

Évolution du climat et de l'océan

M. Édouard BARD, professeur

La leçon inaugurale de la chaire

Présentée le 7 novembre 2002, elle a dressé un panorama général des recherches sur les variations temporelles du climat et de l'océan. La paléoclimatologie a pour but essentiel de documenter et comprendre la variabilité naturelle du système atmosphère-océan. Elle donne aussi les moyens de replacer la période récente dans la perspective des derniers millénaires afin de pouvoir détecter les éventuelles influences des activités humaines. De nouvelles méthodes quantitatives basées sur la chimie et la stratigraphie à haute résolution permettent maintenant de reconstruire les climats passés grâce à des archives variées telles que les sédiments océaniques et lacustres, les coraux, les stalagmites ou encore les glaces polaires. Le paléoclimatologue se situe donc à l'interface de la climatologie, de l'océanographie et de la géologie, utilisant la rigueur du climatologue « actua- liste » tout en gardant l'œil du naturaliste.

Les prévisions et les inquiétudes pour le siècle prochain concernent essentiellement la température et le niveau marin. Les fluctuations passées de ces deux paramètres peuvent être reconstruites à différentes échelles de temps et d'espace grâce à des marqueurs paléoclimatiques. Un aspect fondamental du domaine est de réussir à dater précisément les événements observés. Ceci est évidemment crucial pour tenter de comprendre l'enchaînement des causes et les effets rétroactifs nombreux dans le système océan-atmosphère. Les méthodes géochronologiques les plus fiables sont basées sur les décroissances radioactives d'isotopes mesurés par des techniques modernes de spectrométrie de masse.

Le climat du dernier millénaire a connu des changements relativement importants (« Petit Âge Glaciaire », « Optimum Médiéval ») du même ordre de grandeur que le réchauffement observé au cours du dernier siècle. À plus long terme, l'histoire du climat est ponctuée d'événements brusques et de grande amplitude. Leur fréquence est de l'ordre du millier d'années, mais les transitions sont extrêmement brèves, durant quelques décennies et donc à l'échelle d'une vie humaine.

Ces instabilités sont particulièrement marquées en période glaciaire dans l'Atlantique nord et l'Europe, mais elles semblent aussi affecter les périodes chaudes interglaciaires. Sous les tropiques, ces fluctuations se manifestent principalement par des changements hydrologiques alors que localement la température fluctue relativement peu. Sur des périodes plus longues comme les dernières centaines de milliers d'années, le climat global se caractérise par une succession de grands cycles glaciaires-interglaciaires rythmés par les changements périodiques de l'insolation liés aux variations lentes et régulières de l'orbite terrestre.

La comparaison entre les données d'observation et les simulations de modèles mathématiques permet de progresser dans la compréhension de cette variabilité climatique et quelquefois même de tester les modèles numériques pour des climats très différents du climat actuel. Par exemple, l'étude des changements millénaires illustre clairement la nécessité de prendre en compte des fluctuations de relativement basse fréquence, ainsi que les phénomènes de seuil d'instabilité du couple océan-atmosphère. Les recherches actuelles soulignent l'importance d'interactions complexes entre des facteurs externes et des réarrangements internes du système climatique faisant intervenir les circulations de l'océan et de l'atmosphère, les transferts d'eau douce entre les différents compartiments du cycle hydrologique, l'extension et la dynamique interne des calottes de glace ainsi que des variations de taille des nombreux réservoirs du cycle du carbone.

Le cours de l'année 2002-2003 :

Les changements climatiques brusques et leurs manifestations dans l'océan

Mécanismes et causes

Le système climatique est complexe car il est constitué de plusieurs compartiments (par ex. l'atmosphère, les océans, les calottes de glace, etc.) qui ont chacun leur temps de réponse et leurs propriétés thermodynamiques spécifiques. De plus, ces éléments interagissent les uns avec les autres de façon non linéaire et ils sont connectés à d'autres systèmes complexes comme le cycle du carbone qui régule les concentrations de certains gaz à effet de serre dans l'atmosphère. Le climat peut être perturbé par différents types de causes externes (par ex. changements de l'insolation) qui agissent à différentes échelles spatiales et temporelles dans le système. Un problème supplémentaire vient du fait que des réarrangements internes ainsi que des résonances et des oscillations propres peuvent se produire, ce qui rend encore plus difficile la détermination d'un état d'équilibre. En définitive, notre climat se caractérise par une variabilité naturelle importante et les véritables tendances à long terme ne sont pas toujours faciles à distinguer des fluctuations transitoires.

Ce problème fondamental a pu être étudié théoriquement dans le cas du couple océan-atmosphère. En utilisant une variété de modèles allant de constructions simples à quelques réservoirs homogènes aux modèles de circulation générale très

sophistiqués, il est maintenant reconnu que le couple océan-atmosphère présente plusieurs régimes stables, ou modes, pour les mêmes conditions aux limites. La transition d'un mode à l'autre se produit très rapidement quand certains paramètres climatiques atteignent des valeurs critiques. Ce comportement non linéaire peut être illustré par une boucle d'hystérésis qui représente la température dans la région de l'Atlantique Nord et des continents adjacents comme une fonction du flux d'eau douce vers l'Atlantique Nord (venant principalement des pluies, des rivières et de la fonte d'icebergs). Ce flux d'eau douce (F) perturbe la densité des eaux de surface, paramètre contrôlant la plongée en profondeur des masses d'eaux en Atlantique Nord, plus précisément en mers de Norvège, du Groenland et du Labrador. Actuellement, les eaux de surface de ces mers nordiques deviennent si denses qu'elles plongent dans les abysses, permettant la réoxygénation des couches profondes de l'océan mondial. Ce processus de convection est entretenu continuellement par le transport d'eau de surface des régions tropicales vers le Nord. Cette masse d'eau profonde Nord-Atlantique fait partie d'une gigantesque boucle de convection, dénommée circulation thermohaline mondiale, qui est souvent représentée par un énorme « tapis roulant ». Cette simplification un peu exagérée est néanmoins utile pour se représenter les échanges d'eaux profondes entre les différents bassins océaniques.

Une légère augmentation du flux d'eau douce par rapport à la valeur moderne (F), entraîne une légère diminution de la convection profonde et un refroidissement modéré en Atlantique Nord. Le système peut néanmoins basculer vers un autre mode si le flux d'eau douce atteint un seuil critique ($F + \Delta F$). Ce nouvel état stable se caractérise par une quasi-absence de circulation profonde et par des températures beaucoup plus basses en Atlantique Nord et sur les continents adjacents (mais sans altérer véritablement le contraste entre les côtes américaines et européennes). Une telle transition, dénommée bifurcation par les modélisateurs, se fait très rapidement, à l'échelle de quelques décennies. Une propriété remarquable de ce comportement de l'hystérésis est que l'état froid est aussi relativement stable. En effet, le flux d'eau douce doit diminuer de façon très significative vers une autre valeur de seuil critique ($F - \Delta F'$) avant que le système ne puisse revenir vers le mode chaud d'origine.

Mise en évidence au Groenland et en Atlantique Nord

Bien que ces théories soient intéressantes, avons-nous vraiment la preuve que de telles transitions brusques aient eu lieu dans le passé ? Heureusement pour les sociétés humaines, ce type de changement climatique extrême n'est jamais arrivé pendant la période historique. Il est donc indispensable de faire appel à la paléoclimatologie pour accéder à des séries temporelles à long terme. Au cours des dernières années, de nombreux spécialistes ont étudié des carottes de glace prélevées au Groenland et des sédiments marins carottés en Atlantique Nord. Ces deux types d'archives peuvent être datés et synchronisés précisément à l'aide de techniques variées. L'information climatique enregistrée dans ces

archives dépend de leur nature : par exemple, les paléotempératures au Groenland sont obtenues à partir des isotopes stables mesurés sur les molécules d'eau provenant de la glace (rapports $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ et D/H). Parmi d'autres méthodes, les températures des eaux de surface peuvent être reconstituées à partir de l'analyse de molécules spécifiques (en particulier celles appelées alkenones) qui sont synthétisées par certains organismes du phytoplancton et qui sont bien préservées dans les sédiments marins.

Pour les 100 000 dernières années, les fluctuations de température au Groenland et en Atlantique Nord sont clairement en phase. Les caractéristiques les plus remarquables sont des événements chauds se déroulant à l'échelle du millénaire. Ceux-ci sont particulièrement marqués au Groenland ($> 10\text{ }^{\circ}\text{C}$) mais relativement atténués dans l'Océan Atlantique. Plusieurs événements de froid intense ont pu être observés dans les sédiments océaniques. Ces refroidissements ne sont pas aussi clairement exprimés dans les carottes de glace du Groenland. Ces événements froids s'identifient facilement car les niveaux correspondants des sédiments marins contiennent aussi des débris rocheux transportés par les icebergs. Ces grains détritiques peuvent être comptés directement sous une loupe binoculaire ou caractérisés par l'analyse de leurs propriétés chimiques et magnétiques dans les carottes de sédiments. Les enregistrements pour l'Atlantique Nord montrent clairement que chaque période de débâcles d'icebergs est accompagnée d'un refroidissement intense d'environ $5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Ces changements climatiques ont été généralisés en Atlantique Nord et autour du Groenland. Les intervalles chauds sont appelés des événements de Dansgaard-Oeschger en l'honneur de deux pionniers de la paléoclimatologie, Willie Dansgaard de l'université de Copenhague et Hans Oeschger de l'université de Berne, qui ont identifié et décrit ces événements dans des carottes de glace du Groenland au début des années 1980. Plus tard, des couches distinctes contenant les débris détritiques glaciaires ont été découvertes dans les sédiments de l'Atlantique Nord situés entre 40 et $60\text{ }^{\circ}\text{N}$. Leur véritable signification fut reconnue par Hartmut Heinrich à la fin des années 1980. Ils ont eu pour origine principale l'énorme calotte de glace Laurentide qui produisait des sédiments détritiques en rabotant le socle rocheux canadien. Ce transport par les icebergs a pu être cartographié en analysant les propriétés minéralogiques, géochimiques et physiques des débris détritiques glaciaires contenus dans les sédiments. Ces changements paléocéanographiques sont maintenant dénommés les événements de Heinrich.

Variations de la circulation océanique superficielle et profonde

Afin de trouver un lien entre ces enregistrements et la modélisation du couple océan-atmosphère, il est crucial de considérer les variations de la ventilation de l'océan profond. De telles séries temporelles sont accessibles grâce aux mêmes sédiments marins utilisés pour l'étude des alkenones et des débris détritiques glaciaires. L'enregistrement est basé sur les isotopes du carbone contenus dans des coquilles d'organismes unicellulaires microscopiques qui vivent au fond de

l'océan. Ces foraminifères benthiques enregistrent dans leur squelette carbonaté le rapport $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ du carbone inorganique dissous des eaux profondes, lequel dépend de la ventilation océanique. Des valeurs élevées indiquent une circulation profonde intense, tandis que des valeurs faibles sont liées à des courants profonds moins vigoureux. Les enregistrements montrent que, pendant les 100 000 dernières années, la convection de l'Atlantique Nord a varié essentiellement entre trois modes. Les valeurs de $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ les plus élevées sont observées pour la période Holocène (11 000 dernières années) mais pendant la dernière glaciation, l'océan oscillait entre deux états caractérisés par des valeurs soit très faibles, soit élevées (bien que plus faibles qu'actuellement). Les enregistrements sédimentaires montrent que chaque période de débâcle d'icebergs est associée à une diminution très nette de la ventilation profonde de l'Atlantique.

Impacts sur les autres bassins océaniques et sur le cycle du carbone

Depuis quelques années, il apparaît que les événements de Dansgaard-Oeschger et de Heinrich ont aussi eu un impact sur le cycle du carbone marin. Une estimation globale de cet effet nécessite encore des recherches, mais plusieurs études ont montré que les teneurs en matière organique des sédiments de certaines régions océaniques varient en phase avec les événements de Dansgaard-Oeschger et de Heinrich. Des enregistrements convaincants ont été obtenus non seulement pour l'Atlantique Nord mais également dans les Océans Indien Nord et Pacifique Est. Ces changements ont été attribués à de grandes fluctuations de la productivité biologique marine dans les couches de surface de l'océan. Leur rapidité pourrait être liée à l'injection de nutriments dans la couche de surface océanique. L'intensité et la direction des vents seraient la cause première de ce mélange des masses d'eaux superficielles. Une deuxième contribution pourrait venir d'un apport direct d'éléments bio-limitants contenus dans les poussières transportées par les vents aux basses latitudes.

Il faut préciser que les concentrations et les flux massifs de matière organique marine dans les sédiments ne donnent qu'une idée qualitative de la productivité biologique de surface. En effet, la préservation de composés organiques dépend des conditions ambiantes dans la colonne d'eau, en particulier sa teneur en oxygène. Les zones océaniques à forte productivité biologique sont caractérisées par un déficit prononcé en oxygène dans les eaux de profondeurs intermédiaires (environ 300 à 1 000 m). Ce déficit d'oxygène résulte d'un équilibre entre la dégradation oxydative de la matière organique en sédimentation et la recharge par advection de masses d'eaux plus riches en oxygène. Les changements de circulation océanique pourraient ainsi avoir joué un rôle supplémentaire dans la genèse des enregistrements. Plusieurs marqueurs paléocéanographiques peuvent servir pour évaluer la sévérité du déficit en oxygène. Jim Kennett et son équipe de l'université de Californie à Santa Barbara, ont en effet obtenu des enregistrements de l'abondance relative des espèces de foraminifères benthiques adaptées au manque d'oxygène. De plus, Mark Altabet et ses collègues de l'université du

Massachusetts à Dartmouth ont mesuré le rapport $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ de la matière organique de sédiments de l'Océan Indien Nord. Le rapport isotopique de l'azote nous permet d'évaluer les variations de l'intensité du processus de dénitrification associé aux zones déficitaires en oxygène.

Distribution temporelle des événements climatiques brusques

La chronologie et la durée des événements de Dansgaard-Oeschger et de Heinrich ont été l'objet de nombreux débats et controverses. En 1993, Gerard Bond de l'Université de Columbia a identifié une certaine régularité en comparant les séries temporelles du Groenland et de l'Atlantique Nord : les événements sont apparemment distribués selon des cycles à plus long terme, avec des intervalles chauds devenant progressivement de plus en plus courts et de plus en plus froids. Chacun de ces cycles à long terme culmine en une période extrêmement froide et prolongée pendant laquelle a lieu une débâcle glaciaire (événement de Heinrich). D'autres chercheurs ont étudié cette variabilité millénaire en utilisant des techniques mathématiques d'analyse fréquentielle. Cette quête s'est révélée être beaucoup plus difficile que prévue car il faut éviter certains artefacts mathématiques liés à l'irrégularité de l'échantillonnage et à la forme très asymétrique des cycles climatiques. L'existence d'un cycle sous-jacent de 1 500 ans a été détectée dans plusieurs séries temporelles, mais ceci reste encore assez controversé. Une simple estimation à l'œil nu suffit à montrer que les enregistrements ne se résument pas à de simples sinusoïdes. Michael Schulz à Kiel a récemment publié que le pic spectral de 1 500 ans est essentiellement causé par trois événements qui au total ne représentent que 5 % de la durée de la période glaciaire (entre 30 000 et 35 000 années BP). D'autres études récentes de Richard Alley à PennState et du groupe de Potsdam suggèrent que l'enregistrement de la température au Groenland aurait la régularité typique d'un système à résonance stochastique qui amplifierait de petites fluctuations du flux d'eau douce en Atlantique Nord. Les observations et les simulations de modèle indiquent en effet que les intervalles de temps entre les réchauffements consécutifs prennent des valeurs discrètes de l'ordre de 1 500, 3 000 et 4 500 ans, avec des probabilités qui vont en décroissant pour les intervalles les plus larges.

Les variations très récentes

L'unique événement majeur de l'Holocène s'est produit, il y a environ 8 200 ans BP. Il est plus court et de plus faible amplitude que les changements observés en période glaciaire. Sédimentologues et glaciologues pensent que ce refroidissement serait dû à un apport d'eau douce dans l'Océan Atlantique Nord. Des lacs périglaciaires, localisés au niveau de la zone de fonte de la calotte glaciaire Laurentide, auraient provoqué un apport soudain d'eau douce à l'Océan du fait de la déviation de leur drainage vers le détroit d'Hudson à la fin de la dernière déglaciation.

Il est important de se rappeler que pendant la glaciation, les quatre kilomètres d'épaisseur de la calotte Laurentide ont entraîné une forte dépression du continent sous-jacent. En raison de la lenteur du réajustement isostatique (plusieurs millénaires) liée à la viscoélasticité de la Terre, la glace a fondu dans la dépression induite par la calotte Laurentide. Par sa localisation centrée sur la Baie d'Hudson, la calotte bloquait aussi bien la Baie que ses exutoires, et de vastes lacs se sont formés au sud de la Laurentide sans pouvoir s'écouler. Néanmoins, lors d'une phase tardive de la déglaciation, l'eau de fonte est finalement parvenue à se frayer un chemin vers l'océan. Cet événement singulier a eu un caractère probablement catastrophique. La chaleur dégagée par la turbulence a provoqué une augmentation rapide de la taille du canal de drainage, créant ainsi un véritable chenal dans la glace. Le plus grand lac à la surface de la Terre, se serait donc vidé dans l'Océan Atlantique Nord en un temps très court, entre une saison et quelques années. La vidange de ce bassin a été suivie immédiatement par un refroidissement généralisé, probablement provoqué par la formation de glace de mer en Atlantique Nord. Il est aussi vraisemblable que cet événement soudain a eu un effet transitoire sur la circulation Atlantique profonde, au moins pour sa composante qui plonge en Mer du Labrador.

L'événement du début de l'Holocène est significatif, non seulement par son ampleur (bien que les événements de la glaciation étaient plus importants), mais également parce qu'il nous montre qu'un climat globalement chaud peut être fortement perturbé de manière assez soudaine. L'événement de 8 200 ans BP peut donc servir pour tester les modèles numériques du système climatique actuel. Les conditions de l'époque, comme les dimensions des calottes de glace, étaient comparables aux conditions actuelles ce qui n'était pas le cas pour les événements climatiques rapides de la glaciation.

E. B.

Les séminaires de l'année 2002-2003

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

Francis Grousset, (CNRS, Environnements et Paléoenvironnements Océaniques, Université de Bordeaux 1, Talence).

« Étude isotopique des sédiments apportés par les icebergs, lors des événements de Heinrich »

Laurent Labeyrie, (Université de Paris-XI, Orsay).

« Réponse des eaux intermédiaires et profondes aux changements climatiques rapides »

Sylvain Huon, (Université Pierre et Marie Curie, Paris-VI).

« Enregistrement de la variabilité climatique rapide dans les archives sédimentaires de l'Atlantique Nord : cas de la matière organique »

Didier Paillard (CEA, Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement, Gif-sur-Yvette).

« Quelques concepts dynamiques et quelques hypothèses pour tenter d'expliquer la variabilité climatique rapide »

Thomas Stocker, (Université de Berne, Suisse).

« Abrupt climate change : reading the future in the past »

Jérôme Chappellaz, (CNRS, Laboratoire de Glaciologie et de Géophysique de l'Environnement, Saint Martin d'Hères).

« Les événements climatiques rapides enregistrés dans les carottes de glace. Quoi ? Où ? Quand ? Comment ? »

Rainer Zahn, (Université de Barcelone et ICREA).

« Rapid climate change : a paleoceanographic perspective from the southern hemisphere »

Antoni Rosell-Melé, (Université Autonome de Barcelone et ICREA).

« The Heinrich events revisited : insights from novel applications of biomarkers »

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 (quatre chercheurs et enseignants-chercheurs, un ATER, un post-doc, deux ingénieurs en géochimie, un assistant éditorial et un étudiant en thèse). 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.

Le fil conducteur est la volonté d'étudier les mêmes phénomènes climatiques, en particulier les glaciations et les changements climatiques brusques, à l'aide de marqueurs géochimiques complémentaires. Un thème central est de mieux comprendre les relations entre la variabilité rapide millénaire et les lentes fluctuations de l'orbite terrestre qui modulent l'intensité de phénomènes comme les moussons.

Nos principaux chantiers d'étude concernent la variabilité climatique et océanographique en Atlantique Nord et dans les zones tropicales des Océans Indien et Pacifique. Les efforts se portent principalement sur les relations temporelles qui existent entre les changements de la température de l'océan, la productivité biologique marine et le niveau de la mer. Un autre volet des recherches de l'équipe concerne la comparaison entre les données d'observation et les simulations de modèles mathématiques. L'utilisation de modèles, implantés au CEREGE

ou accessibles en collaboration avec des laboratoires spécialisés, permet de progresser dans la compréhension de cette variabilité climatique et de tester les reconstitutions paléoclimatiques.

Nous analysons en particulier des sédiments marins carottés à grandes profondeurs lors de campagnes récentes du navire océanographique *Marion-Dufresne*. Différentes techniques analytiques de chimie organique et isotopique sont utilisées pour obtenir des informations sur l'ampleur et la vitesse des variations climatiques et océanographiques. Un des préalables aux études paléoclimatiques consiste à développer des indicateurs pertinents, sensibles aux changements climatiques, et de les calibrer par rapport aux paramètres que l'on cherche à reconstituer. Nos efforts de calibration concernent la géochimie organique, avec les alkenones, et la géochimie minérale, avec le rapport Mg/Ca des foraminifères. Ces deux indicateurs doivent permettre d'estimer les températures de surface de l'océan avec une meilleure précision que les méthodes classiques. Dans ce contexte, on peut souligner que l'équipe a participé à des intercomparaisons plurinationales destinées à comparer les résultats analytiques.

L'étude du niveau marin pendant la dernière déglaciation a été poursuivie pour le site de Tahiti. Les datations de coraux provenant de plusieurs forages inclinés ont ainsi permis de réviser à la baisse l'amplitude de la période de remontée rapide appelée MWP1B à La Barbade (MWP = melt water pulse). Nos données ainsi que celles de la littérature ont pu être comparées aux simulations des modèles géophysiques qui tiennent compte des réajustements hydro-isostatiques postglaciaires. Les fluctuations eustatiques à plus long terme ont pu être datées par U-Th grâce à des coraux et d'autres carbonates.

Très récemment, 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 seront aussi utiles pour tester l'hypothèse controversée d'une submersion rapide de la Mer Noire pendant la période protohistorique.

Publications de l'équipe :

— BARD E., ANTONIOLI F., SILENZI S. Sea-level during the penultimate interglacial period based on a submerged stalagmite from Argentarola Cave (Italy). *Earth and Planetary Science Letters* 196, 135-146, (2002).

— BARD E. Climate shock : Abrupt changes over millennial time scales. *Physics Today* 55 (12), 32-38, (2002).

— BARD E., DELAYGUE G., ROSTEK F., ANTONIOLI F., SILENZI S., SCHRAG D.P. Hydrological conditions over the western Mediterranean basin during the deposition of the cold sapropel 6 event. *Earth and Planetary Science Letters* 202, 481-494, (2002).

— DELANGHE D., BARD E., HAMELIN B. New TIMS constraints on the uranium-238 and uranium-234 in seawaters from the main ocean basins and the Mediterranean Sea. *Marine Chemistry* 80, 79-93, (2002).

— DIESTER-HASS L., MEYERS P., VIDAL L. The Late Miocene onset of high productivity in the Benguela upwelling area as part of a global pattern, *Marine Geology* 180, 87-103, (2002).

— MÉNOT-COMBES G., BURNS S.J., LEUENBERGER M. Variations of $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ in peat plants : implications for paleoclimatic studies. *Earth and Planetary Science Letters* 202, 419-434, (2002).

— PAILLER D., BARD E., ROSTEK F., ZHENG Y., MORTLOCK R., VAN GEEN A. Burial of redox-sensitive metals and organic matter in the equatorial Indian Ocean linked to precession. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 66, 849-865, (2002).

— PAILLER D., BARD E. High frequency paleoceanographic changes during the past 140,000 years recorded by the organic matter in sediments off the Iberian Margin. *Palaeogeography, Palaeoclimatology and Palaeoecology* 181, 431-452, (2002).

— SHACKLETON N.J., CHAPMAN M., SANCHEZ-GONI M.F., PAILLER D. and LANCELOT Y. The Classic Marine Isotope Substage 5e, *Quaternary Research* 58, 14-16, (2002).

— SICRE M.A., BARD E., EZAT U., ROSTEK F. Alkenones distributions in the North Atlantic and Nordic sea surface waters. *Geochemistry, Geophysics and Geosystems* (G-cubed) 3 (2), 2001GC000159, 1-13, (2002).

— TACHIKAWA K., ELDERFIELD H., 2002. Microhabitat Effects on Cd/Ca and $\delta^{13}\text{C}$ of benthic Foraminifera. *Earth and Planetary Science Letters* 202, 607-624, (2002).

— VIDAL L., BICKERT T., WEFER G., RÖHL U. Late Miocene stable isotope stratigraphy of the SE Atlantic ODP Site 1085 : Relation to messinian events, *Marine Geology* 180, 71-85, (2002).

— 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).

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

— 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).

— BORELLA S., MÉNOT-COMBES G., LEUENBERGER M. Sample homogeneity and α -cellulose extraction from tree rings for stable isotope analyses, In : Stable Isotope Analytical techniques, P.D. Groot (ed), Elsevier Publishing, sous presse.

— TACHIKAWA K., ATHIAS V., JEANDEL C. Neodymium budget in the modern ocean and paleoceanographic implications. *Journal of Geophysical Research*, sous presse.

— VIDAL L., ARZ H. Oceanic climate variability at Millennial time scale : modes of climate connections, in Battarbee R.W., F. Gasse and C. Stickley (Eds), Past climate variability through Europe and Africa. Kluwer Academic Publi., Dordrecht, the Netherland, sous presse.

Textes de vulgarisation :

— BARD E. Les humeurs du Soleil changent notre climat. *La Recherche* 352, 17-18, (2002).

— BARD E. L'effet de serre. *La Recherche* 356, 50-53, (2002).

— BARD E. Existe-t-il un effet de serre sur d'autres planètes ? *La Recherche* 359, 104, (2002).

— BARD E. La Méditerranée au cœur du réchauffement climatique. *Terres Marines* 10-13, (2002).

Encadrement doctoral :

— T. DE GARIDEL (boursier du MENRT) : Dynamique climatique de l'Océan Pacifique Ouest Équatorial au cours du Pléistocène récent. Thèse de doctorat de l'Université Aix-Marseille III soutenue le 19/07/2002.

— D. DELANGHE (boursier du MENRT) : Étude de la dernière déglaciation et de l'impact de la remontée du niveau marin sur la construction d'un récif corallien. Exemple du récif de Tahiti. Thèse de doctorat de l'Université Aix-Marseille III soutenue le 27/09/2002.

— F. THÉVENON (boursier du MENRT) : Les résidus carbonés de feux dans les sédiments lacustres et océaniques intertropicaux : implications méthodologiques, climatiques et anthropiques. Thèse de doctorat de l'Université Aix-Marseille III soutenue le 4/07/2003.

— C. JOLY : Reconstitutions de l'hydrologie de la Mer de Marmara durant les derniers 23 000 ans et implications pour les échanges entre la Méditerranée et la Mer Noire. DEA de Géosciences de l'Environnement présenté le 26/06/2003.

Conférences dans le cadre de colloques :

Paris, septembre 2002, invité. Colloque Interacadémique. Effet de serre, impacts et solutions : quelle crédibilité ? Titre de la présentation :

— BARD E. Variations de la circulation océanique et du cycle du carbone liées aux changements climatiques rapides.

Nice, avril 2003, invité. European Geophysical Society, American Geophysical Union, European Union of Geosciences Joint Assembly. Titres des présentations :

— BARD E., SONZOGNI C. Improving paleoceanographic interpretations by using paired alkenones and uranium measurements in deep-sea sediments.

— TACHIKAWA K., FONTANIER C., JORISSEN F., BARD E. Mg/Ca and Sr/Ca in living benthic foraminiferal tests from the northeastern Atlantic.

— VIDAL L., TACHIKAWA K., SONZOGNI C., BEAUFORT L., BARD E. Glacial/Interglacial hydrologic changes in the south west Pacific.

Woods-Hole (USA), mai 2003, invité. IntCal04 Working Group Meeting. Titre de la présentation :

— BARD E. Review of IntCal criteria for corals.

Responsabilités diverses :

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

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