

## Évolution du climat et de l'océan

M. Édouard BARD, professeur

### Changements climatiques brusques et glaciations

Le climat de la Terre est caractérisé en premier lieu par sa surprenante stabilité, liée à la présence de nombreux mécanismes stabilisateurs qui ont tendance à ramener toute perturbation (cyclique ou irrégulière) vers un état d'équilibre. Pour aller plus avant, il est nécessaire d'introduire la notion de rétroaction (*feedback*) climatique. Le climat forme un système complexe dont les différents compartiments sont couplés les uns aux autres : l'action d'un compartiment A sur un compartiment B est suivie d'une réaction de B sur A. Dans certains cas, cette rétroaction de B sur A amplifie l'action de A sur B ; on parle alors de rétroaction positive. Si au contraire elle atténue l'action de A sur B, on parle de rétroaction négative. Pour clarifier cette notion fondamentale, mais un peu abstraite, il est utile de mentionner quelques exemples.

À l'échelle des millions d'années, l'effet de serre est régulé par un équilibre entre le flux volcanique et le pompage du CO<sub>2</sub> atmosphérique par l'altération chimique des roches silicatées. Si la concentration atmosphérique en gaz carbonique s'élève à la suite, par exemple, d'une augmentation de l'activité volcanique, l'effet de serre qui s'ensuit accroît la température et les précipitations, ce qui accentue l'altération chimique des roches par l'acide carbonique. Cette érosion chimique induit une consommation du gaz carbonique atmosphérique et donc la diminution de sa concentration dans l'atmosphère. Il s'agit en fait du principal mécanisme de rétroaction négative, qui a permis de contenir les variations de l'effet de serre à très long terme.

Il existe aussi des rétroactions climatiques positives, qui conduisent à une aggravation du phénomène perturbateur. Un exemple typique est celui du recul de la banquise sur l'océan ou de la couverture neigeuse sur le continent : plus les températures augmentent, plus la neige et la glace reculent, donc moins le rayonnement solaire est réfléchi vers l'espace et, par conséquent, plus les températures augmentent.

Agissant sur des échelles de temps très courtes, l'eau de l'atmosphère est aussi à l'origine de rétroactions multiples. Si l'océan de surface se réchauffe, la teneur en vapeur d'eau de l'atmosphère augmente rapidement, ce qui induit une augmentation de l'effet de serre. Il s'agit d'une rétroaction positive, qui a tendance à réchauffer encore plus l'océan de surface. Néanmoins, le système climatique ainsi perturbé réagit avec d'autres mécanismes, en particulier une augmentation de la couverture nuageuse. Les nuages bas augmentant fortement la réflexion de la lumière solaire, l'océan sous-jacent a tendance à se refroidir (rétroaction négative).

Un autre exemple de rétroaction positive est associé au bilan hydrique des régions continentales aux basses latitudes. Dans les climats humides, les précipitations régionales sont captées par les racines et ainsi absorbées par les plantes, pour être ensuite réinjectées vers l'atmosphère. On observe donc qu'une augmentation des précipitations est significativement amplifiée. Au contraire, sous les climats secs, les précipitations alimentent directement les nappes phréatiques, les rivières et les océans, ce qui réduit encore l'apport local en eau de ces faibles précipitations.

Ces quelques exemples ne décrivent pas de façon exhaustive tous les changements qui auraient lieu. Néanmoins, ils illustrent déjà la complexité du problème car, par un effet de domino, chaque variation se propage dans le système et engendre une cascade d'événements qui auront tendance à amplifier ou à diminuer la perturbation de départ – mais l'analogie avec les dominos a ses limites : il faudrait en fait imaginer un système dont les dominos pourraient se relever !

Le système climatique peut être perturbé non seulement par ces mécanismes de rétroactions internes, mais aussi par des facteurs externes de nature astronomique ou géologique. Cela est vrai à toutes les échelles de temps, en particulier à celle des derniers millénaires.

On sait maintenant que le flux énergétique du Soleil n'est pas constant dans le temps. Grâce aux mesures réalisées par les sondes spatiales depuis les années 1980, il apparaît que l'éclairement du Soleil fluctue à court terme selon un cycle de onze ans accompagné par une variation d'éclairement total d'environ 0,1 %. Plusieurs équipes d'astrophysiciens ont développé des modèles pour convertir les observations de l'activité solaire en termes d'éclairement pour les quelques derniers siècles. Ces enregistrements montrent que l'éclairement solaire varie aussi à long terme, avec des périodes de faible valeur correspondant à des baisses d'activité du Soleil. La plus connue de ces phases de calme solaire a eu lieu entre 1645 et 1715, période pendant laquelle les taches solaires étaient pratiquement absentes. À plus long terme, il est possible d'utiliser des marqueurs isotopiques (cosmonucléides) afin d'estimer approximativement les variations de l'éclairement solaire. Un résultat majeur de ces études est que le minimum du xvii<sup>e</sup> siècle n'est qu'un minimum parmi de nombreux autres et que le Soleil a passé une partie importante des derniers millénaires en phase calme, avec un éclairement généralement un peu plus faible que sa valeur actuelle. L'impact climatique de ces fluctuations est encore très

incertain. Néanmoins, de nombreux chercheurs pensent que ces variations irrégulières sont en partie responsables des variations climatiques à l'échelle des derniers millénaires.

Le volcanisme fait aussi partie des causes externes ayant pesé sur la variabilité climatique de l'holocène. Une éruption majeure peut propulser dans la haute atmosphère des gaz soufrés, qui se transforment rapidement en aérosols sulfatés, petites particules qui réfléchissent les rayons solaires et ont ainsi tendance à refroidir le climat. On a pu en étudier l'impact de manière particulièrement précise lors de l'éruption de 1991 du volcan Pinatubo, dans les Philippines, dont l'effet à l'échelle mondiale a été une baisse des températures d'environ 0,5 °C au niveau du sol. Néanmoins, l'influence climatique d'une éruption ne dure pas plus de deux ou trois ans, car les aérosols retombent assez rapidement, et ne changent donc pas durablement le climat. Cependant, les fluctuations de la fréquence et de l'intensité des grandes éruptions volcaniques qui ont effectivement eu lieu au cours du dernier millénaire ont pu contribuer aux faibles variations climatiques observées.

Le réchauffement climatique causé par l'injection de gaz carbonique d'origine anthropique constitue certainement l'un des risques majeurs auxquels l'humanité devra faire face dans les prochaines décennies. Ce problème, qui nous concerne tous et dont nous portons une part variable de responsabilité au travers de notre consommation individuelle et collective en énergies fossiles, est sans précédent dans son aspect complexe et difficile à prévoir. Cette difficulté de la prévision climatique est liée en partie non seulement à la complexité du climat, mais aussi aux incertitudes sur l'injection future en gaz carbonique par les nombreuses activités humaines disséminées à l'échelle de la planète.

Nos sociétés ont déjà fait face à d'autres risques, notamment à des problèmes affectant l'environnement ou la santé humaine (détérioration de la couche d'ozone, pluies acides, pollutions chimiques, radioactivité, manipulations génétiques, amiante, ondes électromagnétiques, nanoparticules...). Ces différents risques posent ou ont posé des problèmes scientifiques et techniques engendrant également des problèmes éthiques. Néanmoins, aucun d'entre eux ne présente le niveau de complexité du changement climatique.

Prévoir l'évolution du climat oblige à considérer le système climatique à la fois dans sa globalité et dans ses menus détails. Il est nécessaire d'appréhender cette complexité à toutes les altitudes, depuis la stratosphère jusqu'à l'océan profond, et à toutes les latitudes, depuis les calottes de glace polaires jusqu'aux tourbières tropicales. L'échelle des processus physicochimiques varie depuis d'invisibles noyaux de condensation jusqu'aux cellules de convection de Hadley mettant en mouvement une grande partie de la masse atmosphérique. Cette diversité spatiale s'accompagne d'une extrême diversité dans les échelles de temps : des éruptions volcaniques durant quelques jours doivent être prises en compte au même titre que de lentes variations de la géométrie de l'orbite terrestre, qui s'étalent sur des millions d'années.

En conséquence, il est impossible à une seule personne de conduire des recherches pointues et de s'exprimer avec compétence sur tous les sujets, que ce soit à destination d'autres scientifiques, de décideurs, de journalistes ou du grand public. Cette diversité dans l'espace, dans le temps et dans la nature même des processus rend nécessaire la communication et la collaboration entre scientifiques venant d'horizons très variés, depuis la biologie moléculaire jusqu'à l'astrophysique. Une telle synergie des connaissances est indispensable et fructueuse. Le risque de dérive vers une dilution des compétences aboutissant à un consensus inutile est évité grâce aux débats ouverts entre chercheurs et aux mécanismes qui régissent l'expertise scientifique. La communauté qui s'occupe de climatologie fonctionne avec la même rigueur et les mêmes critères que les autres domaines scientifiques, comme la physique, la chimie ou la biologie : publication détaillée des résultats, évaluation des travaux par les pairs, reproduction des mesures et des calculs par des groupes totalement indépendants, débats lors de colloques internationaux ouverts à tous les scientifiques, qui peuvent alors exposer leurs accords et désaccords.

Les climatologues ont néanmoins été les premiers à s'organiser au niveau international dans le cadre des Nations unies, avec pour objectif d'évaluer les informations scientifiques disponibles et de fournir aux gouvernants et décideurs des synthèses techniques sur l'impact du changement climatique. C'est ainsi que le GIEC a été mis en place en 1988 par l'Organisation météorologique mondiale et l'organisation des Nations unies. Il établit régulièrement un rapport de synthèse des résultats scientifiques acquis sur les changements climatiques récents et les scénarios plausibles pour le futur.

Il faut souligner que le GIEC ne se substitue pas aux efforts des chercheurs en climatologie et n'est donc pas une agence supplémentaire qui réaliserait des recherches originales. Son objectif fondamental est de compiler et de synthétiser les informations scientifiques disponibles et de fournir aux gouvernants, aux décideurs et aux médias des rapports succincts sur la réalité et les projections du changement climatique. Sa raison d'être et sa grande utilité sont justement de fournir le cadre permettant à la recherche scientifique sur le climat d'accomplir un effort complémentaire.

De récentes enquêtes d'opinion ont montré que les chercheurs en climatologie sont globalement d'accord sur les faits importants comme l'existence du réchauffement depuis un siècle, l'ampleur de la perturbation du bilan radiatif terrestre par les gaz à effet de serre d'origine anthropique et enfin sur l'influence probable de cette perturbation pour expliquer le réchauffement des dernières décennies. Comme pour d'autres domaines, ce consensus n'est que la partie émergée de l'« iceberg » d'une recherche scientifique très active, qu'animent de nombreux débats sur des points importants entraînant des incertitudes notables dans la compréhension des variations climatiques du passé ainsi que dans la prévision de celles du futur.

Ces enquêtes d'opinion ont également mis en évidence la divergence entre la perception des scientifiques, actifs spécialistes du domaine, et celle de groupes *a priori* moins compétents. Le grand public se partage même équitablement en deux groupes, selon que les opinions sont pour ou contre le consensus des scientifiques, ce qui démontre que ces derniers doivent mieux communiquer sur leurs résultats et les inévitables incertitudes qui leurs sont associées. Le fait que des thèses controversées ou erronées reçoivent un écho favorable auprès du grand public n'est pas complètement étonnant. Ce problème n'est d'ailleurs pas spécifique à la climatologie : on observe aussi que la validité scientifique de l'astrologie n'est pas perçue de la même manière par les astronomes et par le grand public, ni celle de l'homéopathie par les chercheurs en biologie médicale et toute autre personne, ni même celle du créationnisme par les biologistes et les paléontologues, d'une part, et les non-scientifiques, d'autre part.

Certains caricaturent le consensus des chercheurs en climatologie en le disant contraire à l'approche scientifique. Cette accusation est infondée, car il s'agit d'un consensus « dynamique », c'est-à-dire sujet à révision permanente. Ce consensus s'appuie sur les travaux d'une multitude de chercheurs actifs qui, comme nous l'avons dit plus haut, débattent entre eux et utilisent les mécanismes de l'expertise scientifique appliqués à tous les domaines des sciences. Il y a un demi-siècle, le philosophe et historien des sciences Thomas Kuhn expliquait que la recherche d'un consensus scientifique n'est pas une fin en soi, mais qu'elle est une conséquence inévitable de l'approche scientifique. Le consensus est même nécessaire pour que la science puisse progresser, ne serait-ce que pour le confirmer ou l'invalider. Si les scientifiques ne pouvaient se mettre d'accord sur un socle commun de connaissances, ils perdraient leur temps en discussions incessantes et ne pourraient progresser, même pour vérifier les faits en question.

La recherche médicale fournit également des exemples concrets de l'utilité du consensus scientifique. Les chercheurs sont d'accord sur les actions bénéfiques d'une multitude de traitements médicaux, même si de nombreuses incertitudes demeurent, comme on peut le lire sur la notice d'utilisation de tout médicament. La recherche médicale permet parfois, mais rarement, de revenir sur le consensus d'un temps en retirant une molécule de la pharmacopée officielle. Pour revenir au climat de la Terre, les docteurs en climatologie sont généralement d'accord pour constater que la température du patient est en hausse et que celui-ci doit être sevré au plus vite d'une overdose de gaz à effet de serre, néfaste pour la santé de notre planète.

Pour compléter le cours sur l'évolution du climat, deux colloques de séminaires ont été consacrés à l'évolution du niveau marin ainsi qu'au bilan scientifique de la quatrième année polaire internationale.

Le premier colloque s'est déroulé le vendredi 8 août au centre IRD (Institut de recherche pour le développement) de Nouméa (Nouvelle-Calédonie). À cette occasion sont intervenus plusieurs scientifiques de disciplines aussi variées que la

paléoclimatologie, la géologie, la biologie et l'océanographie physique. Cette séance a été introduite par Fabrice Colin, directeur du Centre IRD de Nouméa qui a présenté les grandes lignes des recherches menées dans ce centre du Pacifique, puis annoncé le contenu du programme intitulé « le changement climatique et le niveau marin ». Dans mon intervention, j'ai traité des « causes et mécanismes des variations du niveau de la mer ». J'ai notamment présenté les différentes causes de variation du niveau de la mer incluant la dilatation des couches superficielles de l'océan ainsi qu'une fonte accélérée des glaciers continentaux dans le contexte actuel du réchauffement mondial. Ces fluctuations du niveau marin sont mesurées précisément grâce aux marégraphes et aux satellites d'altimétrie ; la hausse récente du niveau marin global vient en fait s'ajouter à des variations naturelles plus lentes liées aux glaciations et à des changements de la géométrie des océans. La présentation de Guy Cabioch (IRD, U.R. « Paléotropique ») a porté sur « le développement des récifs coralliens au cours de la dernière déglaciation dans le Pacifique Sud-Ouest ». Il s'avère que les récifs coralliens sont d'excellents enregistreurs des variations des conditions environnementales notamment globales et l'étude de leur croissance peut renseigner sur les modalités de la remontée du niveau marin au cours de la dernière déglaciation (c'est-à-dire environ des derniers 20 000 ans de - 130 mètres au niveau actuel). Les études effectuées en Nouvelle-Calédonie et au Vanuatu apportent des informations sur cette remontée dans le Pacifique sud-ouest et le comportement des récifs à cette remontée du niveau marin. La présentation de Claude Payri (professeur à l'université de la Polynésie française en détachement à l'IRD, UMR « Systématique, adaptation, évolution ») a porté sur « les algues rouges calcaires dans les récifs coralliens, indicateurs de paléoenvironnements ». Les algues rouges calcaires représentent avec les coraux les organismes majeurs de la biominéralisation des récifs coralliens. Les processus qui contrôlent leur capacité à précipiter du carbonate de calcium (calcaire) dans leurs tissus sont particulièrement sensibles aux variations des paramètres du milieu tels que température et pH. Le réchauffement climatique et l'acidification des océans pourraient altérer ces fonctions et menacer directement leur maintien dans le milieu. La répartition des différentes espèces dans le milieu récifal moderne dépend également des conditions de luminosité et d'agitation des eaux, leur identification permet de déterminer des assemblages caractéristiques des différentes zones du récif. Le dépôt de carbonate de calcium (calcaire) dans les tissus de ces organismes laisse des traces fossiles dans les archives sédimentaires des récifs et l'examen microscopique des restes fossiles permet alors d'identifier un certain nombre d'espèces et de reconnaître des assemblages fossiles à la lumière des connaissances acquises sur les formes actuelles. L'étude de ces assemblages fossiles permet ainsi de reconstituer l'évolution du milieu récifal dans les séries temporelles et de préciser au mieux les variations du niveau marin. Dans la dernière présentation, Christophe Maes (IRD, UMR LEGOS) a parlé de l'« importance des effets stériques des couches océaniques dans les variations du niveau moyen de la mer ». Depuis une quinzaine d'années, les données altimétriques permettent de surveiller les variations du niveau de la mer de façon globale et précise. Ces observations d'origine spatiale indiquent notamment

une hausse moyenne globale de 3 mm/an, tendance sensiblement plus grande que celle des dernières décennies qui est attribuée au réchauffement climatique global. Un des problèmes majeurs tient dans l'attribution des différentes causes à cette augmentation. En utilisant les données traditionnelles de l'océanographie physique, l'analyse conjointe de plusieurs sources d'observations océaniques a permis de séparer les contributions thermostériques (dilatation thermique des couches océaniques) et halostériques (contraction liée à la présence de sel dans l'eau de mer) qui sont associées à la hausse du niveau de la mer. Si le premier effet du réchauffement global est lié à l'augmentation du niveau moyen des océans par dilatation, la contribution halostérique a permis de révéler l'importance des apports extérieurs de masse d'eau (aussi appelés effets eustatiques, qui rentrent dans le cycle naturel de l'eau à l'échelle planétaire). D'un point de vue plus régional, ces études mettent aussi en évidence les différentes signatures des phénomènes majeurs caractérisant la variabilité de notre système climatique. Ce colloque s'est tenu quelques semaines après l'inscription, le 7 juillet à Washington, sur la liste du patrimoine mondial de l'UNESCO d'une grande partie des récifs et lagons de la Nouvelle-Calédonie (15 000 km<sup>2</sup> sur les 23 000 km<sup>2</sup>). C'est le premier espace de l'Outre-Mer français inscrit au patrimoine mondial de l'humanité. En cette année internationale des océans et des récifs coralliens, il s'agit d'un acte fort, salué par l'ensemble de la communauté internationale. L'effort de recherche devra être maintenu voire développé pour accompagner au mieux la gestion de ces espaces et aider au maintien de cet écosystème dans son état naturel.

La quatrième Année polaire internationale (API) s'est officiellement achevée les 14 et 15 mai 2009 par un symposium organisé conjointement par le Collège de France et l'Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques, Sénat et Assemblée nationale, en partenariat avec le CNRS et l'IPEV (Institut Paul-Émile Victor). À l'invitation du sénateur Christian Gaudin et de la miennne, de nombreux scientifiques et acteurs du monde politique ont souligné les succès de l'API, parmi lesquels la mise en place d'au moins 200 projets de recherche internationaux, interdisciplinaires, entièrement dédiés à l'étude des pôles. La première journée au Sénat avait pour sujet « l'Homme et son environnement » et la gouvernance des pôles. M<sup>me</sup> Catherine Bréchnignac, présidente du CNRS, a ouvert les débats avec des interventions remarquées par MM. Philippe Descola, Erik Orsenna, Gérard Jugie, Jean Jouzel et des discours de clôture par M. Michel Rocard, ancien Premier Ministre, et M<sup>me</sup> Valérie Pécresse, ministre de l'Enseignement supérieur et de la recherche. La seconde journée, au Collège de France, rendait compte des avancées scientifiques permises par les différents projets initiés dans le cadre de l'API. Ces progrès concernent la compréhension des modifications de l'environnement physique des zones polaires, particulièrement sensibles au réchauffement climatique actuel ainsi que leurs conséquences multiples sur la biodiversité polaire. Après une introduction par Pierre Corvol, administrateur du Collège de France, rappelant l'engagement de son institution, Claude Lorius (président du comité français de l'Académie des sciences pour l'organisation de la

quatrième API) a retracé l'histoire des API, soulignant les étapes qu'elles ont constituées dans l'avancée de la compréhension des zones polaires. Il a ainsi évoqué son premier voyage en Antarctique en 1956 à la veille de la troisième API, qui a vu la découverte de la magnétosphère, permis l'installation de stations permanentes d'observation en Antarctique avec les premières mesures en continu de la concentration atmosphérique en gaz carbonique (CO<sub>2</sub>). En politique internationale, cet événement a favorisé la signature du traité de l'Antarctique en 1959 faisant de ce continent un espace de paix dédié à la science. Depuis cette date, de nombreux forages au Groenland et en Antarctique ont permis d'étudier l'évolution passée et récente du climat. Ainsi le projet de forage européen en Antarctique (EPICA) dont la France est l'un des principaux partenaires, a révélé qu'au cours des derniers 800 000 ans, les concentrations de CO<sub>2</sub> n'avaient jamais été aussi élevées qu'aujourd'hui. En parallèle à l'augmentation anthropique récente du CO<sub>2</sub>, j'ai rappelé que la température moyenne mondiale a augmenté de 0,5 °C depuis les années 70, mais que cette augmentation est amplifiée dans les zones polaires. Les études sur les climats actuels, passés et futurs montrent que c'est l'Arctique qui sera le plus affecté – avec un réchauffement qui sera du double, voire du triple par rapport au reste du monde. L'amplification polaire a des conséquences importantes notamment sur la banquise. Comme l'ont rappelé Thomas Stocker (professeur à l'université de Berne et co-président du groupe I du GIEC, le Groupe intergouvernemental d'experts sur l'évolution du climat) et Jean-Claude Gascard (directeur de recherche au LOCEAN, Laboratoire d'océanographie et du climat), la banquise se forme chaque hiver de façon saisonnière. Dans la zone arctique, une partie de cette banquise résiste à la fonte estivale en persistant même jusqu'à une dizaine d'années. Cependant, les observations récentes révèlent une diminution de la surface et de l'épaisseur de cette banquise pérenne, avec un recul particulièrement marqué en 2007 et 2008. Le navire Tara, qui s'est laissé prendre dans les glaces arctiques a mis seulement un an pour atteindre le pôle Nord en 2006, alors que le Fram avait mis trois ans pour un trajet similaire en 1894. D'abord « victimes » du changement climatique, les zones polaires en deviendront « actrices » car la disparition de la banquise entraîne une perturbation du bilan radiatif et donc une amplification du réchauffement climatique. L'évolution récente de la banquise arctique est même plus rapide que les pires prévisions envisagées par le GIEC. Une autre conséquence importante de l'amplification polaire est la perte de masse des calottes de glace du Groenland et de l'Antarctique, comme le révèlent les observations des satellites d'altimétrie et de gravimétrie. Enfin, la fonte du permafrost, ou pergélisol, pourrait libérer une grande quantité de carbone, sous la forme de méthane et de gaz carbonique, et ainsi accentuer le réchauffement climatique. L'un des enjeux de cette API est de comprendre et de prévoir l'amplitude de la réponse des régions polaires au changement climatique actuel. Jérôme Chappellaz (directeur de recherche au LGGE, le Laboratoire de glaciologie et géophysique de l'environnement de Grenoble) a rappelé l'apport des différents projets de forages en Antarctique et au Groenland en soulignant la nécessité de collaborations internationales pour leur réussite. L'API a ainsi permis de mettre en

place un projet pour comparer les deux dernières transitions glaciaire-interglaciaire dans l'hémisphère nord. L'API a également permis de fédérer l'ensemble des agences spatiales nationales qui ont contribué à la constitution d'une base de données d'images du Groenland et de l'Antarctique. Comme l'a montré Frédérique Rémy (directrice de recherche au LEGOS, le Laboratoire d'études en géophysique et océanographie spatiales de Toulouse), cette coordination a conduit à la réalisation d'un instantané des zones polaires. M. Rollon Mouchel-Blaisot, préfet des Terres australes et antarctiques françaises, a introduit l'après-midi dédié à la recherche sur la biodiversité mondiale et son évolution récente. Yvon le Maho (directeur de recherche à l'IPHC, l'Institut pluridisciplinaire Hubert Curien de Strasbourg), a illustré les dernières recherches sur les oiseaux marins des zones polaires, avec une attention particulière pour les manchots de Terre Adélie. Françoise Gaill (directrice de l'Institut écologie environnement du CNRS) a dressé le panorama des différentes recherches menées par les équipes françaises, notamment sur les mammifères marins dont les déplacements sont étudiés depuis les îles australes jusque sous la banquise antarctique. Par ailleurs, Michael Stoddart (directeur scientifique de l'*Australian Antarctic Division*) a souligné que près de 9 000 espèces marines sont actuellement recensées en Antarctique, mais que cette énorme biodiversité a subi des évolutions récentes et qu'elle est particulièrement sensible aux conséquences de l'augmentation du CO<sub>2</sub>: le réchauffement, bien sûr, mais aussi l'acidification de l'eau de mer qui modifiera la capacité de nombreux organismes du plancton à former leurs coquilles calcaires. Nigel Yoccoz (université de Tromsø en Norvège) s'est ensuite tourné vers la zone arctique en considérant la végétation et les populations animales vivant sur le continent (des mammifères comme les rennes, les lemmings, les renards roux et polaires ou des oiseaux comme les oies des neiges et les chouettes harfang). La détection des changements environnementaux nécessite une compréhension fine des interactions et compétitions entre espèces dans le cadre de chaînes alimentaires pouvant conduire à des cycles naturels. Les études montrent que ces cycles peuvent être très sensibles aux variations climatiques. Yves Frenot (directeur adjoint de l'IPEV, l'Institut polaire français Paul-Émile Victor) a également évoqué une dégradation de la biodiversité des zones subantarctiques et antarctiques. Parallèlement aux modifications physiques du milieu, plusieurs îles subantarctiques, comme Kerguelen, subissent l'invasion d'espèces « exotiques » apportées volontairement ou fortuitement par l'homme. Cette colonisation a parfois des conséquences dramatiques et irréversibles sur la végétation et la faune originelles. Le tourisme en péninsule antarctique devient également un sujet de préoccupation avec une multiplication par dix des visites au cours de la dernière décennie. Ce tourisme doit être contrôlé car il sera la source de contaminations en espèces végétales ou animales qui n'existent pas encore dans ces régions fragiles. Dans son allocution de clôture, S.A.S. le Prince Albert II de Monaco a rappelé à quel point les régions polaires sont fragiles et requièrent la plus grande attention des scientifiques, des politiques et du public. Le Prince vient d'ailleurs d'effectuer un long voyage qui l'a mené sur plusieurs bases scientifiques du continent antarctique. Quelques extraits de son film ont été montrés en avant-première lors

du colloque. Dans son discours final, M. Jean-Louis Borloo, ministre d'État (ministère de l'Écologie, de l'énergie, du développement durable et de la mer) a partagé ces préoccupations en soulignant l'importance de cette quatrième API dans le renforcement des collaborations internationales et notamment européennes. Les différents exposés du colloque ont montré que nous sommes entrés dans une période cruciale où les changements qui s'opèrent sous l'effet du changement climatique sont rapides et peuvent dans certains cas être irréversibles. Les bénéfices de l'API sont d'ores et déjà visibles et perdureront encore plusieurs années.

### Les séminaires de l'année 2008-2009

En complémentarité avec les 19 cours (à Nouméa, Berne et Woods Hole), 15 séminaires ont été organisés dont la liste est donnée ci-dessous par ordre chronologique.

Dans le cadre du colloque intitulé « le changement climatique et le niveau marin » organisé le 8 août 2008 Auditorium de l'IRD, Anse Vata, Nouméa (Nouvelle Calédonie) en partenariat avec l'Institut de Recherche pour le Développement (IRD) :

- Fabrice COLIN (IRD, directeur du Centre de Nouméa), « Introduction au thème du changement climatique et du niveau marin ».
- Guy CABIOCH (IRD, U.R. « Paléotropique »), « Le développement des récifs coralliens au cours de la dernière déglaciation dans le Sud-Ouest Pacifique ».
- Claude PAYRI (professeur, université de la Polynésie Française et IRD), « Les algues rouges calcaires dans les récifs coralliens, indicateurs de paléoenvironnements ».
- Christophe MAES (IRD, UMR « Legos »), « Importance des effets stériques des couches océaniques dans les variations du niveau moyen de la mer ».

Dans le cadre du symposium des 14 et 15 mai 2009 destiné à clôturer l'Année polaire internationale (API), organisé conjointement par le Collège de France et l'OPECST (Sénat et Assemblée nationale), la journée du 15 mai s'est déroulée au Collège de France et a permis de faire le bilan scientifique de l'API avec la série de séminaires suivants :

- Édouard BARD (Collège de France), « Climat, glaces et océans : quelles évolutions à court et long termes ? ».
- Claude LORIUS (président du comité français de l'Académie des sciences pour l'organisation de la 4<sup>e</sup> année polaire internationale), « AGI-API, 50 ans de recherche ».
- Thomas STOCKER (université de Berne, co-président du groupe I du GIEC, IPCC), « apport de la recherche polaire à l'étude du climat dans le cadre du GIEC ».
- Jérôme CHAPPELLAZ (CNRS, LGGE Grenoble), « Climats polaires et teneurs atmosphériques en gaz à effet de serre ».
- Jean-Claude GASCARD (CNRS, LOCEAN Paris), « Climats polaires et circulation océanique ».
- Frédérique RÉMY (CNRS, LEGOS Toulouse) « calottes de glace et niveau marin ».
- Yvon LE MAHO (CNRS, Institut Pluridisciplinaire Hubert Curien Strasbourg), « Changement global et biodiversité polaire ».
- Françoise GAILL (directrice de l'Institut écologie environnement, INEE-CNRS), « les recherches françaises sur la biodiversité polaire ».
- Michael STODDART (Australian Antarctic Division), « The census of marine life ».
- Nigel YOCCOZ (Université de Tromsø), « Arctique, dynamique des écosystèmes terrestres ».
- Yves FRENOT (directeur adjoint de l'Institut Paul-Emile Victor, IPEV), « Changements climatiques et biodiversité polaire : le cas des régions antarctique et subantarctique ».

### Autres cours et conférences de l'année 2008-2009

Berne, 25-29 août 2008, *Workshop on empirical constraints on sea-level rise over the next century*, organisé par l'Université de Berne, IMAGES et PAGES :

– BARD E., HAMELIN B., DELANGHE D., « Deglacial Melt Water Pulse 1B and Younger Dryas sea levels revisited from new Tahiti onshore boreholes ».

– DESCHAMPS D., DURAND N., BARD E., HAMELIN B., CAMOIN G., THOMAS A.L., HENDERSON G.M., YOKOYAMA Y., « Deglacial Melt Water Pulse 1A revisited from the new IODP Tahiti record ».

– DUTTON A., BARD E., ANTONIOLI F., ESAT T., LAMBECK K., « Sea level reconstructions from submerged speleothems of Argentarola Cave », Italy.

– STANFORD J.D., ROHLING E.J., HUNTER S.E., ROBERTS A.P., RASMUSSEN S.O., BARD E., MCMANUS J., FAIRBANKS R.G., HALL I.R., « Timing of meltwater pulse 1a and climate responses to meltwater injections ».

– THOMAS A.L., HENDERSON G.M., DESCHAMPS P., YOKOYAMA Y., BARD E., HAMELIN B., DURAND N., CAMOIN G., « The timing of Termination II: New constraints from Tahiti ».

Rome, 14-19 septembre 2008, *11th International Conference on Accelerator mass spectrometry* :

– REIMER P.J., BAILLIE M.G.L., BARD E., BAYLISS A., BECK W., BLACKWELL P.G., BUCK C.E., BURR G.S., EDWARDS R.L., FRIEDRICH M., GROOTES P.M., GUILDERSON T.P., HAJDAS I., HOGG A.G., HUGHEN K.A., HEATON T.J., KAISER K.F., KROMER B., MCCORMAC F.G., MANNING S.W., BRONK RAMSEY C., REIMER R.W., RICHARDS D.A., SOUTHON J.R., TAYLOR F.W., TURNEY C.S.M., VAN DER PLICHT J., WEYHENMEYER C.E., « Extension and update of the IntCal04 radiocarbon calibration/comparison back to 55 ka ».

Monaco, 9-10 novembre 2008, conférence co-organisée par la présidence française du conseil de l'union européenne et la principauté de Monaco. L'Arctique : « un observatoire pour relever les défis des changements environnementaux ». Intervenant de la table ronde présidée par S.A.S. Le Prince Albert II et J.-L. Borloo.

Lausanne, 20 novembre 2008, « Hot Day » de l'Université de Lausanne. BARD E., « Réchauffement climatique : certitudes, incertitudes et idées fausses ».

Paris (ENCPB), 27 janvier 2009, Colloque « Quelle éthique face au changement climatique ? Agir en situation d'incertitude ». BARD E. « Changement climatique : certitudes, incertitudes et idées fausses ».

Berne, 31 mars 2009 : *10th Swiss Global Change Day organisé par ProClim (Forum for Climate and Global Change Swiss Academy of Sciences)*. BARD E., « Paleooceanography: a storybook to understand climate change ».

Vienne, 20-24 avril 2009 : *European Geosciences Union General Assembly* :

– BARD E., HAMELIN B., DELANGHE D., « Deglacial Melt Water Pulse 1B and Younger Dryas revisited with new boreholes from Tahiti ».

– BARD E., MÉNOT G., LICARI L., « Radiocarbon calibration-comparison records based on marine sediments from the Pakistan and Iberian Margins ».

– DELAYGUE G., BARD E., « Solar forcing based on Be-10 in Antarctica ice over the past millennium and beyond ».

– DESCHAMPS P., DURAND D., BARD E., HAMELIN B., CAMOIN G., THOMAS A.L., HENDERSON G.M., YOKOYAMA Y., « Synchronicity of Meltwater Pulse 1A and the Bolling onset: New evidence from the IODP "Tahiti Sea-Level" Expedition ».

– FELIS T., ASAMI R., DESCHAMPS P., HATHORNE E.C., KÖLLING M., BARD E., CABIOCH G., DURAND N., CAHYARINI S.Y., PFEIFFER M., « Pronounced interannual variability in tropical Pacific temperatures at the end of the last glacial ».

Bruxelles, 17 juin 2009, Journées Internationales du Groupe Solvay. BARD E., « Studying past climates to see the future ».

Davos, 22-26 juin 2009, *Goldschmidt Conference of the Geochemical Society* :

– BARD E., RICKABY R. « The Role of the Subtropical Front in Long-Term Modulation of the Glacial Mode of the Climate System ».

– ROSTEK F., BARD E., NEUBERT N., NÄGLER T. « Molybdenum Isotopes Record Past Instabilities of the Arabian Sea Oxygen Minimum Zone ».

### Activités de recherches

L'océan peut-il amplifier les changements climatiques ou les réguler ? En collaboration avec Ros Rickaby de l'Université d'Oxford, nous venons d'apporter quelques nouveaux éléments à cette question (Bard & Rickaby, 2009, *Nature*). Nos travaux sont focalisés sur un problème encore débattu, mais fondamental en climatologie : la relation CO<sub>2</sub>-température aux échelles de temps glaciaires-interglaciaires et les rétroactions de l'océan. Nous proposons un mécanisme d'amplification lié à la « route chaude » du retour de la circulation océanique à grande échelle, baptisée abusivement circulation thermohaline mondiale et souvent représentée, pour la simplifier à l'extrême, par un énorme « tapis roulant » connectant les différents bassins profonds des océans Atlantique, Indien et Pacifique.

Pour ce faire, nous avons étudié le rôle de la variabilité spatio-temporelle du courant des Aiguilles et de ses dépendances (rétroflexion et tourbillons), notamment le courant marin d'eaux chaudes et salées qui passent en surface de l'océan Indien à l'océan Atlantique, au sud de l'Afrique. Il s'agit d'un phénomène océanographique assez complexe, qui prend sa source dans le détroit du Mozambique, entre Madagascar et le continent africain. Dans cette région, un courant chaud de surface, le courant des Aiguilles – analogue au Gulf Stream ou au Kuroshio dans le Pacifique – descend vers le sud le long des côtes de l'Afrique. Pour l'essentiel, il repart vers l'Est un peu au sud de Madagascar (courant de rétroflexion). Mais une partie s'échappe vers l'ouest en se manifestant par des tourbillons, ou anneaux, d'eaux chaudes et salées qui passent le cap de Bonne Espérance et viennent se mêler aux eaux de surface de l'Atlantique Sud. Cette « route chaude » est étudiée aujourd'hui par les satellites qui observent la topographie de l'océan, ainsi que ceux qui regardent la « couleur » des eaux de surface pour en déduire leur température (IR) ou leur teneur en chlorophylle.

L'ouverture ou la fermeture de cette véritable « porte » des Aiguilles est liée à la position en latitude du front subtropical et des vents d'Ouest (« quarantièmes rugissants »). Nos travaux expliqueraient pourquoi certaines périodes glaciaires détiennent les records de froids et de volume de glaces. Pour en arriver à cette conclusion, nous avons utilisé de nombreuses données paléocéanographiques, permettant de reconstituer l'évolution des courants marins, de la productivité

biologique (la richesse en plancton des eaux de surface) et de l'hydrologie de cette région de l'Océan, en liaison avec les glaciations des 800 000 dernières années. Nos arguments sont fondés sur les enregistrements géochimiques d'une carotte de sédiments marins située stratégiquement dans le courant des Aiguilles juste avant la « fuite » vers l'Atlantique et la rétroflexion vers l'océan Indien. Cette carotte a été collectée par le Marion-Dufresne, navire de l'Institut polaire français, équipé du plus puissant carottier du monde. Les analyses physicochimiques ont été réalisées au CEREGE d'Aix-en-Provence et à Oxford. Les signaux de température, de productivité et de mélange Atlantique-Pacifique indiquent clairement que la « route chaude » a subi de grandes variations. Pendant les deux périodes glaciaires les plus froides (*Marine Isotope Stages* 12 et 10), la porte des Aiguilles était pratiquement fermée en raison d'un déplacement de 7° vers le nord du front subtropical, renvoyant le courant en totalité dans l'océan Indien, et affaiblissant la circulation océanique profonde et l'arrivée d'eaux chaudes au nord de l'Europe. Cette modulation océanographique expliquerait l'intensité particulière du climat global de ces époques.

Le courant des Aiguilles et la « route chaude » ont manifestement joué un rôle climatique dans le passé. Ces phénomènes pourraient aussi intervenir dans le climat futur qui sera marqué pour l'essentiel par le réchauffement climatique provoqué par nos émissions de gaz à effet de serre. En effet, les mécanismes que nous étudions fonctionnent aussi dans l'autre sens, c'est-à-dire en réponse à une migration vers le Pôle Sud des vents d'ouest et du front subtropical. Une telle migration est observée actuellement et devrait se renforcer dans le futur. Les modèles numériques montrent qu'une migration vers le sud par rapport à la situation actuelle, induira un renforcement de la « fuite » des Aiguilles et donc un renforcement de la circulation profonde Atlantique.

Cet effet contribuera donc à renforcer la circulation profonde Atlantique, même si au nord de l'Atlantique d'autres forçages auront une tendance inverse. En effet, la circulation profonde sera aussi perturbée par le réchauffement, car les changements conjugués de la température et du cycle de l'eau seront de nature à diminuer la densité des eaux de surface de l'Atlantique Nord, donc la plongée dans les zones de convection profonde. Les modèles couplés océan-atmosphère perturbés par les gaz à effet de serre répondent généralement par une diminution progressive de l'intensité de la circulation profonde. Il est possible que les mécanismes que nous étudions soient à l'origine de certains désaccords entre les différentes réponses des modèles. Il faut donc faire un effort de diagnostic en comparant les simulations, mais aussi apporter des améliorations significatives aux modèles qui doivent réellement simuler les tourbillons et pas seulement paramétriser un transport total.

Le réchauffement induirait donc une migration vers le Pôle Sud du front subtropical et une intensification de la route chaude, ce qui contribuerait à alimenter l'arrivée d'eaux chaudes vers l'Atlantique nord et, en réaction, la plongée d'eaux de surface vers les profondeurs dans les mers nordiques. Le risque de voir la circulation océanique profonde s'affaiblir serait donc moindre. Si les conséquences

en termes de climat régional (précipitations sur l'Afrique notamment) ou sur la productivité de cette région de l'océan (très riche en poissons le long des côtes namibiennes) sont encore imprévisibles, nos recherches mettent en évidence une rétroaction océanographique négative (donc stabilisante).

Notre proposition a reçu un appui observationnel alors même que notre article était en phase de revue par les pairs. Le laboratoire d'océanographie de l'université du Cap vient de publier un article sur la variabilité récente du Courant des Aiguilles (Rouault *et al.*, 2009, *GRL*). Cette étude d'océanographie satellitale, instrumentale et de modélisation numérique indique clairement que le courant des Aiguilles s'est réchauffé depuis les années 80 et que la « fuite » vers l'Atlantique a même augmenté chaque décennie d'environ quatre millions de mètres cubes par seconde.

Comme pour la variabilité observée récemment en Atlantique Nord, il est encore difficile de savoir s'il s'agit d'une fluctuation cyclique naturelle, ou si nous voyons dans cette zone des activités humaines. Il faut noter que la tendance actuelle des vents d'Ouest est attribuée d'abord à la baisse d'ozone au niveau du pôle sud. Néanmoins, les modèles climatiques montrent que le réchauffement lié aux autres gaz à effet de serre aura aussi une influence dans le même sens avec une migration vers le sud de vents d'ouest et du front subtropical.

L'effet de stabilisation de la « porte » des Aiguilles est-elle une bonne ou une mauvaise nouvelle dans le contexte actuel de réchauffement mondial qui devrait se poursuivre en toute logique ? Certains pourraient y voir une influence défavorable car une diminution de la circulation profonde de l'Atlantique pourrait contribuer à refroidir certaines régions de l'hémisphère Nord. En fait, le problème est plus compliqué qu'il n'y paraît :

Même si les modèles climatiques répondent de façon similaire par une diminution de l'intensité de la circulation profonde, il n'y a pas de consensus sur l'amplitude de cette diminution qui varie de 10 à 50 % après un siècle. De plus, il n'est pas complètement exclu qu'à partir d'un certain seuil, la circulation bascule dans un autre état stable où elle serait encore plus affaiblie. D'après les modèles, on n'atteindrait pas ce seuil avant plusieurs siècles. Mais tout dépend de l'intensité de la perturbation anthropique et du degré de réalisme du modèle (notamment de la modélisation de la calotte du Groenland). À l'échelle du siècle, si l'on ne passe pas ce seuil, le seul effet sera un réchauffement moindre dans la région du nord de l'Atlantique. Mais si l'on atteint un point de bifurcation, alors on pourrait assister, dans une Terre globalement plus chaude, à un refroidissement localisé sur l'Atlantique Nord.

On pourrait donc voir cela d'un bon oeil si l'on habite proche de cette zone géographique, mais un tel événement aurait des répercussions tellement néfastes dans des zones plus éloignées (sur les températures et les précipitations ainsi que sur le pompage du CO<sub>2</sub> par l'océan) que l'on peut encore considérer que la stabilisation de la circulation profonde est plutôt une bonne nouvelle pour le climat de notre planète.

## PUBLICATIONS

## 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 Bolling–Allerod 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.

BARD E., HAMELIN B., DELANGHE-SABATIER D., « Deglacial meltwater pulse 1B and Younger Dryas sea-levels revisited with boreholes at Tahiti », *Science*, sous presse.

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., ERIŞ 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 ; DOI : 10.1038/NGEO470.

KÖLLING M., WEBSTER J.M., CAMOIN G., IRYU Y., BARD E., SEARD 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., TACHIKAWA K., BARD E., « ITCZ rather than ENSO signature for abrupt climatic changes across the tropical Pacific ? », *Quaternary Research*, 72, 2009, 123-131.

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, PA3204, 2009, 1-14 ; DOI : 10.1029/2008PA001701.

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.

SAHER M.H., ROSTEK F., JUNG S.J.A., BARD E., SCHNEIDER R.R., GREAVES M., GANSSSEN 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, 1-12 ; PA2212, DOI : 10.1029/2007PA001557.

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., 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.

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.

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.

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.

WÆLBROECK 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., PISIAS N.G., RADI T., ROCHON A., ROHLING E.J., SBAFFI 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.

## 2008

BARD E., DELAYGUE G., *Comment on* « Are there connections between the Earth's magnetic field and climate? » by Courtillot *et al.* (2007), *Earth and Planetary Science Letters*, 265, 2008, 302-307.

ERIS K.K., RYAN W.B.F., CAGATAY M.N., LERICOLAIS G., SANCAR U., MENOT G., BARD E., *Reply to Comment on* « The timing and evolution of the post-glacial transgression across the Sea of Marmara shelf, south of Istanbul » by Hiscott *et al.*, *Marine Geology*, 254, 2008, 230-236.

TACHIKAWA K., SÉPULCRE S., TOYOFUKU T., BARD E., « Assessing influence of diagenetic carbonate dissolution on planktonic foraminiferal Mg/Ca in the South-eastern Arabian Sea over the past 450 k years: Comparison between *Globigerinoides ruber* and *Globigerinoides sacculifer* », *Geochemistry Geophysics Geosystems* (G-cubed), 9 (4), Q04037, 2008, 1-16 ; DOI : 10.1029/2007GC001904.

## Textes divers (vulgarisation, chapitre de livre, préface, principales interviews)

BARD E., « Changement climatique : certitudes, incertitudes et idées fausses » in *Ethique et changement climatique*, éditions Le Pommier, 2009, 59-79.

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

GAUDIN C., BARD E. (sous la direction de), *Clôture de la 4<sup>e</sup> année polaire internationale*, Rapport de l'OPECST, Presses du Sénat et de l'Assemblée Nationale, 2009, 219 pp.

**Responsabilités diverses**

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

Président du conseil du laboratoire NOSAMS de la Woods-Hole Oceanographic Institution (États-Unis).

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. Jupé et M. Rocard (août à décembre 2009).

**Distinctions**

2008, membre d'honneur du Comité national français de l'INQUA.

2009, *Oeschger Lectures*, Université de Berne (Oeschger Centre for Climate Change Research).

2009, *Certificate of Appreciation* de la World Meteorological Organization (WMO) and International Council for Science (ICSU).

2009, élu Membre de l'Académie de l'Europe (*Academia Europaea*).