. Enfin, une étude de la variabilité géographique du $\delta^{66}\text{Zn}$ permettrait également d'obtenir une meilleure connaissance des processus de fractionnement isotopiques du zinc.

Bibliographie

- Albarède, F., Radiogenic ingrowth in systems with multiple reservoirs: applications to the differentiation of the mantle-crust system, *Earth Planet. Sci. Lett.* **189**, 59-73, 2001.
- Archer, D. E., Equatorial Pacific calcite preservation cycles: production or dissolution ?, *Paleoceanography* **6**, 561-571, 1991.
- Barnola, J. M., D. Raynaud, Y. S. Korotkevich, and C. Lorius, Vostok ice core provides 160,000 year record of atmospheric CO₂, *Nature* **329**, 408-414, 1987.
- Coale, K.H., S. E. Fitzwater, R. M. Gordon, K. S. Johnson, and R. T. Barber, Control of community growth and export production by upwelled iron in the equatorial Pacific ocean, *Nature* **379**, 621-624, 1996.
- Elderfield, H., R. Upstill-Goddard, and E. R. Sholkovitz, The rare earth elements in rivers, estuaries and coastal sea waters: processes affecting crustal input of elements to the ocean and their significance to the composition of sea water, *Geochim. Cosmochim. Acta* **54**, 971-991, 1990.
- François, R., M. A. Altabet, E.-F. Yu, D. Sigman, M.P. Bacon, M. Frank, G. Bohrmann, G. Bareille, and L. D. Labeyrie, Contribution of southern ocean surface water stratification to low atmospheric CO₂ concentrations during the last glacial period, *Nature* **389**, 929-935, 1997.
- Gordon, R. M., K. H. Coale, and K. S. Johnson, Iron distributions in the equatorial Pacific: Implications for new production, *Limnol. Ocean.* **42**, 419-431, 1997.
- Henderson, G. M., and N. C. Slowey, Evidence against northern-hemisphere forcing of the penultimate deglaciation from U-Th dating, *Nature* **402**, 61-66, 2000.
- Higgins, S. M., W. S. Broecker, R. F. Anderson, D. C. McCorkle, and D. Timothy, Enhanced sedimentation along the Equator in the Western Pacific, *Geophys. Res. Lett.* **26**, 3489-3492, 1999.

- Jouzel, J., N. I. Barkov, J. M. Barnola, M. Bender, J. Chapellaz, C. Genthon, V. M. Kotlyakov, V. Lipenkov, C. Lorius, J. R. Petit, D. Raynaud, G. Raisbeck, C. Ritz, T. Sowers, M. Stievenard, F. Yiou, and P. Yiou, Extending the Vostock ice-core record of palaeoclimate to the penultimate glacial record, *Nature* **364**, 407-412, 1993.
- Knox, F., and M. McElroy, Changes in atmospheric CO₂: Influence of the marine biota at high latitudes, *J. Geophys. Res.* **89**, 4629-4637, 1984.
- Kumar, N., R. F. Anderson, R. A. Mortlock, P. N. Froelich, P. Kubik, B. Dittrich-Hannen, and M. Suter, Increased biological productivity and export production in the glacial Southern Ocean, *Nature* **378**, 675-680, 1995.
- Lao, Y., R. F. Anderson, and W. S. Broecker, Boundary scavenging and deep-sea sediment dating: constraints from excess 230Th and 231Pa., *Paleoceanography* **7**, 783-798, 1992.
- Lyle, M. W., F. G. Prahl, and M. A. Sparrow, Upwelling and productivity changes inferred from a temperature record in the central equatorial Pacific, *Nature* **355**, 812-815, 1992.
- Lyle, M., D. W. Murray, B. P. Finney, J. Dymond, J. M. Robbins, and K. Brooksforce, The record of the late Pleistocene biogenic sedimentation of the eastern tropical Pacific Ocean, *Paleoceanography* **3**, 39-59, 1988.
- McIntyre, A. and B. Molino, Forcing of Atlantic equatorial and subpolar millennial cycles by precession, *Science* **274**, 1867-1870, 1996.
- Marcantonio, F., R. F. Anderson, S. Higgins, M. Stute, and P. Schloesser, Sediment focusing in the central equatorial Pacific Ocean, *Paleoceanography* **16**, 260-267, 2001.
- Maréchal, C. N., E. Nicolas, C. Douchet, and F. Albarede, The abundance of zinc isotopes as a marine biogeochemical tracer, *Geochem. Geophys. Geosyst.* **1**, 1999GC000029, 2000.
- Margolis, S. V., P. M. Kroopnick, D. E. Goodney, W. C. Dudley, and M. E. Mahoney, Oxygen and carbon isotopes from calcareous nannofossils as paleoceanographic indicators, *Science* **189**, 555-557, 1975.

- Martin, J. H., Glacial-Interglacial CO₂ change: The iron hypothesis, *Paleoceanography* **5**, 1-13, 1990.
- Martin, J. H., and S. E. Fitzwater, Iron deficiency limits phytoplankton growth in the north-east Pacific subarctic, *Nature* **331**, 341-343, 1988.
- Milliman, J. D., K. L. Farnsworth, and C. S. Albertin, Flux and fate of fluvial sediments leaving large islands in the East Indies, *J. Sea Res.* **41**, 97-107, 1999.
- Nakai, S., A. N. Halliday, and D. K. Rea, Provenance of dust in the Pacific Ocean, *Earth Planet. Sci. Lett.* **119**, 143-157, 1993.
- Paytan, A., M. Kastner, and F. Chavez, Glacial to interglacial fluctuations in productivity in the equatorial Pacific as indicated by marine barite, *Science* **274**, 1355-1357, 1996.
- Petit, J. R., J. Jouzel, D. Raynaud, N. I. Barkov, J.-M. Barnola, I. Basile, M. Bender, J. Chappellaz, M. Davis, G. Delaygue, M. Delmotte, V. M. Kotlyakov, M. Legrand, V. Y. Lipenkov, C. Lorius, L. Pepin, C. Ritz, E. Saltzman, and M. Stievenar, Climate and atmospheric history of the past 420,000 years from the Vostock ice core, Antarctica, *Nature* **399**, 429-436, 1999.
- Raynaud, D., J. Jouzel, J. M. Barnola, J. Chappellaz, R. J. Delmas, and C. Lorius, The ice record of greenhouse gases, *Science* **259**, 926-934, 1993.
- Rea, D. K., M. Leinen, and T. R. Janecek, Geologic approach to the long-term history of atmospheric circulation, *Science* **227**, 721-725, 1985.
- Rosenthal, Y., M. Dahan, and A. Shemesh, Southern Ocean contributions to glacial-interglacial changes of atmospheric pCO₂: an assessment of carbon isotope records in diatoms, *Paleoceanography* **15**, 65-75, 2000.
- Sanyal, A., N.G. Hemming, W.S. Broecker, and G.N. Hanson, Changes in pH in the Eastern Equatorial Pacific across stage 5-6 boundary based on boron isotopes in foraminifera, *Global Biogeochem. Cycles* **11**, 125-133, 1997.
- Shackleton, N. J., and M. A. Hall, Stable isotope record in bulk sediments (Leg 138). In *Proc. ODP, Sci. Results, 138*, Pisias, N. G., L. A. Mayer, T. R. Janecek, A. Palmer-

- Julson, and T. H. van Andel (Eds), College Station, TX (Ocean Drilling Program), U.S.A., 797-806, 1995.
- Sholkovitz, E. R., H. Elderfield, R. Szymczak, and K. Casey, Island Weathering: River Sources of Rare Earth Elements to the Western Pacific Ocean. *Marine Chemistry*, **68**, 39-57, 1999.
- Sholkovitz, E. R., The aquatic chemistry of rare earth elements in rivers and estuaries, *Aquatic Geochem.* **1**, 1-34, 1995.
- Sigman, D. M., and E. A. Boyle, Glacial/interglacial variations in atmospheric carbon dioxide, *Nature* **407**, 819-928, 2000.
- Sigman, D. M., M. A. Altabet, D. C. McCorkle, R. François, and G. Fisher, The $\delta^{15}\text{N}$ of nitrate in the southern ocean: consumption of nitrate in surface waters, *Global Biogeochem. Cycles* **13**, 1149-1166, 1999a.
- Sigman, D. M., M. A. Altabet, R. François, D. C. McCorkle, J.-F. Gaillard, The isotopic composition of diatom-bound nitrogen in Southern Ocean sediments. *Paleoceanography* **14**, 118-134, 1999b.
- Tomczak, M., and J. S. Godfrey, Regional oceanography: an introduction, Pergamon, Oxford, U.K., 442 pp., 1994.
- Walter, H. J., M. M. Rutgers van der Loeff, and R. François, Reliability of the $^{231}\text{Pa}/^{230}\text{Th}$ activity ratio as a tracer for bioproductivity of the ocean. In Use of proxies in paleoceanography: Examples from the South Atlantic, Fischer, G., and G. Wefer (Eds), Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, Germany, 393-408, 1999.
- Wells, M. L., G. Vallis, and E. Silver, Influence of tectonic processes in Papua New Guinea on past productivity in the eastern equatorial Pacific Ocean, *Nature* **398**, 601-604, 1999.