

Évolution du climat et de l'océan

M. Édouard BARD, professeur

Histoire du climat des premiers âges de la Terre à l'ère Tertiaire

Le cours de cette année a été consacré à l'histoire du climat de la Terre depuis ses origines, tout du moins depuis les premiers dépôts permettant de remonter aux conditions environnementales des époques les plus reculées. Ces premières informations quantifiées débutent avec la période de l'Archéen pendant laquelle notre planète devient habitable. L'Archéen commence avec les plus vieilles roches connues qui ont été datées à plus de 3,6 Milliards d'années (Ga) par la méthode uranium-plomb. Le plus vieil objet est actuellement un zircon détritique de Jack Hills, Australie, daté à 4,4 Ga et possédant des inclusions de quartz ce qui suggère l'existence de granitoïde, donc de croûte continentale dès cette époque. Les données géologiques confirment la présence d'eau liquide dès le début de l'Archéen. Ces informations viennent en particulier des formations archéennes du sud du Groenland incluant les plus vieilles roches sédimentaires siliceuses et roches volcaniques, avec notamment des structures de « laves en coussins » qui démontrent la présence d'eau liquide dès ces époques. Les cherts, formés de silice microcristalline, sont un autre type de roche sédimentaire dont l'analyse des isotopes de l'oxygène permet de remonter à leur paléotempérature de formation. Les données isotopiques suggèrent que l'océan Archéen était chaud (> 50 °C) ce que sembleraient confirmer de nouvelles données sur les isotopes du silicium mesurés dans les mêmes cherts.

Ces conditions environnementales sont assez étonnantes car pendant l'Archéen, l'éclairement solaire était beaucoup plus faible qu'aujourd'hui, ce qui aurait dû conduire à une Terre gelée. En effet, selon les modèles astrophysiques, le diamètre et la luminosité du Soleil ont augmenté au cours de son histoire et l'éclairement à l'Archéen était plus faible d'environ 20-30 %. Ce problème classique est appelé le Paradoxe du Soleil Faible. En considérant les conditions sur les autres planètes du système solaire, Sagan & Mullen ont émis l'hypothèse que ce déficit solaire, incompatible avec la présence d'eau liquide sur Terre, avait dû être compensé par un effet de serre très supérieur à celui de l'atmosphère actuelle.

La teneur en CO_2 à ces époques est mal connue, mais certains auteurs pensent que l'absence de sidérite (FeCO_3) dans les paléosols permettrait de placer une borne supérieure à cette pression de CO_2 ($< 100 \times$ la pression actuelle). L'explication proposée est que, dès cette époque, le CO_2 atmosphérique aurait été partiellement piégé par l'altération chimique des roches silicatées. D'autres auteurs ont émis l'hypothèse que c'est en fait le méthane qui dominait l'effet de serre pendant l'Archéen. Contrairement aux conditions actuelles, le CH_4 devait être stable dans cette atmosphère dépourvue d'oxygène (avec un temps de résidence $\approx 10\,000$ ans). La synthèse du CH_4 devait être réalisée par des procaryotes anciens, des archéobactéries adaptées à la vie en anaérobiose. Néanmoins, il devait aussi y avoir une limite à l'effet de serre du CH_4 : lorsque la pression en est trop forte des aérosols organiques peuvent se former augmentant ainsi l'albédo terrestre (brume d'hydrocarbures comme sur Titan, satellite de Saturne). Des calculs quantitatifs, encore très hypothétiques, montrent que les conditions clémentes de l'Archéen peuvent s'expliquer par une combinaison de l'effet de serre des deux gaz CO_2 et CH_4 ainsi que la rétroaction climatique de la vapeur d'eau.

Plusieurs indicateurs suggèrent que la teneur en oxygène de l'air était faible à l'Archéen ($< 1\%$ de la pression actuelle). On peut citer les dépôts des fers rubanés (BIF : Banded Iron Formation) ainsi que les gisements d'uranium détritique qui n'auraient pu être préservés en atmosphère oxydante. Plus récemment, l'étude de la composition isotopique du soufre des roches archéennes est venue conforter l'hypothèse d'une atmosphère anoxique. À l'époque, la présence d'espèces oxydées et réduites du soufre dans l'atmosphère a permis l'enregistrement de fractionnements isotopiques « exotiques » (MIF pour mass independant fractionation) produits par certaines réactions photochimiques. Comme le montrent les variations de ces différents indicateurs géochimiques, la période de l'Archéen se termine vers 2,3 Ga avec une augmentation rapide de la teneur atmosphérique en oxygène issu de la photosynthèse par les cyanobactéries. La preuve du développement d'organismes photosynthétiques pendant la deuxième moitié de l'Archéen provient de nombreux fossiles (ex. restes microscopiques et macroscopiques comme les stromatolithes) ainsi que de marqueurs géochimiques moléculaires et isotopiques (rapport $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$). Une période de temps relativement longue a donc été nécessaire pour que l'oxygène de la photosynthèse réagisse avec les roches et les gaz volcaniques. Après cette longue phase transitoire, l'oxygène a pu rester à l'état libre dans l'atmosphère.

La période du Protérozoïque qui fait suite à l'Archéen, est caractérisée par des conditions environnementales clémentes entrecoupées de phases glaciaires très intenses, en particulier durant le dernier milliard d'années (Néoprotérozoïque). Des relevés géologiques abondants permettent de cartographier la distribution à l'échelle mondiale des dépôts glaciaires (ex. des tillites) et glacio-marins pour les épisodes du Sturtien $\approx 720\text{-}700$ Ma, du Marinoen $\approx 660\text{-}635$ Ma, de l'Édiacarien $\approx 635\text{-}542$ Ma. De larges variations du rapport $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ suggèrent l'occurrence de diminutions drastiques de la production et de l'accumulation de matière organique d'origine marine. Il est difficile d'évaluer la durée des phases glaciaires

extrêmes. Une estimation de 3 à 12 Ma pour le Marinoen du Congo a pu être proposée en supposant un flux constant d'iridium d'origine extraterrestre.

Les formations néoprotérozoïques glacio-marines, sont étroitement associées à des dépôts rubanés de fer. Ces roches indiquent que, pendant les phases glaciaires, l'océan était anoxique et chargé en ions ferreux solubles (Fe^{2+}) qui ont rapidement précipité sous forme d'oxy-hydroxydes de fer lors des phases de réchauffement (fonte de la glace de mer et ré-oxygénation de l'océan par diffusion de l'air atmosphérique). Un troisième type de formation géologique, une dalle de carbonates (cap-carbonate) vient généralement recouvrir les sédiments glacio-marins néoprotérozoïques. L'étude du magnétisme des roches permet d'estimer l'inclinaison et donc la paléo-latitude de ces différents dépôts. Les données paléomagnétiques indiquent que les calottes de glace devaient descendre jusqu'au niveau de la mer des basses latitudes.

Plusieurs hypothèses ont été émises pour tenter d'expliquer l'intensité et l'extension spatiale des glaciations néoprotérozoïques. Une contribution est probablement liée à la géodynamique responsable d'une configuration paléogéographique particulière. En effet, la période entre 800 et 750 Ma correspond à la fragmentation du supercontinent Rodinia et à la dispersion de continents plus petits aux basses et moyennes latitudes. L'hypothèse d'une Terre couchée sur son orbite (obliquité de l'orbite de 60 et 90 degrés) a été avancée pour expliquer les glaciations tropicales, mais cette explication est incompatible avec des observations et des considérations d'ordre astronomique. L'hypothèse retenue actuellement est celle d'une Terre qui aurait complètement gelé en surface à cause de la rétroaction positive de l'albédo de la glace.

Cette théorie de la « snowball » peut être résumée par la succession de plusieurs phases. Les précipitations ont entraîné une intense altération chimique des roches des continents dispersés aux basses latitudes. Ces réactions chimiques ont conduit à une diminution drastique du stock de CO_2 atmosphérique. L'extension de la couverture de neige et de glace a conduit à une augmentation de l'albédo terrestre, constituant une rétroaction puissante ayant probablement conduit à la glaciation comme le suggèrent les exercices de modélisation numérique. D'autres rétroactions positives ont peut-être amplifié la perturbation du cycle du carbone (par ex. la baisse du niveau marin et l'absence de plancton à squelettes calcaires). Pendant la phase glaciaire, les basses températures extrêmes (-50°C) et l'englacement total auraient entraîné une quasi-absence de précipitations et donc pas d'altération chimique des roches. Néanmoins, le volcanisme injectait toujours du CO_2 dans l'atmosphère, ce qui à terme, a pu faire fondre les glaces des basses latitudes. L'absence des puits de carbone aurait conduit à un emballement de l'effet de serre. Lors de cette phase climatique surchauffée ($+50^\circ\text{C}$), l'érosion chimique aurait été particulièrement intense avec un énorme flux d'ions bicarbonates vers l'océan et une précipitation de la dalle de carbonates.

Les archives paléontologiques et géochimiques montrent que, malgré leur intensité, les glaciations du Protérozoïque n'ont pas éradiqué la vie sur Terre. En effet, des organismes eucaryotes ont vécu avant et après les glaciations globales. Même dans le cas d'un englacement total, des organismes devaient pouvoir vivre au niveau des fractures de la glace et des zones hydrothermales. Certains pensent que les glaciations protérozoïques ont même joué un rôle moteur dans l'évolution et la diversification des métazoaires. Une véritable « explosion » biologique a même succédé au Néoprotérozoïque.

Après les premières centaines de millions d'années de la période du Paléozoïque, le climat terrestre a connu une phase glaciaire particulièrement longue à la fin du Carbonifère et au début du Permien (de 350 à 280 Ma). À cette époque les continents sont regroupés avec notamment le supercontinent de Gondwana en position polaire australe. Les dépôts glaciaires fossiles (tillites) indiquent que les calottes étaient confinées aux hautes latitudes. Des enregistrements paléoclimatiques ont été obtenus à partir de nombreuses mesures du rapport $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ de coquilles de mollusques (brachiopodes) et de végétaux fossiles, illustrant un changement thermique majeur.

La compilation des mesures du rapport $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ indique que l'accumulation de la matière organique a augmenté de façon drastique pendant le Carbonifère. Le période permo-carbonifère correspond d'ailleurs à un maximum d'abondance des carbones fossiles (charbon, pétrole, gaz). Les arbres constituaient un aspect majeur du paysage avec des lycopodes géantes (*Lepidodendron* et *Sigillaria*), des prêles géantes (*Calamites*) et des fougères arborescentes. Des fossiles de lycopodes bien conservés ont permis d'évaluer la teneur en CO_2 atmosphérique à partir de l'abondance de leurs stomates. Ces données sont compatibles avec les modélisations du cycle du carbone utilisant les mesures $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ des mollusques et indiquent une teneur en CO_2 atmosphérique proche de l'actuelle pendant la longue phase glaciaire permo-carbonifère. Celle-ci a été suivie par une nette amélioration climatique à partir du Permien Moyen. De nombreuses données géologiques et paléontologiques permettent de reconstituer une distribution mondiale de biomes climatiques. L'extension du supercontinent de la Pangée a entraîné une forte continentalité en son centre, mais les observations indiquent aussi un faible gradient thermique en latitude. Des modèles numériques de l'atmosphère ont été utilisés pour simuler le climat de cette époque, le principal problème étant que les modèles exagèrent beaucoup ce gradient latitudinal de température. Des améliorations importantes viendront peut-être d'une meilleure prise en compte de la topographie (ex. sensibilité à l'altitude de la chaîne des Appalaches) et à un couplage avec un modèle océanique (hypothèse des courants polaires participant à la répartition de l'excès tropical de chaleur).

Au début de l'ère Mésozoïque (237 Ma), la Pangée est encore unie, mais ce supercontinent va évoluer vers un état très fragmenté au Crétacé Supérieur. Cette évolution paléogéographique a eu des effets importants sur le climat de l'ère secondaire, en raison principalement de la différence de chaleur massique et

d'albédo entre les océans et les continents. Les observations géologiques permettent de mettre en évidence des variations à long terme du niveau marin global (jusqu'à 100 à 200 m au-dessus du niveau actuel), en réponse à des changements de volume des bassins océaniques et à la disparition des calottes polaires au Jurassique-Crétacé.

Pour ces périodes, de nombreux restes paléontologiques permettent d'étudier la répartition géographique des organismes biologiques, d'animaux et de végétaux. Emblématiques de cette époque, les dinosaures sont présents depuis les basses jusqu'aux plus hautes latitudes. On remarque même la présence d'organismes caractéristiques de zones chaudes, mais vivant au-delà du cercle polaire arctique (« arbre à pain », *Artocarpus* du Cénomaniens ou le « crocodile », *Champsosaurus*, du Turonien). Plus généralement, les biomes de climats tempérés se rencontrent à hautes latitudes. L'analyse de composés organiques synthétisés par certaines archéobactéries permet de remonter à des paléotempératures de plus de 15 °C pour l'océan Arctique.

Des sédiments du Mésozoïque sont encore préservés au fond des océans actuels et peuvent être étudiés à partir de forages profonds (programmes DSDP, ODP et IODP). Les géochimistes effectuent des analyses élémentaires (Mg/Ca) et isotopiques ($^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$) sur les squelettes calcaires du plancton, en particulier les foraminifères. Les données récentes obtenues sur des échantillons exceptionnellement bien préservés (« glassy foraminifera ») indiquent que la température des océans de surface aurait atteint un maximum (30-35 °C) au cours de l'épisode Turonien (90 Ma). Les observations indiquent aussi que le climat crétaïc était plus chaud et moins contrasté en latitude que le climat actuel. Néanmoins, cet optimum thermique ne veut pas dire que le climat du Crétacé était absolument stable. En effet, des instabilités notables, les événements anoxiques globaux, ont eu lieu à plusieurs reprises (ex. de l'événement de Bonarelli vers 93 Ma). Ces perturbations globales se caractérisent par des dépôts très riches en matière organique marine. De tels changements du cycle du carbone sont probablement liés à une augmentation de la productivité planctonique primaire qui serait elle-même une conséquence des températures extrêmes.

Les reconstitutions de la pCO_2 atmosphérique indiquent des teneurs allant de 1 000 à 2 000 ppm au Crétacé. Il subsiste encore de grandes incertitudes sur les données : les valeurs passent du simple au double en tenant compte des erreurs analytiques et des biais des différentes méthodes utilisées (stomates, compositions isotopiques du phytoplancton et des carbonates pédogéniques, isotopes du bore des foraminifères). L'hypothèse retenue pour expliquer ces importantes teneurs en CO_2 est l'influence prépondérante du flux magmatique (super-panaches et formation des plateaux volcaniques comme celui des Kerguelen).

L'utilisation de modèles numériques permet de mieux comprendre les effets respectifs du dioxyde de carbone atmosphérique et de la géographie des continents. Au Jurassique, ces derniers se répartissent en une Pangée partiellement

divisée en Gondwana et Laurasia que sépare un bassin océanique important, la Mer Téthys. Un cycle saisonnier contrasté entraînait la formation d'une énorme dépression continentale sur l'hémisphère nord en été et sur l'hémisphère sud en hiver. L'intense évaporation au niveau de la Téthys conduisait à des phénomènes de mousson très marqués arrosant abondamment les côtes nord du Gondwana et sud de Laurasia. Par contre, l'intérieur des deux masses continentales était occupé par des zones désertiques.

La comparaison des biomes observés avec les simulations n'est satisfaisante qu'au premier ordre. En particulier, le contraste méridien simulé est trop important et les modèles n'arrivent pas à restituer l'homogénéité du climat de l'époque (simulant trop de déserts ou de la toundra au nord). Des tests de sensibilité montrent que le contraste méridien est relativement indépendant de la teneur en CO₂. Par contre, la dislocation continentale semble primordiale, avec un effet majeur sur le contraste saisonnier. La comparaison des simulations à 115 Ma et 70 Ma suggère que la fragmentation continentale peut faire varier la température mondiale de 4 °C. La prise en compte de la végétation et de ses effets sur l'albédo et le cycle de l'eau peut aussi induire une augmentation des températures de 2 °C à l'échelle planétaire. La modélisation de la circulation océanique est le sujet de recherches actuelles. Les premiers résultats suggèrent l'existence de maxima subtropicaux de la salinité de surface, qui aurait pu conduire à une circulation profonde inversée (« halothermique ») avec des eaux chaudes et salées qui plongeraient aux latitudes subtropicales. L'utilisation d'un modèle tridimensionnel de l'océan suggère la présence de convection profonde dans la zone australe. La modélisation confirme aussi que la dislocation continentale (séparation Afrique-Amérique du Sud) a eu un effet majeur sur la circulation de surface de l'Océan Atlantique, conduisant à un réchauffement de surface et à une baisse de la salinité tropicale de cet océan.

Au début de l'ère Cénozoïque, la paléogéographie mondiale devient assez similaire à celle d'aujourd'hui. Des différences importantes subsistent néanmoins : la plaque indienne était séparée de l'Asie, l'Amérique du Nord et l'Europe étaient liées, des communications marines existaient aux niveaux de Panama et du Proche-Orient alors que d'autres étaient restreintes comme le Passage de Drake et celui existant entre les continents australien et antarctique.

Différentes archives permettent d'analyser le climat cénozoïque, en particulier les carottages des sédiments océaniques qui ont permis d'obtenir un enregistrement continu du rapport ¹⁸O/¹⁶O des foraminifères benthiques. La période du début de l'Éocène (55-45 Ma) correspond à un optimum thermique avec des températures de l'océan profond supérieures à 10 °C. De plus, un maximum de température de courte durée a eu lieu à la limite entre le Paléocène et l'Éocène (PETM = Paleocene-Éocene Thermal Maximum). Le PETM correspond à un réchauffement généralisé des eaux profondes (4-6 °C) et de surface (de 4 à 8 °C). Une étude récente de sédiments de la Ride de Lomonosov a permis d'évaluer le réchauffement de la zone arctique. L'analyse moléculaire suggère une tempéra-

ture tout à fait inhabituelle pour cette zone ($> 20\text{ }^{\circ}\text{C}$) ce que confirme la présence d'espèces tropicales du phytoplancton.

Le réchauffement du PETM s'accompagne d'une perturbation majeure du cycle du carbone enregistrée dans l'océan et sur les continents sous la forme d'une diminution du rapport $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$. Une analyse fine de la variabilité océanique de ce rapport isotopique permet de mettre en évidence une inversion du gradient nord-sud qui correspondrait à un renversement de la circulation océanique profonde. En parallèle à l'anomalie des isotopes du carbone, on observe une dissolution généralisée des sédiments carbonatés aux profondeurs moyennes et profondes. Cette dissolution est plus marquée et dure plus longtemps à grande profondeur. Les deux phénomènes géochimiques peuvent s'expliquer par une injection rapide d'une énorme quantité de CO_2 ayant une composition isotopique appauvrie en ^{13}C . Le PETM correspond aussi à une crise biologique majeure (ex. végétation nord-américaine) et à une expansion de la faune de mammifères « modernes » (ongulés et primates) en Europe et en Amérique du Nord. Pendant l'optimum thermique de l'Éocène, des reptiles, crocodiles et tortues vivaient jusqu'aux plus hautes latitudes.

L'hypothèse la plus en vogue pour expliquer l'anomalie du PETM est celle d'une augmentation de l'effet de serre liée à une énorme injection de méthane dans l'atmosphère. Ce dégazage serait dû à la déstabilisation thermique des clathrates contenus dans les sédiments marins. Ces hydrates de méthane sont localisés dans les sédiments sur les marges continentales à moyenne profondeur. Des observations géologiques viennent à l'appui de cette hypothèse : l'étude de la ride sédimentaire de Blake au large de la Floride à l'aide de l'imagerie géophysique et de l'étude de la fabrique sédimentaire montre des figures sédimentaires caractéristiques constituant la trace physique du relargage de méthane.

Des calculs de bilan de masse du cycle du carbone ($^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ et dissolution) indiquent que l'anomalie pourrait être expliquée par la déstabilisation thermique de $2,10^{12}$ tonnes de CH_4 sur une période d'une dizaine de milliers d'années. Des modèles numériques du climat ont été utilisés pour étudier la réponse atmosphérique à une telle perturbation. Le méthane s'oxydant rapidement, les simulations climatiques conduisent à un réchauffement trop faible par rapport aux observations paléoclimatiques. Il semble donc nécessaire d'invoquer des causes supplémentaires, en particulier d'autres sources de carbone pour perturber l'effet de serre (par ex. l'oxydation de matière organique continentale ou marine).

Même si l'anomalie thermique semble pouvoir être liée à une perturbation du cycle du carbone, de nombreuses questions se posent encore au sujet des causes ultimes de ces changements globaux, en particulier celles qui ont déstabilisé les hydrates sédimentaires. Plusieurs mécanismes déclencheurs et amplificateurs du réchauffement ont été proposés et font l'objet de recherches et de débats intenses : seuil de fonctionnement de la circulation profonde, impact d'une météorite, acti-

tivité volcanique, métamorphisme de contact de roches carbonées, combustion de tourbières ou oxydation de sédiments épicontinentaux.

Pour compléter le cours sur l'histoire du climat, un colloque de séminaires a été consacré aux derniers développements des modèles numériques utilisés pour des simulations climatiques longues.

La prévision climatique n'est pas fondée sur de simples considérations historiques car les nombreux paramètres du système climatique ne se reproduisent jamais à l'identique. L'approche la plus fructueuse est de comprendre quantitativement les variations observées, en les simulant à l'aide de modèles numériques incluant toute la compréhension physique, chimique et biologique dont on dispose actuellement. Les échanges entre les paléoclimatologues et les modélisateurs de l'atmosphère ont progressivement conduit à la prise en compte des autres compartiments du système climatique comme l'océan, les glaces, la biosphère, les sols et les cycles biogéochimiques fondamentaux. Les modèles numériques sont les seuls outils permettant de prévoir les changements du climat, ainsi que d'évaluer les mesures de prévention de ces changements. Associés aux mesures climatiques, ainsi qu'aux reconstitutions des conditions passées, ils permettent également d'améliorer notre compréhension des mécanismes du climat.

L'approche numérique peut sembler mystérieuse, mais il est impossible de faire autrement car il n'est pas possible de construire une Terre miniature, avec toutes ses interactions climatiques, sur laquelle on puisse tester les hypothèses. Les modèles mathématiques simplifient obligatoirement le fonctionnement de la machine climatique. C'est vrai en particulier pour tous les processus de petite échelle dont la dynamique ne peut pas être représentée de façon explicite. Par ailleurs, les phénomènes biologiques sont simulés par des lois empiriques et statistiques car il n'est évidemment pas possible de représenter chaque organisme individuellement. Néanmoins, ces différentes approximations ont fait l'objet d'améliorations récentes en comparant les calculs avec les observations de l'environnement actuel.

Les exigences sur ces modèles ne cessent de croître et de se diversifier. D'une part, les prévisions devraient être fournies à l'échelle régionale, ce qui nécessite d'augmenter la résolution spatiale des modèles. D'autre part, les modèles devraient être plus réalistes. Ce réalisme correspond à prendre en compte certaines composantes du système climatique, comme la végétation, le cycle du carbone, ou bien certains phénomènes physiques, comme la formation des nuages. Également, la durée des simulations devrait être allongée. Enfin, la fiabilité de ces prévisions devrait être améliorée, ce qui nécessite la répétition des simulations afin d'avoir un point de vue statistique sur l'évolution climatique.

Les outils privilégiés pour ces prévisions sont les modèles dits de circulation générale, couplant au moins l'atmosphère à l'océan (en anglais : AOGCM pour *Atmosphere-Ocean General Circulation Model*). Ces modèles décrivent les mécanismes physiques du climat de la manière la plus détaillée, avec une résolution

spatiale très fine. Mais les exigences évoquées précédemment se traduisant chacune par une augmentation du nombre d'opérations mathématiques, elles sont limitées par la capacité de calcul des ordinateurs.

D'autres types de modèles climatiques sont utilisés de façon complémentaire. Certains sont extrêmement simplifiés incluant seulement quelques réservoirs homogènes. Ils permettent d'avoir une vision globale sur différents mécanismes climatiques. D'autres essaient d'intégrer le maximum de composantes du climat, comme l'océan, la végétation et le cycle du carbone, la banquise et les calottes de glace continentales. Ces modèles sont dits de « complexité intermédiaire » (en anglais : EMIC pour *Earth Model of Intermediate Complexity*), car ils se situent entre les modèles simples et les modèles de circulation générale. Leur résolution spatiale et le détail des mécanismes sont encore limités. Mais ces faiblesses sont compensées par la diversité des composantes climatiques prises en compte (voir la figure) et par leur rapidité d'exécution. Ces deux qualités expliquent l'intérêt qu'ils suscitent, tant pour tester de nouveaux mécanismes climatiques, que pour réaliser de longues simulations (plusieurs siècles au minimum), ou encore pour répéter et comparer les simulations (plusieurs centaines de répétitions).

Le colloque de séminaires consacré aux EMICs a réuni au Collège de France quelques-uns des meilleurs spécialistes mondiaux de ce type de modèle, invités par la Chaire de l'évolution du climat et de l'océan. Le colloque était organisé en collaboration avec André Berger de l'Université Catholique de Louvain, où a été développé un des tout premiers EMICs.

J'ai d'abord montré ce que les archives climatiques nous apprennent sur la variabilité dite « rapide », correspondant à des variations abruptes du climat en quelques décennies, caractéristiques des périodes glaciaires. Ces variations climatiques, refroidissements et réchauffements, ont été fortement ressenties aux moyennes et hautes latitudes, spécialement dans l'Atlantique nord. Elles seraient liées à la formation d'eau profonde nord atlantique, mécanisme très sensible aux conditions hydrologiques de surface, et associé au transfert de chaleur des basses vers les hautes latitudes. Mais les enregistrements sédimentaires obtenus par l'équipe du Collège de France dans les Océans Indien et Pacifique indiquent que ces variations ont également modifié le cycle hydrologique et la circulation océanique aux basses latitudes, avec des répercussions sur des cycles biogéochimiques majeurs comme ceux du carbone et de l'azote, cycles dont dépendent certains gaz à effet de serre importants. Cette interaction très complexe entre plusieurs composantes du système climatique, océan, atmosphère, cryosphère, cycles biogéochimiques, constitue un véritable enjeu pour lequel les EMICs sont particulièrement bien adaptés.

Andrey Ganopolski, du Potsdam Institute for Climate Impact Research en Allemagne, a ensuite montré des résultats de simulations récemment obtenus avec leur modèle CLIMBER. Celui-ci est capable de générer des variations

climatiques rapides très semblables à celles observées. Leur équipe tente maintenant d'intégrer ces variations à la cyclicité plus lente, mais aussi plus ample, des glaciations. Michel Crucifix, de l'Université Catholique de Louvain en Belgique, puis Lawrence Mysak, de l'Université McGill au Canada, ont montré quels mécanismes leur permettent de simuler la fin d'une période chaude interglaciaire, comme celle actuelle de l'Holocène, et sa transition vers une période froide glaciaire. Thomas Stocker, de l'Université de Berne en Suisse, et Tim Lenton, de l'Université d'East Anglia en Angleterre, ont présenté des résultats de simulations testant la sensibilité de la circulation océanique profonde, qui est à l'origine des variations climatiques rapides. Enfin, Hugues Goosse, de l'Université Catholique de Louvain, a étudié l'origine des variations climatiques observées sur le dernier millénaire en comparant différentes simulations aux données disponibles.

Ce colloque de séminaires a donné une vue d'ensemble sur les applications de ces modèles de complexité intermédiaire dans le domaine de la paléoclimatologie. En montrant avantages et limites de ces modèles, cette journée a fourni à l'auditoire des clés pour en comprendre leur utilisation, à l'heure où ces outils sont largement utilisés pour la prévision climatique.

Les séminaires de l'année 2006-2007

En complémentarité avec dix cours, treize séminaires ont été organisés dont la liste est donnée ci-dessous par ordre chronologique :

- dans le cadre du colloque intitulé « Apports récents des modèles climatiques de complexité intermédiaire » organisé le 25 mai 2007 à Paris en collaboration avec l'Université Catholique de Louvain-La-Neuve :
 - Édouard Bard (Collège de France) « Climate changes illustrating the need for Earth System Models » ;
 - Andrey Ganopolski (Potsdam Institute for Climate Impact Research, Allemagne) « Simulation of glacial cycles with an earth system model of intermediate complexity » ;
 - Michel Crucifix, Marie-France Loutre, André Berger (Université Catholique de Louvain, Belgique) « Interglacials with EMICs » ;
 - Lawrence Mysak, (Université McGill, Canada) « Glacial Inceptions : Past and future » ;
 - Thomas Stocker (Université de Berne, Suisse) « The bipolar seesaw across a hierarchy of climate models » ;
 - Tim Lenton (Université d'East Anglia, Angleterre) « Bi-stability of the ocean thermohaline circulation examined using the GENIE framework » ;
 - Hugues Goosse (Université Catholique de Louvain) « What can we learn on variability at centennial to millennium timescales using EMICs ? » ;
- dans le cadre du colloque intitulé : « Changement climatique et niveau marin » organisé le 19 juin 2007 à Aix-en-Provence (Campus de l'Europôle de l'Arbois) en partenariat avec l'Université Paul Cézanne Aix-Marseille 3 :

- Pierre Deschamps (Institut de Recherche pour le Développement) « La déglaciation enregistrée par le récif corallien de Tahiti » ;
- Guillemette Ménot (Université Paul Cézanne) « Impact de la déglaciation sur les fleuves Européens » ;
- Christophe Morhange (Université de Provence) « Niveau de la Méditerranée au cours des derniers millénaires » ;
- Laurence Vidal (Université Paul Cézanne) « Impact de la déglaciation sur la submersion de la Mer de Marmara et de la Mer Noire : enregistrement par les sédiments » ;
- Guillaume Soulet (IFREMER et CEREGE) « Impact de la déglaciation sur la submersion de la Mer de Marmara et de la Mer Noire : enregistrement par les eaux interstitielles » ;
- Jess Adkins (California Institute of Technology, USA) « Sea level changes and the salinity of the oceans ».

Activités de recherches

Cette année, l'équipe de la Chaire de l'Évolution du Climat et de l'Océan a conduit plusieurs études de la variabilité du cycle hydrologique en période glaciaire. Nos résultats permettront de mieux comprendre les échanges d'eau entre, d'une part, les continents et l'océan, en particulier via la fonte des glaces continentales et les fleuves associés, et d'autre part, les échanges d'eau entre les bassins océaniques, notamment entre l'Atlantique et le Pacifique.

Il y a environ vingt millénaires, la Terre traversait une période froide particulièrement rigoureuse, le « dernier maximum glaciaire ». L'Europe du Nord était recouverte par une véritable montagne de glace de plus de 2 km d'épaisseur, appelée la calotte fennoscandienne.

Le niveau marin était très bas, environ 130 mètres en dessous du niveau actuel. La France et l'Angleterre n'étaient donc plus séparées par une mer, mais par un gigantesque fleuve : le fleuve Manche. Ce système fluvial, le plus grand jamais développé en Europe, était alimenté à la fois par les eaux de fonte de glaciers de montagne (les Alpes et les Pyrénées, notamment) et par celles des calottes fennoscandienne et anglo-irlandaise. La présence de la calotte glaciaire canalisait les flots vers l'ouest. Son bassin de drainage s'étendait très à l'Est sur le continent européen, collectant les eaux de la Seine, de la Tamise, du Rhin, de l'Elbe, de la Meuse, de la Somme, de la Weser et d'autres fleuves plus petits.

Malgré son importance, il n'existait jusqu'à présent aucun enregistrement fiable de l'activité passée du fleuve Manche. À partir de nombreux indices géochimiques mesurés dans une carotte de sédiment marin prélevée par le navire océanographique français *Marion Dufresne* en 1995 dans le golfe de Gascogne (MD95-2002), notre équipe en collaboration avec une équipe hollandaise du NIOZ a pu établir la première chronologie de l'activité de ce fleuve pendant les

40 derniers millénaires. Nos premiers résultats ont été publiés par le magazine scientifique *Science* (Ménot *et al.* 2006).

L'originalité de notre approche tient en particulier à l'utilisation d'un nouvel indicateur paléoclimatique pour reconstituer l'activité des fleuves. Cet indicateur est fondé sur l'analyse de certaines molécules caractéristiques de deux types d'organismes, d'une part des eubactéries et des archéobactéries vivant dans le sol et, d'autre part, des archées exclusivement marines. Les molécules choisies, des lipides complexes, subissent des processus de dégradation similaires et survivent à la sédimentation pendant plusieurs milliers d'années.

L'enregistrement obtenu témoigne de la réactivation rapide du cycle hydrologique sur le continent européen au début de la dernière déglaciation. La phase fluviale, qui a débuté il y a 20 000 ans, dès le début du réchauffement des températures de l'air enregistré dans les glaces du Groenland, a alors entraîné un important flux d'eau douce dans le golfe de Gascogne, ce qui a certainement eu un impact sur la circulation de l'Atlantique Nord, en surface comme en profondeur. Cette intense phase fluviale s'est ensuite arrêtée très brutalement, il y a 17 000 ans, lors de l'événement froid causé par la débâcle partielle de la calotte de glace qui recouvrait une grande partie du continent nord-américain (la Laurentide). Puis le niveau de la mer a continué à remonter encore plus rapidement et le fleuve entre l'Angleterre et la France a laissé la place à la Manche que nous connaissons aujourd'hui...

Pour réaliser ces études, nous avons utilisés des techniques analytiques novatrices dans le domaine de la géochimie organique. Il a même été nécessaire d'installer de nouveaux équipements dans notre laboratoire de l'Antenne du Collège de France sur l'Europole de l'Arbois à Aix-en-Provence. Les progrès des techniques de chromatographie liquide haute performance couplée à la spectrométrie de masse quadripolaire (HPLC/MS) ont permis l'analyse directe de lipides complexes, pour lesquels un poids moléculaire et/ou une polarité élevés ne permettent pas l'utilisation des techniques classiques de chromatographie gazeuse : les tétraéthers de glycérol (en anglais glycerol dialkyl glycerol tetraethers, GDGTs). Ces tétraéthers de glycérol sont caractéristiques des archéobactéries, des procaryotes seuls capables de les synthétiser et qui les intègrent dans leur membrane. Un index a été développé, l'index BIT (pour Branched and Isoprenoid Tetraethers en anglais), qui est basé sur l'abondance relative des tétraéthers d'origine terrestre et du crénarchéol. Cet indice permet de tracer les apports de matériel terrigène dans les sédiments marins. Il varie entre 0 et 1, toute la matière organique étant d'origine marine ou terrestre, respectivement.

Notre nouveau laboratoire permettant la mesure de ces composés comprend une salle de chimie destinée à l'extraction et à la purification des tétraéthers à partir de la fraction lipidique totale, ainsi qu'une chaîne de chromatographie liquide couplée à un spectromètre de masse, équipé d'une source permettant une ionisation chimique des composés sous pression atmosphérique (APCI-LCMS,

Agilent serie 1100). Cet équipement a été financé conjointement par les crédits de chaire du Collège de France ainsi qu'avec l'aide de la Région PACA, la Communauté du Pays d'Aix-en-Provence et le Fonds Européen de Développement Régional (FEDER).

L'effet de ralentissement que le réchauffement actuel pourrait induire sur la circulation de l'océan Atlantique fait l'objet d'un consensus, même si des incertitudes demeurent encore au sujet de l'amplitude et de la vitesse des changements futurs. En revanche, la réponse de la zone intertropicale à de telles variations rapides du couple océan-atmosphère et l'impact de cette réponse sur la circulation océanique sont encore largement méconnus.

L'approche paléoclimatique est la seule permettant de documenter ce type de variations environnementales, d'autant qu'il est maintenant reconnu que de tels événements étaient fréquents pendant la dernière glaciation. En particulier, les phases climatiques froides appelées événements de Heinrich qui se produisaient durant cette période se caractérisaient par un effondrement de la circulation atlantique profonde causée par une augmentation du flux d'eau douce à l'océan, suite à la déstabilisation des calottes glaciaires. Les archives climatiques, comme les sédiments marins et lacustres, les glaces polaires et les stalagmites, montrent clairement la relation étroite existant entre ces variations climatiques de grande ampleur et les changements brutaux et concomitants de la circulation profonde de l'océan.

Si les variations thermiques les plus grandes sont observées dans la région de l'Atlantique Nord, des recherches récentes ont montré que ces changements climatiques rapides pouvaient aussi avoir une influence à l'échelle planétaire, en affectant en particulier le cycle de l'eau : ils seraient notamment accompagnés par une migration en latitude (vers le sud lors d'événements froids et vers le nord lors d'événements chauds) de l'équateur climatique séparant les systèmes d'alizés des deux hémisphères (zone intertropicale de convergence).

Une région clé de ce système est l'Amérique Centrale, bande continentale étroite séparant l'océan Atlantique de l'océan Pacifique. Du côté de l'Atlantique, les eaux de surface sont marquées par une évaporation intense, ce qui augmente leur salinité. La vapeur d'eau est ensuite transférée par les alizés vers le Pacifique où elle retombe sous forme de pluie, diminuant ainsi la salinité des eaux de surface. Cet échange de vapeur d'eau entre les deux bassins équivaut à plusieurs centaines de milliers de mètres cube par seconde. Cet énorme transfert d'eau douce maintient de façon permanente un contraste de salinité entre les deux océans. Les eaux de surface de l'Atlantique tropical sont ensuite transportées, via le Gulf Stream, vers les hautes latitudes, où elles réchauffent l'atmosphère, avant de plonger vers les abysses dans des zones de convection situées dans les mers de Norvège, du Groenland et du Labrador. Les eaux profondes ainsi formées vont ensuite se propager dans l'océan mondial, purgeant l'Atlantique Nord d'une partie de son excès en sel.

À partir de nombreux indicateurs géochimiques mesurés dans les sédiments marins prélevés en 2002 à l'ouest de l'Isthme de Panama par le navire océanographique français *Marion Dufresne* (carotte MD02-2529), notre équipe a pu reconstituer les variations de salinité des eaux de surface, précisément dans la zone de dépôt de la vapeur d'eau provenant de l'Atlantique. Nos premiers résultats ont été publiés par le magazine scientifique *Nature* (Leduc *et al.* 2007). Cette étude originale montre que les périodes froides de Heinrich correspondent à des augmentations de salinité dans la zone Est Pacifique, synonyme d'une réduction du transfert de vapeur d'eau.

En comparant nos résultats à d'autres études réalisées dans le secteur Atlantique et en Amérique du Sud, nous avons mis en évidence une nouvelle rétroaction positive, c'est-à-dire un mécanisme qui amplifie la perturbation climatique. Lors de ces crises climatiques, les alizés chargés d'humidité migraient vers le sud ; ne pouvant pas franchir la Cordillère des Andes, une partie des pluies qui normalement adoucissaient le Pacifique Est se déposait sur le bassin versant de l'Amazone. Cette rétroaction qui fait intervenir l'océan, la circulation atmosphérique, la topographie et le réseau fluvial a pour effet de réinjecter les eaux de pluie dans l'Atlantique, de diminuer ainsi la salinité des eaux de cet océan et finalement d'en ralentir la circulation.

Cette nouvelle étude montre donc qu'il existe un lien étroit entre l'hydrologie tropicale et la circulation océanique de l'Atlantique Nord, qui module le climat au-dessus et autour de ce bassin (notamment en Europe). Cette nouvelle rétroaction climatique peut être étudiée à l'aide de modèles numériques couplant l'atmosphère et l'océan et les simulations disponibles suggèrent que ce phénomène existe effectivement. Des calculs complémentaires devront être réalisés pour quantifier cette rétroaction à l'aide de modèles ayant une résolution spatiale suffisante pour bien représenter la topographie des chaînes de montagne de la zone tropicale.

Ces études paléoclimatiques basées sur les sédiments marins sont importantes car elles permettent de reconstituer les variations hydrologiques passées à l'échelle de continents. L'intérêt n'est pas seulement académique car il devient crucial, pour mieux prévoir, de bien comprendre les relations entre le cycle de l'eau et le climat.

Le réchauffement des prochains siècles aura des répercussions importantes sur le cycle de l'eau. Celui-ci devrait s'intensifier et s'accompagner d'une augmentation, aux hautes latitudes, des précipitations et des flux d'eau douce via les fleuves et la fonte des glaces continentales, en particulier du Groenland. Ces changements conjugués de la température et du cycle de l'eau sont donc de nature à diminuer la densité des masses d'eau de l'Atlantique Nord. Une telle chute pourrait donc déstabiliser une ou plusieurs zones de plongée d'eau profonde.

Lorsque l'on introduit une augmentation du CO₂, tous les modèles climatiques répondent de la même manière : par une diminution de la circulation profonde.

Cependant, il n'y a pas de consensus sur l'amplitude de cette diminution (de 10 à 50 % en 2150). Certaines simulations numériques suggèrent même que la circulation profonde pourrait même s'effondrer, c'est-à-dire dépasser un seuil au-delà duquel un retour à l'état antérieur deviendrait très difficile, pour atteindre un nouvel état stable où elle serait encore très affaiblie. D'après les modèles, on n'atteindra pas ce seuil avant plusieurs siècles. Mais tout dépend de l'intensité de la perturbation anthropique... Si celle-ci était vraiment trop forte la probabilité de basculement à la fin du siècle pourrait monter jusqu'à une chance sur trois. 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 passe le seuil, alors on pourrait assister, dans une Terre globalement plus chaude, à un refroidissement localisé sur l'Atlantique Nord.

Parallèlement, les données océanographiques des 50 dernières années suggèrent que des changements hydrographiques (température et salinité) ainsi qu'une diminution du flux d'eau transporté par certains courants marins, en surface et en profondeur, se sont déjà produits en Atlantique Nord. Quant aux données des satellites, elles montrent une accélération récente de la fonte des glaces du Groenland. Même si les incertitudes restent nombreuses, il semble donc que le risque de ralentissement et/ou d'effondrement de la circulation océanique à l'échéance de la fin du siècle, ou du début du siècle prochain, doive être pris au sérieux et étudié activement.

Publications

2007

BARD E., RAISBECK G., YIOU F., JOUZEL J. Comment on « Solar activity during the last 1000 yr inferred from radionuclide records » by Muscheler *et al.* (2007). *Quaternary Science Reviews*, 26, 2301-2308, (2007).

BUCK C., BARD E. A calendar chronology for mammoth and horse extinction in North America based on Bayesian radiocarbon calibration. *Quaternary Science Reviews*, 26, 2031-2035, (2007).

BÖNING P., BARD E., ROSE E. Towards direct micron-scale XRF elemental maps and quantitative profiles of wet marine sediments. *Geochemistry Geophysics Geosystems (G-cubed)* 8 (5), doi:10.1029/2006GC001480, 1-14, (2007).

DE GARIDEL-THORON T., ROSENTHAL Y., BEAUFORT L., BARD E., SONZOGNI C., MIX A. A multiproxy assessment of the equatorial Pacific hydrography during the last 30 ky. *Paleoceanography* 22, PA3204, doi:10.1029/2006PA001269, 1-18 (2007).

ERIS K.K., RYAN W.B.F., CAGATAY M.N., SANCAR U., LERICOLAIS G., MÉNOT G., BARD E. The timing and evolution of the post-glacial transgression across the Sea of Marmara shelf south of Istanbul, *Marine Geology*, 243, 57-76 (2007).

LEDUC G., VIDAL L., TACHIKAWA K., ROSTEK F., SONZOGNI C., BEAUFORT L., BARD E. Moisture transport across Central America as a positive feedback on abrupt climatic changes. *Nature* 445, 908-911 (2007).

PICHEVIN L., BARD E., MARTINEZ P., BILLY I. Evidence of ventilation changes in the Arabian Sea during the Late Quaternary : implication for denitrification and nitrous oxide emission. *Global and Biogeochemical Cycles*, 21, GB2008, 1-12, (2007).

RICKABY R.E.M., BARD E., SONZOGNI C., ROSTEK F., BEAUFORT L., BARLER S., REES G., SCHRAG D. Coccolith chemistry reveals secular variations in the global ocean carbon cycle ? *Earth and Planetary Science Letters* 253, 83-95, (2007).

2006

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

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

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

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

REIMER P.J., BARD E., BUCK C., GUILDERSON T.P., HOGG A., HUGHEN K., KROMER B., REIMER R., SOUTHON J., TURNEY C.S.M., VAN DER PLICHT J., WEYHENMEYER C.E., RAMSEY C.B. Int Cal and the future of radiocarbon calibration. *PAGES News* 14 (3), 9-10 (2006).

SIDDALL M., BARD E., ROHLING E.J., HEMLEBEN C. Sea-level change during Termination II. *Geology* 34, 817-820 (2006).

SIDDALL M., STOCKER T.F., BLUNIER T., SPAHNI R., MCMANUS J., BARD E. Using a maximum simplicity paleoclimate model to simulate millennial variability during the last four glacial periods. *Quaternary Science Reviews*, 25, 3185-3197 (2006).

STANFORD J.D., ROHLING E.J., HUNTER S., ROBERTS A.P., RASMUSSEN S.O., BARD E., MCMANUS J., FAIRBANKS R.G. Meltwater injections and deep circulation in the North Atlantic. *Paleoceanography* 21, PA4103, doi:10.1029/2006PA001340, 1-9 (2006).

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

Les variations climatiques du passé et de l'avenir, *in* « Les géosciences au service de l'Homme : 100 ans de géologie à Nancy », 178-197 (2007).

L'océan et le changement climatique. *La lettre de l'Académie des sciences*, n° 21, 15-19 (2007).

Préface du livre « Le méthane et le destin de la Terre » de G. Lambert *et coll.* *EDP Sciences*, 5-11 (2006).

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

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

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

Le Figaro, p. 12, 3-4 février 2007. Comme si Paris était déplacée à la latitude de Bordeaux.

Libération, pp. 38-39, 27-28 janvier 2007. La menace d'un changement climatique dangereux se confirme.

Nouvel Observateur, p. 16, 14 décembre 2006. Sceptique professionnel.

Libération, p. 5, 11 octobre 2006. + 2 °C, un seuil à ne pas dépasser.

Le Monde, p. 18, 1-2 octobre 2006. La tentation de refroidir la planète

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

Conférences dans le cadre de colloques

San Francisco, 11-15 décembre 2006, American Geophysical Union Fall Meeting :
— BARD E., DELAYGUE G., STOCKER T.F. Some model constraints on the possible amplitude of reservoir age variations.

— BARD E. The Sverdrup Lecture : The last deglaciation as a test bench for studying the mysteries of ocean evolution.

Paris, 13 mars 2007, Séance Publique de l'Académie des Sciences. Conférence-débat sur le climat :

— BARD E. Rôle du CO₂ et des facteurs d'origine terrestre.

Vienne, 15-20 avril 2007, European Geosciences Union General Assembly :
 — SÉARD C., CAMOIN G., BARD E., BORGOMANO J., DESCHAMPS P., DURAND N.,
 HAMELIN B., WEBSTER J., WESTPHAL H., YOKOYAMA Y. Reconstructing reef accre-
 tion during the last deglacial sea-level rise : IODP #310 expedition « Tahiti
 sea level ».

— NAUGHTON F., SANCHEZ GONI M.F., DUPRAT J., CORTIJO E., MALAIZE B.,
 JOLY C., BARD E., ROSTEK F., TURON J.L. Complex pattern of Heinrich events
 in the mid-latitudes of the North-east Atlantic explained by oceanic and atmos-
 pheric mechanisms.

— DESCHAMPS P., DURAND N., BARD E., HAMELIN B., CAMOIN G., THOMAS A.L.,
 HENDERSON G.M., YOKOYAMA Y. IODP Expedition 310 Scientists. New evidence
 for the existence of the MWP-1A from a « far-field » site — Preliminary results
 from the Tahiti IODP Expedition 310.

— FELIS T., ASAMI R., DESCHAMPS P., KÖLLING M., DURAND N., BARD E.
 IODP Expedition 310 Scientists. Sub-seasonal reconstructions of South Pacific
 climate during the last deglaciation from Tahiti corals — preliminary results
 from IODP Expedition 310.

Cologne, 20-24 août 2007, Goldschmidt Conference :

— SEPULCRE S., TACHIKAWA K., VIDAL L., BARD E. Large 14C age offsets
 between aragonite fraction and coexisting planktonic foraminifera in shallow
 Caribbean sediments.

Shangaï, 20-24 août 2007, 9th International Conference on Paleoceanography :

— LEDUC G., VIDAL L., TACHIKAWA K., BARD E. Eastern Pacific mid-depth
 water mass changes and hydrological properties inferred from benthic foraminife-
 ral stable isotopes.

Responsabilités diverses

Directeur-Adjoint du Centre Européen de Recherche et d'Enseignement en
 Géosciences de l'Environnement (CEREGE UMR 6635).

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

Membre du Conseil du laboratoire NOSAMS de la Woods-Hole Oceanographic
 Institution (USA).

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

Vice-président du Groupe de Travail n° 1 (« lutter contre les changements
 climatiques et maîtriser la demande d'énergie ») du « Grenelle Environnement »
 organisé par le Ministère de l'écologie, du développement et de l'aménagement
 durables (MEDAD).

Distinctions

2006, Grand Prix Gérard Mégie de l'Académie des Sciences et du CNRS.

2006, Sverdrup Lecture, American Geophysical Union Fall Meeting, San Francisco.

2006, Flint Lectures, Université Yale.

2006, Wright Lecture, Université de Genève.

2007, Chevalier de la Légion d'Honneur.

