

## **Évolution du climat et de l'océan**

M. Édouard BARD, professeur

### **Forçages climatiques d'origine géologique**

Le cours de cette année était consacré aux processus qui influencent le climat et dont les causes sont reliées à des phénomènes internes à la terre. Ces forçages géologiques ont des impacts climatiques très variés en ce qui concerne leurs amplitudes et leurs échelles spatiales. Par ailleurs, ces forçages interviennent sur des échelles de temps très différentes, de l'année au milliard d'années, et se superposent donc à d'autres causes de changement climatique.

J'ai abordé ce cours en considérant l'impact des changements paléogéographiques causés par la géodynamique globale. Sur des échelles de temps de plusieurs dizaines de millions d'années, la position et la géométrie des continents et des océans n'est pas stable, ce qui entraîne des variations climatiques de premier ordre. Une attention particulière a été portée aux périodes de regroupement des masses continentales sous la forme de supercontinents.

Les effets de la paléogéographie sur le cycle de l'eau ont été décrits : l'extension géographique des supercontinents (ex. la Pangée) peut induire un effet de continentalité marqué (désertification généralisée, contraste saisonnier de la température empêchant l'établissement de glaciers aux latitudes moyennes). L'effet de la paléolatitudes a été souligné, pouvant conduire, dans certaines conditions, à l'établissement de calottes glaciaires sur les continents.

J'ai ensuite considéré les changements orographiques qui font suite à la formation des chaînes de montagne. Celles-ci peuvent influencer notablement la dynamique des masses d'air et les précipitations. L'existence et l'intensité des moussons sont clairement modulées par la disposition des continents par rapport à l'océan (ex. Téthys) ainsi que par la topographie continentale (ex. Himalaya).

Les variations paléogéographiques peuvent aussi conduire à des variations importantes de la circulation océanique, en surface comme en profondeur. J'ai

donc insisté sur les conséquences de la fermeture ou de l'ouverture de certaines communications entre les différents bassins océaniques.

La disposition des continents peut aussi agir sur l'hydrologie des masses d'eaux superficielles avec une répercussion au niveau des échanges avec les couches intermédiaires et profondes de l'océan. Dans des conditions extrêmes, certaines zones de l'océan subtropical pourraient devenir suffisamment salées pour plonger dans les abysses à cause de leur densité élevée. Un courant d'eau profonde relativement chaude s'établirait depuis les tropiques jusqu'aux pôles, favorisant la répartition de la chaleur entre les basses et les hautes latitudes.

J'ai ensuite étudié l'effet de la géodynamique globale, plus particulièrement de l'expansion de la lithosphère océanique, sur le niveau marin mondial. L'effet de la profondeur des plaques océaniques a été distingué de l'impact des événements de collision continentale (ex. Inde-Eurasie). La grande difficulté est en fait de reconstituer dans le temps le taux d'accrétion de la croûte océanique qui disparaît régulièrement dans les zones de subduction.

L'effet du volcanisme global a été abordé en considérant l'effet majeur, mais encore hypothétique, des super-panaches (superplumes). Des données géophysiques et géologiques actuelles seraient compatibles avec l'existence de tels phénomènes.

À long terme, les volcans permettent aussi la recharge du stock atmosphérique de gaz carbonique. Le dégazage volcanique est intimement lié et corrélé avec la géodynamique globale, avec des flux importants au niveau des rides médio-océaniques, du volcanisme intra-plaque, et au niveau des zones de subduction. Le flux actuel de gaz carbonique est encore difficile à estimer, mais, à lui seul, il doublerait la teneur atmosphérique en une dizaine de milliers d'années.

À long terme, cette concentration dépend aussi de l'altération chimique des roches sur les continents par l'acide carbonique, et du piégeage du carbone sous forme de sédiments calcaires ou de matières organiques sédimentaires comme le charbon ou le pétrole. Ces sédiments sont finalement réincorporés dans le cycle du carbone par dissolution dans les fonds océaniques, ou par décomposition lorsqu'ils plongent dans le manteau terrestre au niveau des zones de subduction.

J'ai ensuite étudié plus en détail la décomposition des silicates, en considérant la complexité liée à la minéralogie (effets cinétiques et hydrolyses incomplètes conduisant aux minéraux argileux) ainsi que les paramètres contrôlant la vitesse des réactions chimiques de l'altération des roches (taux de dénudation, précipitations, température, activité biologique des sols).

L'importance de la fragmentation des roches et du transport par les fleuves a été soulignée, ce qui m'a conduit à faire le point sur la controverse au sujet du mécanisme régulant l'effet de serre à long terme. Un équilibre assez fin doit en effet exister entre la source de gaz carbonique d'origine volcanique et le puits de l'altération chimique des silicates.

Pour les uns, la rétroaction négative est d'ordre climatique : une élévation du flux de gaz carbonique d'origine volcanique augmente la température et les précipitations, ce qui favorise la cinétique des réactions d'altération. De plus, en augmentant les précipitations et en fertilisant les plantes, le gaz carbonique atmosphérique aurait un effet globalement positif sur la végétation et les sols, ce qui accroît encore l'altération des roches silicatées.

Pour d'autres chercheurs, la rétroaction négative serait d'ordre géodynamique : une activité tectonique intense serait accompagnée par une élévation du gaz carbonique atmosphérique et conduirait à la création de chaînes de montagnes (collision et subduction). Ces reliefs tendraient à augmenter l'altération chimique, empêcheraient une limitation par le transport et permettraient aux effets cinétiques de fonctionner pleinement.

La rétroaction climatique semble clairement la plus probable car il n'existe pas de lien précis et rapide entre l'expansion océanique globale et la formation de chaînes de montagnes. Une compensation exacte serait donc fortuite. Par ailleurs, les zones d'altération limitée par le transport ont une importance faible sur le bilan global de l'altération chimique des silicates. L'essentiel du flux provient des zones présentant un contrôle cinétique (donc « climatique » au sens large). Enfin, les phases de collision et de fermeture d'océan conduisent aussi à l'accrétion de supercontinents dont l'aridité intérieure diminue l'érosion chimique (effet inverse de celui du relief).

La suite du cours a été consacrée aux rôles des compartiments géologiques du cycle du carbone, en séparant les composantes minérale et organique : d'une part, la précipitation des carbonates liée à l'altération des silicates et, d'autre part, l'enfouissement de la matière organique sédimentaire d'origine photosynthétique. Des calculs de bilan à l'équilibre ont été décrits en illustrant l'influence des différents facteurs et de leurs paramétrisations (érosion chimique, relief, sols, paléogéographie...) L'utilité du rapport isotopique  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  a été souligné, car il permet de placer quelques contraintes quantitatives sur les flux et les stocks de carbone, en particulier celui de l'atmosphère.

J'ai aussi décrit les principes des différentes méthodes utilisées pour reconstituer les pressions partielles en gaz carbonique atmosphérique. Grâce à l'analyse des bulles d'air des carottes de glace de l'Antarctique, une mesure directe est possible jusqu'à environ un million d'années avant le présent. Des archives similaires ont été recherchées pour les échelles de temps géologiques, mais les résultats se sont révélés décevants. Des méthodes indirectes ont donc été développées par les paléobotanistes (ex. abondance des stomates foliaires) et les géochimistes isotopistes (isotopes stables du carbone dans les sols et dans la matière organique phytoplanctonique, isotopes du bore dans les carbonates marins). J'ai ensuite comparé les avantages et inconvénients de ces différentes techniques.

Le dernier volet du cours concernait l'influence sur le climat des éruptions volcaniques. La transformation des gaz soufrés conduit à la formation d'aérosols

qui agissent de façon multiple et complexe sur le bilan radiatif de la terre. L'impact climatique dépend donc de ces flux gazeux, mais aussi de la localisation du volcan (en latitude notamment), de la force de l'éruption (injection ou non dans la stratosphère), du transport et du temps de résidence des aérosols dans l'atmosphère.

L'effet climatique principal dû aux aérosols sulfatés est un refroidissement troposphérique (par exemple, moins de 1 °C sur quelques années pour l'éruption récente du mont Pinatubo). Par ailleurs, le réchauffement stratosphérique peut conduire à des effets dynamiques ayant un impact sur la troposphère (par exemple sur l'Oscillation Arctique). Le refroidissement agit aussi sur le cycle de l'eau conduisant à une réduction des précipitations tropicales.

Contrairement aux autres forçages géologiques décrits dans le cours, l'influence d'une éruption majeure ne dure au maximum que quelques années. Ceci est bien illustré par les données disponibles pour les éruptions historiques et géologiquement récentes. Le problème de l'impact climatique à long terme revient donc à étudier la variabilité temporelle de la fréquence des grandes éruptions. La difficulté du problème a été soulignée en décrivant les différentes techniques utilisées pour construire des séries temporelles d'index volcanologiques.

### **Les séminaires de l'année 2005-2006**

En complémentarité avec les neuf cours, quatorze séminaires ont été organisés :

- dans le cadre du colloque intitulé « La variabilité climatique millénaire en période chaude : cause externe ou oscillation interne ? », organisé le 9 septembre 2005 à Montréal en collaboration avec l'Université du Québec à Montréal (UQAM) :
  - Anne de Vernal (UQAM) « Variabilité millénaire des conditions de surface océanique aux hautes latitudes au cours des derniers interglaciaires » ;
  - Jean-Claude Mareschal (UQAM) « Enregistrement des changements climatiques récents dans les profils thermiques du bouclier canadien » ;
  - Guillaume St-Onge (Université du Québec à Rimouski) « La variabilité de haute fréquence du champ magnétique terrestre et son incidence sur les enregistrements paléoclimatiques » ;
- dans le cadre du colloque intitulé « Changements biologiques et climatiques en zones polaires » organisé le 12 mai 2006 à Paris en collaboration avec l'Institut Paul Émile Victor :
  - Édouard Bard « Une perspective paléoclimatique de l'impact sur la biosphère polaire » ;
  - Gregory Beaugrand (Station Marine de Wimereux, Université des Sciences et Technologies de Lille) « Impact des changements climatiques dans l'océan Atlantique Nord » ;

- Nigel Gilles Yoccoz (Université de Tromsø, Institut de Recherche sur l'Environnement, Norvège) « Écosystèmes terrestres arctiques et impact du climat : comment prédire et identifier les changements à venir ? » ;
  - Paul Tréguer (Institut Universitaire Européen de la Mer, Brest) « L'Océan Austral est-il un puits ou une source de CO<sub>2</sub> pour l'atmosphère ? L'homme peut-il le manipuler pour réduire l'augmentation du CO<sub>2</sub> atmosphérique ? » ;
  - Philippe Koubbi (Laboratoire d'Ichtyo-Écologie Marine, Université du Littoral Côte d'Opale, Boulogne-sur-mer) « Écologie et évolution des poissons antarctiques : adaptations et habitats des Notothenioidei dans un environnement marin » ;
  - Henri Weimerskirch (Centre d'Études Biologiques de Chizé, CNRS UPR 1934, Villiers-en-Bois) « Les oiseaux et mammifères marins indicateurs des changements climatiques dans l'Océan Austral » ;
  - Yves Frenot (Institut Paul-Émile Victor, Brest) : « Les invasions biologiques en Antarctique : origines et conséquences sur les écosystèmes terrestres » ;
- dans le cadre du colloque intitulé : « Workshop on climate : Studying past climates to see the future » organisé le 31 mai 2006 au CSIC de Madrid en collaboration avec la Fondation Marcelino Botin :
- Antoni Rosell-Melé (Universitat Autònoma de Barcelona) « Proxies as tools to reconstruct past climates on land and oceans » ;
  - Marisa Montoya (Universidad Complutense de Madrid) « Using Earth system models of intermediate complexity to simulate past and future climate » ;
  - Jesus Fidel González Rouco (Universidad Complutense de Madrid) « Climate variability and changes through the last millennium : model simulations and proxy reconstructions » ;
  - Manuel de Castro (Universidad de Castilla-La Mancha) « Future climate scenarios for the Iberian Peninsula ».

### Activités de recherches

La fin de l'année 2005 a été marquée par l'installation du laboratoire dans les nouveaux locaux du bâtiment Trocadéro de l'Europôle de l'Arbois à Aix-en-Provence. L'antenne « Sciences de la terre, de l'océan et de l'environnement » regroupant les chaires de Géodynamique (X. Le Pichon) et de l'Évolution du climat et de l'océan (É. Bard) a été inaugurée le 16 septembre en présence de MM. Jacques Glowinski, administrateur du Collège de France, Alexandre Medvedowsky, président de l'Europôle méditerranéen de l'Arbois, Jean-Noël Guérini, sénateur, président du Conseil général des Bouches-du-Rhône, Michel Vauzelle, président du Conseil régional PACA, Christian Frémont, préfet de la région PACA et des Bouches-du-Rhône, Stéphane Salord, adjoint au député-maire d'Aix-en-Provence et vice-président de la Communauté du pays d'Aix, représentant Mme Maryse Joissains député-maire d'Aix-en-Provence, président

de la Communauté du pays d'Aix, ainsi que M. Philippe Tchamitchian, président de l'Université Paul Cézanne (Aix-Marseille III).

Cette année, l'équipe de la chaire d'Évolution du climat et de l'océan a poursuivi son étude de la variabilité du minimum en oxygène en mer d'Arabie. L'intensité du déficit en oxygène est modulée par l'amplitude des moussons d'été et d'hiver, ainsi que par l'advection des masses d'eaux aux profondeurs intermédiaires. Nous utilisons une approche multi-marqueurs, géochimiques et micropaléontologiques, focalisée sur les carottes de sédiments prélevées en 2004 au large du Pakistan. Nous avons ainsi déterminé les teneurs en éléments majeurs (Fe, Ca, Ti, K, Al...) et en éléments traces (Ba, Cd, Mo, Sr, V...) dans deux carottes : MD042876 (dans le minimum) et MD042873 (en dessous du minimum). Les teneurs en Ca (indicateur de carbonate), Fe et Ti (flux terrigène) et carbone organique dans la carotte MD042876 covarient fidèlement avec les phénomènes climatiques de l'hémisphère nord comme les événements de Dansgaard-Oeschger et de Heinrich. D'autres résultats montrent que le rapport Sr/Ca est corrélé avec la teneur en aragonite. Un rapport Sr/Ca élevé marque une meilleure préservation de l'aragonite liée à un approfondissement de la zone de sous-saturation pour ce minéral. Des éléments sensibles aux conditions redox, comme Cd, Mo et V, covarient avec la teneur en matière organique dans les deux carottes, indiquant les périodes d'augmentation de la productivité biologique et/ou de la préservation.

Nous étudions certaines transitions à très haute résolution afin de séparer les causes climatiques (par ex. les moussons) des causes océanographiques (par ex. l'advection des masses d'eaux intermédiaires). Dans ce but, nous avons utilisé et calibré une technique de microscopie XRF ayant une résolution de 100 microns. Ceci correspond à une résolution temporelle de quelques années pour nos sédiments de la zone de minimum en oxygène. Dans une prochaine étape, ces résultats pourront être comparés aux autres indicateurs paléocéanographiques étudiés par l'équipe (assemblages de foraminifères, isotopes stables de l'azote, du carbone et de l'oxygène, biomarqueurs etc.).

Un autre domaine abordé cette année est l'étude des variations du niveau marin associées à la dernière déglaciation. Cette chronologie du niveau marin est d'un intérêt majeur pour comprendre la dynamique des calottes glaciaires, leurs effets sur l'isostasie et la relation complexe qui existe entre les apports d'eau douce à l'océan, la circulation océanique profonde et par conséquent le climat de la terre. L'expédition IODP 310 réalisée au large de l'île de Tahiti en octobre et novembre 2005 nous a permis d'obtenir un enregistrement stratigraphique complet de la séquence postglaciaire de dépôt des carbonates, pour la période allant de 21 000 ans BP à l'actuel, dans une zone tectoniquement inactive et éloignée des régions polaires. Le premier objectif de notre travail est de fournir un cadre chronologique précis en datant les coraux fossiles à l'aide des méthodes U-Th et  $^{14}\text{C}$  par spectrométrie de masse. La nouvelle séquence stratigraphique échantillonnée au large de Tahiti devrait aussi nous permettre de mieux documenter les « MeltWater Pulses » (MWP) (remontées rapides du niveau marin). Ces

événements brefs ont pu perturber la circulation océanique profonde et par conséquent le climat global. Ces informations sont aussi cruciales pour tester les simulations du niveau marin basées sur des modèles géophysiques, en particulier pour identifier les calottes responsables des MWP.

## Publications de l'équipe

### 2006

BARD E., FRANK M. Climate change and solar variability : what's new under the Sun. *Earth and Planetary Science Letters* 248, 1-14 (2006).

BARD E., ROSTEK F., MÉNOT-COMBES G. Chronologie des variations climatiques rapides pendant la dernière période glaciaire. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences (C. R. Palevol)* 5, 13-19 (2006).

REIMER P.J., BAILLI M.G.L., BARD E., BECK J.W., BLACKWELL P.G., BUCK C.E., BURR G.S., EDWARDS R.L., FRIEDRICH M., GUILDERTSON T.P., HOGG A.G., HUGHEN K.A., KROMER B., MCCORMAC G., MANNING S., REIMER R.W., SOUTHON J.R., STUIVER M., VAN DER PLICHT J., WEYHENMEYER C.E. Comment on « Radiocarbon Calibration Curve Spanning 0 to 50,000 Years B.P. Based on Paired  $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$  and  $^{14}\text{C}$  Dates on Pristine Corals » by R.G. Fairbanks *et al.* and « Extending The Radiocarbon Calibration Beyond 26,000 Years Before Present Using Fossil Corals » by T.-C. Chiu *et al.* *Quaternary Science Reviews* 25, 855-862 (2006).

CONTE M.H., SICRE M.-A., RÜHLEMANN C., WEBER J.C., SCHULTE S. SCHULZ-BULL D. & BLANZ T. Global calibration of the alkenone unsaturation index (UK'37) with surface water production temperature and a comparison of the coretop integrated production temperatures recorded by UK'37 with overlying sea surface temperatures. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems* 7 (2), 1-22 (2006).

MENOT G., BARD E., ROSTEK F., WEIJERS J.W.H., HOPMANS E.C., SCHOUTEN S., SINNINGHE DAMSTÉ J.S. Early reactivation of European rivers during the last deglaciation. *Science* 313, 1623-1625 (2006).

SIDDALL M., BARD E., ROHLING E.J., HEMLEBEN C. Sea-level change during T II. *Geology* 34 (10), 817-820.

### 2005

BARKER S., CACHO I., BENWAY H., TACHIKAWA K. Planktonic foraminiferal Mg/Ca as a proxy for past oceanic temperatures : a methodological overview and data compilation for the Last Glacial Maximum, *Quaternary Science Reviews* 24, 821-834 (2005).

BARD E. More notes on global warming. *Physics Today* 58, 16-17 (2005).

BÖNING P., CUYPERS S., GRUNWALD M., SCHNETGER B., BRUMSACK H.-J. Geochemical signatures of Chilean upwelling sediments at 36°S. *Marine Geology* 220, 1-21 (2005).

BORCHERS S.L., SCHNETGER B., BÖNING P., BRUMSACK H.-J. Geochemical signatures of the Namibian diatom belt : Perennial upwelling and intermittent anoxia. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems* 6, (6), 1-20 (2005).

DUPONT L., DONNER B., VIDAL L., PEREZ E., WEFER G. Linking desert evolution and coastal upwelling : Pliocene climate change in Namibia, *Geology* 33, 461-464 (2005).

LICARI L., MACKENSEN A. Benthic foraminifera off West Africa (1°N to 32°S) : Do live assemblages from the topmost sediment reliably record environmental variability ? *Marine Micropaleontology* 55, 205-233 (2005).

SILENZI S., BARD E., MONTAGNA P., ANTONIOLI F. Isotopic and elemental records in a non-tropical coral (*Cladocora caespitosa*) : Discovery of a new high-resolution climate archive for the Mediterranean Sea. *Global and Planetary Change* 49, 94-120 (2005).

### Livres

BARD E. L'Homme et le climat, une liaison dangereuse. Découvertes Gallimard n° 482, 128 p. (2005).

BARD E. (sous la dir.). L'Homme face au climat. Collège de France, Odile Jacob, 448 p. (2006).

### Textes de vulgarisation

BARD E. La variabilité climatique extrême des périodes glaciaires. *La Science au Présent, Encyclopaedia Universalis* 105-108 (2006).

BARD E. Variations climatiques naturelles et anthropiques. *BRGM Géosciences* 3, 30-35 (2006).

L'archéologue du climat. *Le Journal du CNRS*, n° 193, p. 31, février 2006.

L'Europe du Nord se réchauffera moins qu'elle ne le devrait. *La Recherche* 399, 62 (2006).

### Conférences dans le cadre de colloques internationaux

Montréal, 10 septembre 2005, annual meeting of the Earth System Evolution Program of the Canadian Institute for Advanced Research (CIAR) :

— BARD E. « States of the climate system : Quantum modes or a continuum ? ».

New-York, 19 octobre 2005, Symposium à la mémoire de Gérard Bond, Lamont-Doherty Earth Observatory of Columbia University :

— BARD E. « North Atlantic abrupt climatic changes and their correlatives in low latitude oceans ».

New-York, 20-22 octobre 2005, Symposium de la Fondation Gary Comer, Palisades IBM Center :

— BARD E. « Abrupt climatic changes and the hydrological cycle as recorded in marine sediments from the eastern North Atlantic Ocean, the Marmara Sea and the Arabian Sea ».

Berne, 20 janvier 2006, Institut de Physique de l'Université de Berne, colloque « The application of timing and synchronisation techniques in understanding the climate system » :

— BARD E.: « North Atlantic abrupt climatic changes and their correlatives in low latitude oceans ».

Vienne, 2-7 avril 2006, European Geosciences Union annual meeting :

— LEDUC G., VIDAL L., TACHIKAWA K., ROSTEK F., SONZOGNI C., BARD E. « A 90 ka reconstruction of the surface hydrology in the Panama Basin : implications for abrupt climate changes during the last glacial period ».

— NAUGHTON F., SANCHEZ GOÑI M.F., TURON J.-L., DUPRAT J., CORTIJO E., MALAIZÉ B., JOLI C., BARD E., ROSTEK F. « Climate variability of the last 25.000 years in and off north western Iberia : a direct land-sea-ice correlation of two Galician margin deep-sea cores ».

— PICHEVIN L.E., BARD E., MARTINEZ P., IVANOCHKO T.S. « Significance of Winter Monsoon and ventilation changes in the Arabian Sea during the Late Quaternary : Implication for denitrification and nitrous oxide emission ».

— RICKABY R., HALLORAN P., KILBURN M., GROVENOR C., TAYLOR A., BARD E., BARKER S., BEAUFORT L. « Probing the trace metal proxies of biominerals ».

— SIDDALL M., BARD E., ROHLING E.J., HEMLEBEN C. « Red Sea evidence for an early high stand during termination II ».

— TACHIKAWA K., VIDAL L., SONZOGNI C., BARD E. « Hydrological variability in the Southwest Pacific during the past 360 kyears ».

### **Responsabilités diverses**

Éditeur de la revue *Quaternary Science Reviews* (Elsevier).

Président du Conseil Scientifique de l'Institut Polaire Français Paul-Emile Victor (IPEV).

Président du comité d'audit du laboratoire LMC14 (accélérateur ARTEMIS de Saclay).

### **Distinctions**

2005, Médaille Huntsman pour les géosciences marines, présentée par la *Royal Society of Canada*, la *Dalhousie University* et le *Bedford Institute of Oceanography*.

2005, Prix Georges Lemaître, Fondation de l'Université de Louvain, Belgique.