

Évolution du climat et de l'océan

M. Édouard BARD, membre de l'Institut
(Académie des sciences), professeur

ENSEIGNEMENT DE L'ANNÉE 2009-2010

Le cours n'a pas eu lieu.

CONFÉRENCES ET PRÉSENTATIONS DE L'ANNÉE 2009-2010

Woods-Hole Oceanographic Institution (États-Unis), 21-25 septembre 2009, colloque PALSEA sur l'évolution du niveau marin et des calottes de glace (PAGES-IGBP working group) :

- Bard E. : « U-Th and ^{14}C : historical aspects and useful similarities » ;
- Deschamps P., Durand N., Bard E., Hamelin B., Camoin G., Thomas A.L., Henderson G.M., Yokoyama Y. : « Variation of the Sea-Level and of seawater uranium-isotopes ratio during the Last Deglaciation : New Insights from the IODP 310 'Tahiti Sea-Level' Expedition ».

France Culture, 10 décembre 2009, émission La marche des Sciences : « L'odyssée du climat », <http://www.franceculture.com/emission-l-odysee-du-climat-2009-12-10.html>

San Francisco, 14-18 décembre 2009, American Geophysical Union Fall Meeting :

- Félis T., Merkel U., Asami R., Deschamps P., Hathorne E., Kölling M., Bard E., Cabioch G., Durand N., Prange M., Schulz M., Cahyarini S.Y., Pfeiffer M. : « Interannual variability in tropical Pacific temperatures during Heinrich stadial 1 ».

Paris, 8-9 mars 2010, Institut d'Astrophysique de Paris, Premier colloque sur le satellite Picard :

- Bard E. : « Solar record based on cosmogenic nuclides ».

France Culture, 1^{er} avril 2010, émission La marche des Sciences : « Histoire d'un couple : soleil-climat », <http://www.franceculture.com/emission-histoire-d-un-couple-soleil-climat-2010-04-01.html>

Rome, 12-14 avril 2010, Science meeting on the Talos Dome Ice Core Project (Taldice) and European Project of Ice Coring in Antarctica (EPICA) :

- Baroni M., Bard E., Bourles D. : « Beryllium 10 record over the last deglaciation from the Talos Dome ice core » ;

- Raisbeck G.M., Aumaitre G., Arnold M., Bard E., Bourles D., Jouzel J. : « Use of paleomagnetic intensity to synchronize EPICA Dome C with marine sediments ».

Vienne, 2-7 mai 2010 : European Geosciences Union General Assembly :

- Durand N., Deschamps P., Bard E., Hamelin B., Camoin G., Thomas A.L., Henderson G.M., Yokoyama Y. : « New insights into the radiocarbon calibration based on ^{14}C and U-Th dating of corals drilled offshore Tahiti (IODP Expedition #310) » ;

- Cartapanis O., Tachikawa K., Bard E. : « The past 60 kyr variability of the oxygen minimum zone off Baja California inferred from multi-elemental analysis ».

Kuala Lumpur, 21-25 juin 2010, International Panel on Climate Change (GIEC), IPCC WG1 Workshop on Sea Level Rise and Ice Sheet Instabilities :

- Bard E. (keynote speaker) : « Records of Past Sea Level Change: Amplitudes and Rates ».

Belfast, 28-29 juin 2010, IntCal Working Group meeting, Queen's University Belfast :

- Bard E. : « Radiocarbon calibration records based on marine sediments from the Pakistan Margin and corals from Tahiti (IODP exp. #310) ».

Aix-en-Provence, 2-4 juillet 2010, Rencontres économiques d'Aix-en-Provence organisées par le Cercles des économistes. Table ronde sur « Le monde après Copenhague ».

ACTIVITÉS DE RECHERCHES

Nous avons étudié en détail les variations du niveau marin pendant les deux dernières déglaciations ayant entraîné de formidables remontées du niveau marin mondial d'une centaine de mètres. Durant ces périodes, de nombreux autres paramètres climatiques et océanographiques ont subi des variations de premier ordre : réchauffement mondial de l'ordre de 5 °C, augmentation d'environ 40 % des teneurs atmosphériques en gaz à effet de serre (gaz carbonique et méthane), diminution de la vitesse des vents, réorganisation de la circulation océanique...

Excellents indicateurs de la variation du niveau marin, les coraux constituent une véritable archive de la dynamique des calottes polaires et du climat passé. Nécessitant beaucoup de lumière pour se développer, ils vivent dans de faibles tranches d'eau, entre 0 et 10 m de profondeur. Lorsque la mer monte, le récif colonise la pente littorale et les coraux plus anciens, ennoyés sous une épaisse tranche d'eau, périssent par manque de lumière. De plus, il est aisé de les dater par différentes méthodes radiogéniques (radiocarbone, uranium/thorium).

Un nouvel article (Bard *et al.*, 2010, *Science*) est focalisé sur le cœur de cette période (14 000 à 9 000 années avant le présent) en datant par U-Th de nombreux coraux fossiles du récif barrière de Tahiti. Pendant ces cinq millénaires le niveau est monté de plus de 50 m, ce qui représente l'équivalent de presque toute la glace actuelle de l'Antarctique venue alimenter l'océan. Le rythme moyen de remontée du niveau marin est d'environ un centimètre par an, soit le triple de ce qu'on observe actuellement avec les satellites.

Avec un nombre d'analyses sans précédent, nous avons aussi pu montrer qu'il y a une corrélation entre le taux de remontée et les événements climatiques globaux, notamment la succession de phases chaudes et froides. En particulier, on observe

un ralentissement pendant la période froide du Dryas récent et une accélération du niveau marin, synchrone du réchauffement holocène.

Ces travaux auront de nombreuses implications dans plusieurs domaines de la climatologie, de la géophysique et d'autres disciplines. La chronologie précise du cœur de la déglaciation est fondamentale pour estimer les déphasages entre les forçages climatiques (insolation, $p\text{CO}_2$ atmosphérique) et les variations de la température moyenne et du niveau marin. Cette chronologie est aussi cruciale pour estimer les dates de submersion des zones côtières et de certains bassins importants : ouvertures du Détroit de Béring, et des détroits de la Mer du Japon, ennoissements de la Mer Noire et du Golfe Persique (et légendes du déluge associées), la fermeture de la Grotte Cosquer, etc.

Plusieurs auteurs ont développé des relations semi empiriques entre le niveau marin et la température globale pour des échelles de temps allant du dernier siècle à plusieurs millénaires. Ce type de relation statistique a même servi à réviser à la hausse les projections du GIEC pour les prochains siècles. Il y a cependant un débat scientifique sur les incertitudes de ce type d'approche et notre observation d'une corrélation entre le niveau marin et la température à long terme sera utilisée dans ce contexte ainsi qu'au travers de vraies modélisations des calottes glaciaires de l'époque.

Nos données sur le niveau marin à Tahiti seront aussi intégrées dans les modèles numériques qui simulent le réajustement glacio-hydro-isostatique postglaciaire. En effet, la Terre se déforme sous l'effet des calottes de glace. Un inlandsis de plusieurs kilomètres d'épaisseur crée une dépression de l'écorce terrestre d'environ un kilomètre, ce qui entraîne des déplacements de masse à grande échelle et même une variation du moment d'inertie de notre planète et donc de la durée du jour. Ces variations produisent un effet similaire à celui d'un patineur qui tournerait sur lui-même et étendrait ses bras ou les ramènerait contre lui.

Cet aspect géophysique est aussi crucial pour corriger les données récentes produites par les marégraphes, ainsi que les satellites altimétriques et gravimétriques. Les paramètres de ces modèles sont ajustés pour correspondre aux données observées sur le niveau marin à long terme, notamment celles que nous produisons en datant les coraux. Les séries longues allant jusqu'au milieu de la déglaciation sont très rares (une demi-douzaine de par le monde) et l'enregistrement de Tahiti est unique au milieu du Pacifique.

Afin de compléter ces études, nous avons réussi à convaincre les scientifiques, techniciens et administrateurs du programme international *Integrated Ocean Drilling Program* de réaliser des forages au large de l'île de Tahiti (*proposal* n° 519 par Camoin, Bard, Hamelin & Davies). La campagne de forage du Leg IODP 310 avait finalement eu lieu en novembre 2005 et nous avait permis de prélever plus de 400 m de matériel récifal post-glaciaire à des profondeurs de 122 à 40 m au-dessous du niveau marin actuel.

Grâce à celles-ci, nous avons pu restituer la croissance du récif sur les derniers 150 000 ans (Thomas *et al.*, 2009, *Science*). Nous avons ainsi daté précisément le début de l'avant dernière déglaciation, il y a 137 000 ans, et montré que le niveau marin avait atteint la cote de -85 mètres par rapport au niveau actuel. À cette époque,

l'énergie solaire reçue par la Terre en été, élément déterminant des cycles climatiques, était maximale dans l'hémisphère Sud et minimale dans l'hémisphère Nord. Tout le contraire de ce qu'avancait jusqu'à aujourd'hui la communauté scientifique : la moitié australe du globe est également le siège de phénomènes moteurs dans les cycles glaciaires/interglaciaires, et pas uniquement la partie boréale.

Le processus déclencheur des épisodes de déglaciation serait donc plus complexe que l'idée, longtemps admise, selon laquelle le facteur principal de la construction (ou la diminution) des calottes de glaces est l'insolation pendant la période estivale aux hautes latitudes de l'hémisphère Nord. Pour expliquer les cycles climatiques, il faut regarder du côté de la relation de la Terre avec son soleil : c'est la théorie astronomique du climat, développée par l'astronome serbe Milutin Milankovitch au début du xx^e siècle. Selon celle-ci, les paramètres orbitaux de la Terre régissent son climat en modulant les variations saisonnières et latitudinales d'énergie solaire reçue à la surface de la planète. Les étés chauds sont favorables à la fonte progressive des calottes de glaces. Inversement, plus les étés sont frais, plus les calottes s'accroissent.

Dans l'hémisphère Sud, les continents n'occupent qu'une très faible surface. D'où l'idée longtemps admise, avancée par Milankovitch, selon laquelle cette moitié du globe ne jouerait qu'un faible rôle dans le déclenchement des glaciations/déglaciations. Par contre, dans l'hémisphère boréal, les continents prédominent par rapport à l'océan. La ceinture continentale (Amérique et Eurasie) autour du pôle Nord offre ainsi un support permettant à de grandes calottes glaciaires de se construire. Pour mieux disparaître en période de déglaciation et modifier le climat terrestre dans son ensemble.

Grâce aux indications sur les variations du niveau des mers, et donc des calottes polaires, révélées par les coraux tahitiens, nous pouvons donc modifier l'hypothèse classique d'après laquelle seule l'insolation aux hautes latitudes Nord influe sur les changements glaciaires/interglaciaires. Dans notre article (Thomas *et al.*, 2009, *Science*) nous avançons que la fin de l'avant-dernière période glaciaire, il y a 137 000 ans, mettait en jeu des phénomènes dans les deux hémisphères terrestres. Ces travaux apportent donc un éclairage nouveau sur les processus de fonte des calottes et le rôle majeur qu'ils ont pu jouer par le passé sur les variations rapides du niveau marin.

PUBLICATIONS

2010

Bard E., Hamelin B., Delanghe-Sabatier D., « Deglacial melt water pulse 1B and Younger Dryas sea-levels revisited with new onshore boreholes at Tahiti », *Science*, 327, 2010, 1235-1237 + 15 p. suppl.

Delaygue G., Bard E., « An Antarctic view of beryllium-10 and solar activity for the past millennium », *Climate Dynamics*, 2010, DOI:10.1007/s00382-010-0795-1.

Leduc G., Vidal L., Tachikawa K., Bard E., « Evidences for Glacial North Pacific Intermediate Water formation during the last glacial period », *Earth and Planetary Science Letters*, 298, 2010, DOI:10.1016/j.epsl.2010.08.002, 217-228.

Legras B., Mestre O., Bard E., Yiou P., « On misleading solar-climate relationship » *Climate of the Past*, 6, DOI:10.5194/cp-6-745-2010, 2010, 745-758.

Ménot G., Bard E., « Geochemical evidence for a large methane release during the last deglaciation from Marmara Sea sediments », *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 74, 2010, 1537-1550.

Rincon-Martinez D., Lamy F., Contreras S., Leduc G., Bard E., Saukel C., Blanz T., Mackensen A., Tiedemann R., « Wetter interglacials in Ecuador during the past 500 kyr and its relation to latitudinal shifts of the Equatorial Front in the eastern tropical Pacific », *Paleoceanography*, 25, PA2210, 2010, DOI:10.1029/2009PA001868, 1-15.

Sépulcre S., Vidal L., Tachikawa K., Rostek F., Bard E., « Sea-surface salinity variations in the Northern Caribbean Sea across the mid-Pleistocene transition », *Climate of the Past Discussion*, 6, DOI:10.5194/cpd-6-1229-2010, 2010, 1229-1265.

Siddall M., Abe-Ouchi A., Andersen M., Antonioli F., Bamber J., Bard E., Clark J., Clark P., Deschamps P., Dutton A., Elliot M., Gallup C., Gomez N., Gregory J., Huybers P., Kawamura K., Kelly M., Lambeck K., Lowell T., Mitrovica J., Otto-Bliesner B., Richards D., Stanford J., Stirling C., Stocker T., Thomas A., Thompson B., Törnqvist T., Vazquez Riveiros N., Waelbroeck C., Yokoyama Y., « The sea-level conundrum: case studies from palaeo-archives », *J. Quaternary Science*, 25, 2010, 19-25.

Soulet G., Delaygue G., Vallet-Coulomb C., Böttcher M.E., Sonzogni C., Lericolais G., Bard E., « Glacial hydrologic conditions of the Black Sea reconstructed by means of geochemical pore water profiles », *Earth and Planetary Science Letters*, 296, DOI:10.1016/j.epsl.2010.04.045, 2010, 57-66.

Thevenon F., Williamson D., Bard E., Anselmetti F.S., Beaufort L., Cachier H., « Combining charcoal and elemental black carbon analysis in sedimentary archives: Implications for past fire regimes, the pyrogenic carbon cycle, and the human-climate interactions », *Global and Planetary Change*, 72, 2010, DOI:10.1016/j.gloplacha.2010.01.014, 381-389.

Vidal L., Ménot G., Joly C., Bruneton H., Rostek F., Cagatay N., Major C., Bard E., « Marmara Sea hydrology over the last 23.000 years: implications for the connection with the Black Sea and the sapropel deposition », *Paleoceanography*, 25, PA1205, 2010, DOI:10.1029/2009PA001735, 1-16.

Yiou P., Bard E., Dandin P., Legras B., Naveau P., Rust H.W., Terray L., Vrac M., « Statistical issues about solar-climate relations », *Climate of the Past*, 6, 2010, 565-573, DOI:10.5194/cp-6-565-2010.

2009

Asami R., Felis T., Deschamps P., Hanawa K., Iryu Y., Bard E., Durand N., Murayama M., « Evidence for tropical/subtropical South Pacific climate changes during the Younger Dryas and the Bølling-Allerød from geochemical records of fossil Tahiti corals », *Earth and Planetary Science Letters*, 288, 2009, 96-107.

Bard E., Rickaby R., « Migration of the Subtropical Front as a modulator of glacial climate », *Nature*, 406, 2009, 380-383 + 10 p. suppl.

Böning P., Bard E., « Millennial/centennial-scale thermocline ventilation changes in the Indian Ocean as reflected by aragonite preservation and geochemical variations in Arabian Sea sediments », *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 73, 2009, 6771-6788.

Cagatay N., Eris K., Ryan W.B.F., Sancar U., Polonia A., Akçer S., Biltekin D., Gasperini L., Görür N., Lericolais G., Bard E., « Late Pleistocene-Holocene evolution of the northern shelf of the Sea of Marmara », *Marine Geology*, 265, 2009, 87-100.

Dutton A., Bard E., Antonioli F., Esat T.M., Lambeck K., McCulloch M.T., « Phasing and amplitude of sea level and climate change during the penultimate interglacial », *Nature Geoscience*, 2, 2009, 355-359, + 18 p. suppl., DOI:10.1038/NNGEO470.

Kölling M., Webster J.M., Camoin G., Iryu Y., Bard E., Searc C., « SEALEX – Internal reef chronology and virtual drill logs from a spreadsheet-based reef growth model », *Global and Planetary Change*, 66, 2009, 149-159, DOI:10.1016/j.gloplacha.2008.07.011.

Leduc G., Vidal L., Cartapanis O., Bard E., « Modes of Eastern Equatorial Pacific thermocline variability: implications for ENSO dynamics over the last glacial period », *Paleoceanography*, 24, 2009, PA3204, DOI:10.1029/2008PA001701, 1-14.

Leduc G., Vidal L., Tachikawa K., Bard E., « ITCZ rather than ENSO signature for abrupt climatic changes across the tropical Pacific? », *Quaternary Research*, 72, 2009, 123-131.

Naughton F., Sanchez Goni M.-F., Kageyama M., Bard E., Duprat J., Cortijo E., Malaizé B., Joly C., Rostek F., Turon J.-L., « Wet to dry climatic trend in northwestern Iberia within Heinrich events », *Earth and Planetary Science Letters*, 284, 2009, 329-342.

Otto-Bliesner B., Schneider R., Brady E.C., Kucera M., Abe-Ouchi A., Bard E., Braconnot P., Crucifix M., Hewitt C., Kageyama M., Marti O., Paul A., Rosell-Mele A., Waelbroeck C., Weber S.L., Weinelt M., Yu Y., « A comparison of PMIP2 model simulations and the MARGO proxy reconstruction for tropical sea surface temperatures at last glacial maximum », *Climate Dynamics*, 32, 2009, 799-815, DOI:10.1007/s00382-008-0509-0.

Reimer P.J., Baillie M.G.L., Bard E., Bayliss A., Beck J.W., Blackwell P.G., Bronk Ramsey C., Buck C.E., Burr G.S., Edwards R.L., Friedrich M., Grootes P.M., Guilderson T.P., Hajdas I., Heaton T.J., Hogg A.G., Hughen K.A., Kaiser K.F., Kromer B., McCormac F.G., Manning S.W., Reimer R.W., Richards D.A., Southon J.R., Talamo S., Turney C.S.M., van der Plicht J., Weyhenmeyer C.E., « IntCal09 and Marine09 radiocarbon age calibration curves, 0-50.000 years cal BP », *Radiocarbon*, 51 (4), 2009, 1111-1150.

Saher M.H., Rostek F., Jung S.J.A., Bard E., Schneider R.R., Greaves M., Ganssen G.M., Elderfield H., Kroon D., « Western Arabian Sea SST in the penultimate and last interglacial: a comparison of Uk'37 and Mg/Ca palaeothermometry », *Paleoceanography*, 24, 2009, PA2212, DOI:10.1029/2007PA001557, 1-12.

Schouten S., Hopmans H., van der Meer J., Mets A., Bard E., Bianchi T., Diefendorf A., Escala M., Freeman K.H., Huguet C., Ingalls A., Ménot G., Nederbragt A.J., Oba M., Pearson A., Pearson E., Rosell-Melé A., Schaeffer P., Smittenberg R., Talbot H.M., Uchida M., van Moy B., Yamamoto M., Zhang Z., Sinninghe Damsté J.S., « An interlaboratory study of TEX86 and BIT analysis using high performance liquid chromatography/mass spectrometry », *Geochemistry Geophysics Geosystems (G-cubed)*, 10, 2009, 1-13, DOI:10.1029/2008GC002221.

Sépulcre S., Durand N., Bard E., « Mineralogical determination of reef and periplatform carbonates: calibration and implications for paleoceanography and radiochronology », *Global and Planetary Change*, 66, 2009, 1-9, DOI:10.1016/j.gloplacha.2008.07.008.

Sépulcre S., Tachikawa K., Vidal L., Thouveny N., Bard E., « Preservation state of metastable magnesian calcite in periplatform sediments from the Walton Basin over the last million years », *Geochemistry Geophysics Geosystems (G-cubed)*, 10, 2009, DOI:10.1029/2009GC002779, 1-15.

Tachikawa K., Vidal C., Sonzogni C., Bard E., « Glacial/interglacial sea surface temperature changes in the Southwest Pacific ocean over the past 360 Kyears », *Quaternary Science Reviews*, 28, 2009, 1160-1170.

Thomas A.L., Henderson G.M., Deschamps P., Yokoyama Y., Mason A.J., Bard E., Hamelin B., Durand N., Camoin G., « Sea-level timing across the penultimate deglaciation: U/Th dating of corals from Tahiti », *Science*, 324, 2009, 1186-1189, + 11 p. suppl.

Usoskin I.G., Horiuchi K., Solanki S., Kovaltsov G.A., Bard E., « On the common solar signal in different cosmogenic isotope data sets », *Journal of Geophysical Research*, 114, 2009, 1-14, DOI:10.1029/2008JA013888.

Waelbroeck C., Paul A., Kucera M., Rosell-Melé A., Weinelt M., Schneider R., Mix A.C., Abelmann A., Armand L., Bard E., Barker S., Barrows T.T., Benway H., Cacho I., Chen M.-T., Cortijo E., Crosta X., de Vernal A., Dokken T., Duprat J., Elderfield H., Eynaud F., Gersonde R., Hayes A., Henry M., Hillaire-Marcel C., Huang C.-C., Jansen E., Juggins S., Kallel N., Kiefer T., Kienast M., Labeyrie L., Leclaire H., Londeix L., Mangin S., Matthiessen J., Marret F., Meland M., Morey A.E., Mulitza S., Pflaumann U., Piasias N.G., Radi T., Rochon A., Rohling E.J., Saffi L., Schäfer-Neth C., Solignac S., Spero H., Tachikawa K., Turon J.L., « Constraints on the magnitude and patterns of ocean cooling at the Last Glacial Maximum », *Nature Geoscience*, 2, 2009, 127-132, DOI:10.1038/NGEO411.

Textes divers (vulgarisation, livres & chapitres, préface)

Gaudin C., Bard E. (sous la direction de), *Clôture de la 4^e année polaire internationale. Rapport de l'OPECST*, Presses du Sénat et de l'Assemblée Nationale, 2009, 219 pp.

Abel O., Bard E., Berger A., Besnier J.M., Guesnerie R., Serres M., *Éthique et changement climatique*, Éditions Le Pommier, 2009, 204 pp.

Bard E., « J'ai le devoir de prendre part au débat sur le climat », *La Recherche*, 439, 2010, 68-69.

Bard E., Préface du livre *Sur les origines de l'effet de serre et du changement climatique*, Éditions La Ville Brûle, 2010, 7-16.

Leduc G., Vidal L., Cartapanis C., Bard E., « Modes of eastern equatorial Pacific thermocline variability : implications for ENSO variability over the last glacial period », *PAGES News*, 18 (1), 2010, 34-36.

Bard E., « L'océan atténue le réchauffement », *Les Dossiers de La Recherche*, 36, 2009, 71-73.

Bard E., « Changement climatique : certitudes, incertitudes et idées fausses », in *Éthique et changement climatique*, Éditions Le Pommier, 2009, 59-79.

Bard E., « Climat, glaces et océans : quelles évolutions à court et long termes », *Clôture de la 4^e année polaire internationale, Rapport de l'OPECST*, Presses du Sénat et de l'Assemblée Nationale, 2009, 113-117.

RESPONSABILITÉS DIVERSES

Directeur-adjoint du Centre européen de recherche et d'enseignement en géosciences de l'environnement (CEREGE UMR 6635).

Membre nommé du conseil de l'Agence d'évaluation de la recherche et de l'enseignement supérieur (AERES).

Membre de la commission du Grand Emprunt national présidée par MM. A. Juppé et M. Rocard.

Membre du comité de sélection du directeur de l'INSU.

Membre du conseil scientifique de l'OPECST (Sénat & Assemblée nationale).

Membre du comité de pilotage du projet international PALSEA sur l'évolution du niveau marin et des calottes de glace (PAGES-IGBP working group).

DISTINCTIONS

2009, élu membre de l'*Academia Europaea*.

2010, élu membre de l'Académie des sciences.