

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

M. Édouard BARD, professeur

### **Impact de la variabilité climatique rapide sur les continents**

#### **Aspects historiques**

C'est essentiellement aux naturalistes et aux physico-chimistes du XIX<sup>e</sup> siècle que nous devons les premières recherches scientifiques sur les glaciations et l'effet de serre. Ces deux aspects du climat peuvent être étudiés séparément, mais ces savants se sont souvent intéressés conjointement à ces deux sujets ainsi qu'à leurs possibles relations. Au cours du XIX<sup>e</sup> siècle, la démarche scientifique évolue depuis des savants au savoir encyclopédique comme Horace-Bénédict de Saussure, inventeur et explorateur, jusqu'à des chercheurs spécialisés comme Svante Arrhenius, dont la théorie sur la dissociation des électrolytes en solution aqueuse exercera un rôle déterminant sur le développement de la chimie-physique. La curiosité insatiable de ces pionniers s'accompagne de compétences multiples dans des disciplines aussi variées que la physique, la géologie, la chimie, la biologie ou l'astronomie. Ainsi John Tyndall contribuera de façon significative non seulement aux avancées en thermodynamique mais également à l'étude des glaciers. De même, Louis Agassiz s'illustrera dans les domaines de la paléontologie et de la glaciologie.

Ces savants ne disposent ni de techniques de mesures précises, ni d'informations à grande échelle en météorologie, océanographie et géologie. Mais comme le souligne Joseph Fourier dès 1822, la théorie seule ne peut suffire dans ces domaines, car « l'analyse mathématique ... peut déduire des phénomènes généraux et simples l'expression des lois de la nature ; mais l'application de ces lois à des effets très composés exige une longue suite d'observations exactes ». Ainsi, la compréhension des glaciations de l'ère quaternaire est, à cette époque, à peu près équivalente à celle que nous avons aujourd'hui des fluctuations climatiques du Précambrien. Cependant, les pionniers du XIX<sup>e</sup> siècle auront souvent des intuitions prophétiques et prémonitoires, bien que les observations à leur disposition soient encore très fragmentaires.

Néanmoins, au cours de la première moitié du XX<sup>e</sup> siècle, la connaissance des climats anciens progressera peu. Les principaux concepts fondamentaux que nous utilisons aujourd'hui ont été développés au cours du XIX<sup>e</sup> siècle. Il faudra ainsi attendre les années 1950 pour assister à une véritable révolution des techniques d'investigation permettant enfin d'obtenir des données paléoclimatiques chiffrées et surtout des datations fiables. Ces nouveaux outils, le plus souvent fondés sur des techniques physico-chimiques, permettront de reconstituer l'ampleur et la chronologie des changements climatiques et de les comparer aux prévisions théoriques.

Un autre progrès crucial interviendra aussi dans la deuxième moitié du XX<sup>e</sup>, avec l'étude de tous les compartiments du système climatique, en particulier le fond des océans et l'intérieur des calottes du Groenland et de l'Antarctique. Ces observations n'étaient pas accessibles aux pionniers héroïques dont les contributions ont été décrites dans le cadre du cours.

### **Les phénomènes de seuil du système climatique**

Que sait-on de la stabilité du climat ? Le système est complexe : l'atmosphère, les océans, les calottes de glace, ont chacun un rôle et une dynamique spécifique et réagissent à des vitesses différentes. Ces différents compartiments agissent entre eux de façon non linéaire, mais ils sont aussi connectés à d'autres systèmes complexes, comme le cycle du carbone. Et l'ensemble peut être perturbé par différentes causes externes, comme un changement d'insolation, qui elles aussi agissent à différentes échelles spatiales et temporelles. La variabilité naturelle du climat est donc forte, mais reste mal connue. Il est ainsi difficile de déterminer un état d'équilibre et de discerner une tendance à long terme, d'une fluctuation transitoire. Depuis 20 ans, modélisateurs, paléoclimatologues et océanographes explorent parallèlement les oscillations climatiques les plus rapides, les phénomènes de seuil qui déclenchent les transitions les plus brutales, ceci afin de déceler les conditions d'un véritable changement de climat.

Dans le régime climatique actuel, c'est dans le Nord de l'océan Atlantique que se forment les eaux qui vont plonger dans les abysses, ventiler et oxygéner les couches profondes de l'océan mondial. Cette masse d'eau profonde fait partie d'une gigantesque boucle, appelée circulation thermohaline mondiale et souvent présentée comme un immense « tapis roulant ». Cette simplification, exagérée, est néanmoins utile pour se représenter les échanges d'eaux entre les différents bassins océaniques. Dans cette boucle, les eaux de surface, chaudes et salées, des régions tropicales de l'océan Atlantique remontent vers le Nord. Arrivées dans les Mers de Norvège, du Groenland et du Labrador, ces eaux devenues froides sont si denses qu'elles plongent dans les abysses. Cette densité contrôle le régime de circulation générale. L'apport en eau douce (pluies, rivières et glace) dans cette région, qui joue sur ce paramètre, est donc crucial : il peut faire basculer le système climatique, en particulier les températures dans et autour de

l'Atlantique Nord, d'un mode à un autre selon un cycle d'hystérésis. Dans ce schéma, la branche supérieure, sur laquelle se situe le climat actuel, correspond à un régime de circulation profonde forte. Une légère augmentation du flux d'eau douce par rapport à sa valeur actuelle ( $F$ ), entraîne une légère diminution de la convection profonde et un refroidissement modéré en Atlantique Nord. Mais si le flux d'eau douce atteint un seuil critique ( $F + \Delta F$ ) le système peut basculer vers un autre régime, tout aussi stable, qui se traduit par une quasi-absence de circulation profonde et un refroidissement d'environ  $5\text{ }^{\circ}\text{C}$  en Atlantique Nord et sur les continents voisins. La transition entre les deux est très rapide, quelques décennies suffisent. Pour revenir au mode chaud d'origine, le flux d'eau douce doit diminuer jusqu'à une autre valeur de seuil critique ( $F - \Delta F'$ ) très inférieure à la première. Cette description est encore très schématique et la position exacte du climat actuel par rapport aux points de bifurcation est pratiquement inconnue. La forme exacte, en particulier la largeur,  $\Delta F + \Delta F'$ , du cycle d'hystérésis dépend de conditions externes au couple océan-atmosphère, comme l'insolation, les calottes de glace ou les teneurs en gaz à effet de serre.

Pour déterminer si les refroidissements intenses avaient aussi affecté le continent européen tout proche, des chercheurs ont compté les pollens de plantes terrestres présents dans des sédiments marins analysés en parallèle pour les isotopes du carbone et les alkenones. Le résultat principal de ces études est une évolution temporelle du rapport d'abondance entre les pollens de plantes typiques des climats tempérés et humides (principalement des arbres caducs comme les chênes) et les pollens typiques de steppes froides et sèches (comme l'armoise). Ce rapport de pollens donne une information qualitative sur le climat européen, oscillant entre des valeurs élevées pendant les périodes tempérées et des valeurs très faibles pendant les événements froids d'intense fonte d'icebergs (événements de Heinrich).

Il faut souligner que le mécanisme décrit ci-dessus ne constitue pas la seule cause de variabilité climatique rapide, et que d'autres types de comportements non linéaires existent dans le système climatique. Un autre exemple de rétroaction positive et d'amplification est associé au bilan hydrique des régions continentales aux basses latitudes. Dans les climats humides, les précipitations sont captées par les racines, absorbées par les plantes, pour être ensuite réinjectées vers l'atmosphère. On observe donc une augmentation significative des précipitations. Au contraire, pour les climats secs, les précipitations alimentent directement les nappes phréatiques, les rivières et les océans, réduisant encore ces faibles précipitations.

### **Modélisations des transitions à l'échelle du millénaire**

Prises dans leur ensemble, les observations continentales et océaniques semblent cohérentes avec la théorie des bifurcations du système océan-atmosphère résumée par la boucle d'hystérésis. La correspondance précise entre les enregis-

trements de la température et de la circulation océanique profonde constitue probablement la meilleure « empreinte digitale » du phénomène. Ceci prouve que les deux compartiments, océan et atmosphère, étaient intimement liés lors de ces variations rapides. Pendant les 100 000 dernières années, les excédents d'eau douce en Atlantique Nord étaient clairement dus aux afflux massifs d'eau de fonte des icebergs lors des événements de Heinrich.

Plusieurs modélisateurs ont essayé de simuler la variabilité climatique rapide pendant le dernier cycle glaciaire, en particulier l'alternance entre les phases chaudes de Dansgaard-Oeschger et les événements froids de Heinrich. Les modèles couplant l'atmosphère, l'océan et les calottes de glace sont encore incapables de simuler correctement cette variabilité à toutes les échelles de temps et d'espace. À ce jour, tous les essais ont été réalisés avec des modèles simplifiés utilisant quelques facteurs de forçage imposés. Par exemple, Syukuro Manabe et Ronald Stouffer à Princeton ont imposé des apports massifs d'eau de fonte à un modèle de circulation générale représentant le couple atmosphère-océan. Andrew Weaver à l'université Victoria a perturbé un modèle de complexité intermédiaire incluant l'atmosphère, l'océan et la glace de mer avec des flux d'eau douce issus d'un modèle de calotte de glace continentale développé par Garry Clarke à Vancouver.

Un des résultats les plus impressionnants a été obtenu par Andrew Ganopolski et Stefan Rahmstorf du centre de climatologie de Potsdam, qui ont perturbé un modèle simplifié océan-atmosphère avec un flux variable d'eau douce en Atlantique Nord. Ce système montre un comportement typique d'hystérésis se révélant à la suite d'une perturbation cyclique du flux d'eau douce d'amplitude relativement limitée. La circulation profonde de l'océan Atlantique répond de façon non linéaire, avec des changements extrêmement rapides et de grande ampleur. Ces fluctuations donnent naissance à des cycles de température de très grande amplitude pour les hautes latitudes du Groenland et, dans une moindre mesure, pour les moyennes latitudes de l'océan Atlantique Nord et des continents bordant cet océan.

Une signature typique du phénomène est la forme asymétrique de ces événements chauds, en particulier au Groenland : les températures augmentent rapidement, atteignent brusquement un maximum et diminuent ensuite lentement pendant quelques siècles avant d'atteindre un nouveau seuil après lequel les températures replongent vers les mêmes valeurs froides qui prévalaient avant le réchauffement. Bien que chaque événement de Dansgaard-Oeschger ait sa propre durée, ils partagent tous la même forme asymétrique, reproduite assez fidèlement par le modèle numérique. Le réchauffement rapide résulte du transport vers le nord des eaux chaudes de l'Atlantique vers les mers nordiques (mers de Norvège et du Groenland) ; le « plateau » correspond au mode chaud de la circulation Atlantique qui s'affaiblit graduellement, et le refroidissement rapide marque la fin de la formation d'eau profonde au nord de l'Islande.

Une autre caractéristique des simulations numériques est la distribution spatiale des événements chauds. Le réchauffement maximal est centré sur le nord de l'Atlantique avec un impact qui s'affaiblit pour les autres régions du monde comme l'océan Pacifique, jusqu'à devenir pratiquement négligeable dans l'hémisphère sud. Ces simulations sont tout à fait compatibles avec les observations paléoclimatiques qui montrent des variations de température beaucoup plus faibles dans la zone intertropicale.

Il faut aussi noter que ces changements thermiques plus faibles se répercutent sur le cycle de l'eau. En effet, les spécialistes travaillant sur les paléoclimats tropicaux ont mis en évidence de grandes fluctuations d'humidité relative. La pression de vapeur saturante augmente exponentiellement avec la température, ce qui implique que dans les zones chaudes, de faibles changements de température se traduisent par de larges variations de la disponibilité en eau. Par ailleurs, celles-ci semblent être plus localisées à cause de phénomènes locaux de rétroaction. Néanmoins, les événements rapides ont clairement existé aux basses latitudes. Par exemple, les événements de Dansgaard-Oeschger ont été accompagnés de grands changements dans les précipitations tropicales des zones de moussons.

Pour tenter de comprendre la genèse d'un événement de Heinrich, le même modèle a été perturbé par un apport massif d'eau douce en Atlantique Nord. Un flux aussi important arrête pratiquement la circulation d'eau profonde atlantique, ce qui cause un refroidissement extrêmement prononcé aux moyennes latitudes de l'Atlantique Nord. Autrement dit, le refroidissement maximal pendant l'événement de Heinrich est situé à plus faible latitude que le réchauffement maximal de l'interstade de Dansgaard-Oeschger. Une autre caractéristique spécifique de la distribution de la température modélisée est que le refroidissement intense centré sur l'Atlantique Nord est accompagné d'un réchauffement faible mais généralisé à l'hémisphère sud. Cet effet de bascule climatique est la conséquence de la réduction du transport de chaleur inter-hémisphérique et de l'augmentation de la formation d'eau profonde et intermédiaire dans l'Océan Austral lorsque la formation de NADW est réduite. La preuve de cet effet de bascule est apportée par la comparaison des enregistrements obtenus grâce aux carottes de glace du Groenland et de l'Antarctique. En particulier, les oscillations de température les plus récentes au Groenland entre 16 000 et 11 000 ans BP sont pratiquement en antiphasse avec celles observées en Antarctique Central.

### **Une telle instabilité peut-elle se produire à nouveau ?**

Bien qu'aucun modèle n'ait, pour l'heure, reproduit les détails de la variabilité climatique d'une période glaciaire, la concordance générale entre les données et les simulations suggère fortement que les mécanismes envisagés sont plausibles. Un autre enseignement de la modélisation est que le système océan-atmosphère est particulièrement instable et sensible pendant la dernière glaciation. En comparaison, le climat actuel est caractérisé par des conditions différentes comme le

volume et la surface des calottes glaciaires, la répartition spatiale de l'insolation et les concentrations atmosphériques en gaz à effet de serre. En prenant en compte ces conditions aux limites, la boucle d'hystérésis devient beaucoup plus large que pendant les glaciations ( $\Delta F + \Delta F'$ ). En d'autres termes, le climat actuel est certainement moins susceptible de basculer vers des états extrêmes. Une preuve de la stabilité relative du climat moderne nous est donnée par les enregistrements des températures de l'Holocène. Pendant cette période, les températures du Groenland et de l'Atlantique Nord suivent une tendance continue au refroidissement, mais avec une faible amplitude. Les paléotempératures aux basses latitudes confirment la relative stabilité de la période Holocène, bien que les enregistrements obtenus à partir d'archives terrestres indiquent une variabilité plus importante du cycle de l'eau et des éléments qui lui sont associés (comme les niveaux lacustres et le couvert végétal).

En 1985, Wallace Broecker de l'Université de Columbia à New-York, avait averti que la circulation thermohaline pourrait bien être le « talon d'Achille » du climat. D'après lui, le réchauffement climatique pourrait déstabiliser la circulation océanique à la suite d'une modification majeure du cycle de l'eau, en particulier du flux d'eau douce à l'Océan Atlantique. Des modèles numériques performants ont permis à Thomas Stocker et Andreas Schmittner de l'Université de Berne de tester l'hypothèse de Broecker. Leurs simulations d'états transitoires ont permis de montrer que lorsque le taux de combustion des fuels fossiles dépasse un certain seuil critique, le climat actuel pouvait basculer dans un autre mode caractérisé par un refroidissement généralisé en Atlantique Nord. Ce refroidissement régional serait associé à une forte diminution de la circulation profonde en Atlantique, ce qui rappelle évidemment le cas des événements de Heinrich.

Au cours des quelques dernières années, des modèles de complexité croissante ont été utilisés pour étudier l'amplitude, la durée ainsi que les conditions d'initiation de ce que l'on appelle maintenant les « surprises climatiques ». La modélisation du couple océan-atmosphère n'en est encore qu'à ses débuts car la géométrie de la boucle d'hystérésis est loin d'être connue, et ceci même pour le système actuel. De plus, la position du climat actuel sur la branche supérieure de cette boucle n'est pas non plus déterminée. Pour l'ensemble de ces raisons, un débat animé se poursuit dans la communauté des modélisateurs au sujet de la possibilité d'une telle instabilité au cours d'une période globalement chaude.

Les études menées jusqu'à présent n'apportent malheureusement pas de réponse précise à la question sur l'imminence d'une telle bifurcation. Il apparaît cependant urgent de répondre à cette question car les enregistrements hydrographiques des dernières années montrent une baisse mesurable de la salinité des masses d'eaux en Atlantique Nord, ainsi qu'une modification du flux d'eau profonde dans certaines zones. Ces observations océanographiques suggèrent que la circulation des eaux atlantiques profondes s'est déjà un peu modifiée au cours des dernières décennies.

Certaines modélisations à haute résolution du couple océan-atmosphère suggèrent que la plongée en Mer du Labrador serait la composante la plus fragile aux variations du bilan hydrologique. Un autre aspect du problème est l'influence possible de la variabilité atmosphérique de « haute fréquence » sur une éventuelle bifurcation dans le futur (en particulier l'Oscillation Nord-Atlantique ou Oscillation Arctique). En effet, certains modèles récents montrent qu'une phase positive de la NAO pourrait en fait retarder la bifurcation d'une trentaine d'années via un refroidissement et une évaporation accrue des eaux de surface du Nord-Ouest de l'Atlantique Nord. Le problème supplémentaire est que cela fait aussi une trentaine d'année que la phase NAO est positive, certains y voyant même l'influence des gaz à effets de serre via une intensification du vortex polaire. Les prochaines années d'observation seront donc cruciales à ce sujet (e.g. l'index NAO semble baisser depuis 1995).

L'amélioration constante des modèles climatiques pourrait apporter des éléments de réponse. Ceci passe par une augmentation de la résolution spatiale et temporelle des calculs numériques, mais également par une prise en compte plus fine des processus physiques reliant les différentes composantes du système climatique. Les performances de cette nouvelle génération de modèles climatiques devraient être testées en premier lieu sur les changements océanographiques récents, mais également sur des séries temporelles paléoclimatiques plus longues. La difficulté supplémentaire vient du fait que les prévisions pour les prochains siècles dépendent aussi de projections à long terme sur les émissions des gaz à effet de serre.

### **Les séminaires de l'année 2003-2004**

Par ordre chronologique voici la liste des dix séminaires qui complétaient les cours en illustrant certains aspects :

28 novembre 2003 (Université Bordeaux I) : Maria Fernanda Sanchez Goni (EPHE, Département de Géologie et Océanographie, UMR-CNRS 5805 EPOC, Université Bordeaux I)

« Réponse de la végétation et du climat européen aux changements climatiques rapides »

28 novembre 2003 (Université Bordeaux I) : Dominique Genty (CNRS, Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement, LSCE UMR CEA/CNRS 1572, CEA Saclay)

« Intérêt des spéléothèmes pour la reconstitution des paléoclimats, en particulier pour la variabilité millénaire »

12 mars 2004 : Édouard Bard

« The concept of paleoclimate proxy : some examples in molecular geochemistry »

12 mars 2004 : Henry Elderfield (Université de Cambridge)  
« Proxies of ocean paleotemperature from the chemistry of biogenic calcium carbonate »

12 mars 2004 : Martin Frank (ETH Zürich)  
« Biological paleoproductivity proxies »

12 mars 2004 : Albert Galy (Université de Cambridge)  
« Calcium isotopes as an example of a new paleoceanographic proxy »

12 mars 2004 : Gareth Davis (Université d'Amsterdam)  
« Proxies for detrital input into the ocean : case study of the termination of the African Humid Period »

12 mars 2004 : Rosalind Rickaby (Université d'Oxford)  
« Focussing on trace metal proxies in the ocean »

12 mars 2004 : Gideon Henderson (Université d'Oxford)  
« Radioactive and radiogenic tracers of past and present ocean circulation »

8 juin 2004 (Université Aix-Marseille III) : Peter deMenocal (Lamont-Doherty Earth Observatory, Columbia University, New-York)  
« African climate variation and its impact on the faunal and human evolution »

### Activités de recherches

Au sein du CEREGE (UMR 6635 CNRS et Université Aix-Marseille III) implanté sur l'Europôle de l'Arbois à Aix-en-Provence, Édouard Bard dirige une équipe d'une dizaine de personnes. En 2002 l'Assemblée des Professeurs avait approuvé à l'unanimité la création d'une Antenne « Sciences de la Terre, de l'Océan et de l'Environnement » sur l'Europôle de l'Arbois à Aix-en-Provence. Cette Antenne est constituée des équipes de la Chaire d'Évolution du Climat et de l'Océan et de la Chaire de Géodynamique. Depuis, une solution pérenne a été trouvée avec l'ensemble des partenaires locaux (Conseil Régional Provence-Alpes-Côte d'Azur, Conseil Général des Bouches-du-Rhône, Communauté d'Agglomération des Pays d'Aix, Syndicat Mixte de l'Arbois) avec la mise à disposition d'un bâtiment d'une SHON de 600 m<sup>2</sup> dont la rénovation a débuté en mai 2004 et devrait être achevée au début de l'année 2005. Notre équipe a d'ailleurs été impliquée dans les différentes phases du projet : étude de faisabilité en mai 2003, étude descriptive relative à la phase APD en novembre 2003, étude descriptive relative à la phase DCE en décembre 2003. Pour permettre cette installation, plusieurs demandes de subvention ont été effectuées auprès du Conseil Régional Provence-Alpes-Côte d'Azur, du Conseil Général des Bouches-du-Rhône, de la Communauté d'Agglomération des Pays d'Aix et du FEDER. Pour assurer le fonctionnement de cette antenne, un technicien gestionnaire ITRF a été affecté sur le site au mois de février 2004.

Les recherches de l'équipe de « géochimie organique et isotopes stables » ont pour but principal de comprendre la variabilité naturelle du système atmosphère-



océan sur des échelles de temps allant de quelques siècles à plusieurs millions d'années. Mieux documenter ces changements, les dater précisément, comprendre les mécanismes en les modélisant sont des tâches importantes dans le cadre des projets visant à prédire l'évolution future du climat.

Depuis l'année 2002, nous avons engagé une étude de sédiments prélevés en Mer de Marmara. Ces travaux sont destinés à évaluer les échanges entre la Méditerranée et la Mer de Marmara pendant la dernière déglaciation et plus généralement les effets de la montée du niveau marin sur un bassin fermé. Ces études sont aussi utiles pour tester l'hypothèse controversée d'une submersion rapide de la Mer Noire pendant la période protohistorique. Cette problématique fait par ailleurs l'objet d'un projet plus étendu dont l'objectif est de documenter les changements climatiques, environnementaux, et hydrologiques enregistrés depuis la dernière période glaciaire dans cette région (projet HOBIT soumis à la Fondation Européenne pour la Recherche). Un intérêt majeur est l'impact de la déglaciation sur le fonctionnement hydrologique de la mer de Marmara. La montée du niveau de l'océan global a en effet connecté la mer de Marmara et la Mer Noire à la Méditerranée via les détroits des Dardanelles et du Bosphore, impliquant pour le bassin de Marmara des modifications complexes de son hydrologie (circulation, salinité), de sa géochimie (sapropèles), et de son régime sédimentaire (transition lacustre/marine). Les modalités de ces connexions, en âge, en direction, et en durée, sont encore aujourd'hui controversées.

L'étude d'une carotte (MD01-2430) prélevée en mer de Marmara lors de la mission MARMACORE (MD123) en 2001, a été focalisée sur cette déglaciation. Une série d'analyses géochimiques et micropaléontologiques des sédiments, effectuées au CEREGE et à l'Université Technique d'Istanbul (ITU), a permis d'obtenir des reconstitutions continues des conditions hydrologiques des eaux de surface (température, salinité) au cours des derniers 23 000 ans, couvrant ainsi la transition entre les régimes de sédimentation lacustre et marine. Ces travaux ont permis d'étudier pour la première fois l'hydrologie du bassin de Marmara au cours de la dernière période glaciaire (phase lacustre), de déterminer un âge de reconnexion entre mer de Marmara et Mer Méditerranée, de discuter les modalités du dépôt sapropélique S1 dont la formation est encore mal comprise, et de proposer un âge de reconnexion entre Mer Noire et mer de Marmara à 6 500 ans calendaires BP.

La dernière mission du Marion Dufresne (MD427, mai 2004) a permis le prélèvement de carottes sédimentaires (programme SEDINO accepté par l'IPEV). Ces nouveaux carottages devraient apporter des informations complémentaires sur les connections entre bassins, par leur situation géographique (débouché sud du Bosphore), et permettre d'étudier les environnements plus anciens encore peu documentés (stade isotopique 3). L'intégration de l'étude de ces carottes dans un cadre pluridisciplinaire (chronostratigraphie, géochimie organique, géochimie des isotopes stables et radiogéniques, micropaléontologie, palynologie) permettra d'obtenir des séries climatiques temporelles aussi complètes que possible. En

plus des sédiments, les eaux interstitielles ont été prélevées sur deux carottes. Leur analyse chimique et la modélisation du profil vertical de traceurs (chlorinité, O-18) devraient permettre de contraindre la rapidité de la dernière transition d'un environnement lacustre à marin.

## Publications de l'équipe

### 2003

BARD E., KROMER B. Absolute and radiocarbon chronologies of the Younger Dryas cold period. *In* Widemann F., Taborin Y. eds. Geophysical and archaeological chronologies for the Upper Palaeolithic, Bari Edipulgia, 375-379 (2003).

DELAYGUE G., STOCKER T.F., JOOS F., PLATTNER G.K. Simulation of atmospheric radiocarbon during abrupt oceanic circulation changes : trying to reconcile models and reconstructions. *Quaternary Science Reviews* 22, 1647-1658 (2003).

JOUZEL J., VIMEUX F., CAILLON N., DELAYGUE G., HOFFMANN G., MASSON-DELMOTTE V., PARRENIN F. Magnitude of isotope/temperature scaling for interpretation of central Antarctic ice cores. *Journal of Geophysical Research*, vol. 108, No D12, 4361, ACL6, 1-10 (2003).

SCHULTE S., BARD E. Past changes of biologically mediated dissolution of calcite above the chemical lysocline documented in Indian Ocean sediments. *Quaternary Science Reviews* 22, 1757-1770 (2003).

SHACKLETON N.J., SANCHEZ-GONI M.F., PAILLER D., LANCELOT Y. Marine Isotope Substage 5<sup>e</sup> and the Eemian Interglacial, *Global and Planetary Change* 36, 151-155 (2003).

TACHIKAWA K., ATHIAS V., JEANDEL C. Neodymium budget in the modern ocean and paleoceanographic implications. *Journal of Geophysical Research* 108, C8, 3254 (DOI), 1-13 (2003).

### 2004

ANTONIOLI F., BARD E., SILENZI S., POTTER E.K., IMPROTA S. 215-kyr sea-level oscillations from marine and continental layers in Argentario cave speleothems (Italy). *Global and Planetary Changes*, 43, 57-78 (2004).

BARD E. Greenhouse effect and ice ages : historical perspective. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences (CR Géosciences)* 336, 603-638 (2004).

BARD E., ROSTEK F., MÉNOT-COMBES G. A better radiocarbon clock. *Science* 303, 178-179 (2004).

BARD E., ROSTEK F., MÉNOT-COMBES G. Radiocarbon calibration beyond 20,000 BP by means of planktonic foraminifera of the Iberian Margin. *Quaternary Research* 61 (2), 204-214 (2004).

PATERNE M., AYLIFFE L.K., ARNOLD M., CABIOCH G., TISNERAT-LABORDE N., HATTE C., DOUVILLE E., BARD E. Paired  $^{14}\text{C}$  and  $^{230}\text{Th}/\text{U}$  datings on surface corals from Marquesas and Vanuatu (sub-equatorial Pacific) in 3,000 to 15,000 cal yr range. *Radiocarbon* 46, 551-566 (2004).

ROSELL-MELÉ A., BARD E., EMEIS K.C., GRIEGER B., HEWITT C., MÜLLER P.J., SCHNEIDER R.R. Sea surface temperature glacial anomalies in the global ocean estimated from the alkenone UK37' index : comparison with GCMs. *Geophysical Research Letters* 31 (3), L03208, 3208 (2004).

ROSENTHAL Y., PERRON-CASHMAN S., LEAR C.H., BARD E., BARKER S., BILLUPS K., BRYAN M., DELANEY M.L., DEMENOCAL P.B., DWYER G.S., ELDERFIELD H., GERMAN C.R., GREAVES M., LEA D.W., MARCHITTO Jr. T.M., PAK D.K., RAVELO A.C., PARADIS G.L., RUSSELL A.D., SCHNEIDER R.R., SCHEINDRICH K., STOTT L., TACHIKAWA K., TAPPA E., THUNELL R., WARA M., WELDEAB S., WILSON P. Inter-laboratory comparison study of Mg/Ca and Sr/Ca measurements in planktonic foraminifera for paleoceanographic research. *Geochemistry Geophysics Geosystems (G-cubed)* 5 (4), 2003GC000650, 1-29 (2004).

TACHIKAWA K., ELDERFIELD H. Chemistry of benthic foraminiferal shells for recording ocean environments : Cd/Ca,  $\delta^{13}\text{C}$  and Mg/Ca. In Global environmental change in the ocean and on the land (ed. M. Shiomi, H. Kawahata, H. Koizunu, and A. Tsuda). Terrapub Kluwer, 1-15 (2004).

TACHIKAWA K., ROY-BARMAN M., MICHARD A., THOURON D., YEGHICHEYAN D., JEANDEL C. Neodymium isotopes in the Mediterranean Sea : comparison between seawater and sediment signals. *Geochimica Cosmochimica Acta* 68, 3095-3106 (2004).

THÉVENON F., BARD E., WILLIAMSON D., BEAUFORT L. A biomass burning record from the West Equatorial Pacific over the last 360 kyr : Methodological, climatic and anthropic implications. *Palaeogeography, Palaeoclimatology and Palaeoecology* 213, 83-99 (2004).

### Textes de vulgarisation

BARD E., MÉNOT-COMBES G., DELAYGUE G. Des dates fiables pour les 50 000 dernières années. *Pour La Science*, dossier 42, 54-59 (janvier-mars 2004).

Bard E. Le climat peut-il basculer ? *La Recherche* 373, 30-37 (mars 2004).

### Encadrement

S. SÉPULCRE : « Variations temporelles de la dissolution des carbonates dans les sédiments : approches isotopiques, chimiques et micropaléontologiques ». DEA de Géosciences de l'Environnement présenté le 29/06/2004.

### Conférences dans le cadre de colloques

Wellington (Nouvelle-Zélande), septembre 2003, 18th International Radiocarbon Conference. Titres des présentations :

— BARD E., ROSTEK F., MÉNOT-COMBES G. « 14C dating of Iberian Margin sediments : implications for the calibration beyond 20,000 yr BP ».

— VAN DER PLICHT J., BECK W., BARD E., BAILLIE M.G.L., BUCK C., DAMON P., FRIEDRICH M., GUILDERSON T., HUGHEN K., KROMER B., MCCORMAC F.G., BRONK RAMSEY C., REIMER P., REIMER R.W., REMMELE S., SOUTHON J., STUIVER M., WEYHENMEYER C.E., BLACKWELL P. « COMPARE04 - Comparison / Calibration 14C records 26-50 ka ».

— HUGHEN K., BAILLIE M.G.L., BARD E., BECK W., BUCK C., CUTLER K., DAMON P., FAIRBANKS R., FRIEDRICH M., GUILDERSON T., HERRING C., KROMER B., MCCORMAC F.G., BRONK RAMSEY C., REIMER P., REIMER R.W., REMMELE S., SOUTHON J., STUIVER M., VAN DER PLICHT J., WEYHENMEYER C.E., BURR G., EDWARDS R.L., TAYLOR F., BLACKWELL P. « Extension and revision of the radiocarbon calibration dataset : Part 2 IntCal04 beyond tree rings 26.0 - 12.4 ka cal BP ».

— REIMER P., BAILLIE M.G.L., BARD E., BECK W., BUCK C., CUTLER, DAMON P., FAIRBANKS R., FRIEDRICH M., GUILDERSON T., HOGG A., HUGHEN K., BLACKWELL P. « Extension and revision of the radiocarbon calibration dataset : Part 1 IntCal04 12.4 - 0 ka cal BP ».

— PATERNE M., AYLIFFE L., ARNOLD M., CABIOCH G., TISNERAT-LABORDE N., HATTE C., DOUVILLE E., BARD E. « Paired 14C and 230Th/U datings on surface corals from marquesas and vanuatu (sub-equatorial pacific) in the 3,000 cal yr to 15,000 cal yr ».

Cracovie (Pologne), septembre 2003 : 21st International Meeting on Organic Geochemistry. Titre de la présentation :

— SCHULTE S., BARD E. « Phytoplanktonic community structure change during MIS 6 recorded in Indian Ocean deep-sea sediments ».

Kurashiki (Japon), septembre 2003 : Goldschmidt Conference 2003. Titre de la présentation :

— TACHIKAWA K., VIDAL L., SÉPULCRE S., BARD E. « Size-normalised Test Weights, Mg/Ca and Sr/Ca of Planktonic Foraminifera from the Arabian Sea ».

Nice, avril 2004 : European Geosciences Union annual meeting. Titres des présentations :

— MÉNOT-COMBES G., ROSTEK F., BARD E. « Diplopterol in Marmara Sea : productivity - preservation or paleoseismicity index ? », EGU04-A-05056.

— VIDAL L., MAJOR C., JOLY C., BRUNETON H., ROSTEK F., CAGATAY N., MÉNOT-COMBES G., BARD E. « Hydrological connections between the Mediterranean, Marmara and Black Seas during the last deglaciation », EGU04-A-04365.

— MAJOR C., VIDAL L., CAGATAY N., GOLDSTEIN S.L., RYAN W.B.F., MÉNOT-COMBES G., BARD E., LABEYRIE L. « Comparison of isotopic records from the Marmara and Black Seas : Indications of marine connection, outflow, and exchange », EGU04-A-06050.

— MÉNOT-COMBES G., COMBES P.-Ph., BURNS S.J. « Combined statistical and mechanistic approaches to resolve climatic information from delta-13C in plants », EGU04-A-05086.

— SAHER M., GANSSEN G., ROSTEK F., BARD E., JUNG S., KROON D. « Centenia I to millennial scale monsoon variations during Termination II in the Arabian Sea », EGU04-A-04201.

— CAGATAY M.N., SANCAR Ü., BARD E., LABEYRIE L., ERIS K., SAKINC M., MAJOR C., BECK C., MERCIER DE LEPINAY B., GÖRÜR N. « Late Quaternary paleoenvironmental records from the Marmara Sea : Geochemical and clay mineralogical evidence », EGU04-A-02788.

— AKCER S., SAKINC M., CAGATAY N., SANCAR U., BARD E., LABEYRIE L. « Bottom-water conditions in the marmara sea during the Holocene : evidence from benthic foraminifers », EGU04-A-00706.

### **Responsabilités diverses**

Éditeur de la revue *Earth and Planetary Science Letters* (Elsevier).

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