

Évolution du climat et de l'océan

M. Édouard BARD, professeur

Histoire du climat : d'une Terre chaude à l'Eocène aux glaciations du Pléistocène

Le cours de cette année a été consacré à la suite de l'histoire du climat de la Terre abordé en 2006-2007. La période en question va de l'optimum du début de l'ère Tertiaire aux glaciations du Quaternaire.

Après avoir revu brièvement les causes de l'optimum éocène, nous avons abordé en détail la transition Eocène-Oligocène. Il s'agit d'une transition climatique majeure mise en évidence à l'échelle mondiale dans les sédiments marins et continentaux à toutes les latitudes. Elle correspond aussi à une transition faunistique bien connue depuis le début du xx^e siècle (« Grande Coupure » de Stehlin). Lors du cours, une attention particulière a été portée sur l'événement Oi-1, il y a environ 33 millions d'années. La comparaison entre les données des isotopes de l'oxygène et de paléotempératures océaniques suggèrent que cet événement correspond à une augmentation drastique du volume des glaces polaires. L'étude de la distribution des débris rocheux transportés par les icebergs, en Atlantique Nord et dans les Océans Arctique et Austral, montre bien que les deux pôles se sont englacés de façon synchrone. Cette glaciation a été accompagnée d'une perturbation massive de l'érosion chimique globale mise en évidence par des indicateurs isotopiques (par ex. isotopes du strontium) et minéralogiques (distribution des minéraux argileux). Le cycle du carbone a lui aussi subi une variation importante, matérialisée par une augmentation de la productivité planctonique de la zone australe, une élévation du rapport $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ océanique et un approfondissement, d'environ un kilomètre, de la profondeur de compensation de la calcite. Ces variations du cycle du carbone ont été accompagnées d'une chute de la teneur atmosphérique en gaz carbonique (plus de 500 ppm en moins de 10 millions d'années).

Plusieurs types de causes ont été proposés pour expliquer la dégradation climatique de la transition Eocène-Oligocène. Des causes physiographiques (ouverture des passages de Drake et de Tasmanie) expliquant l'établissement du courant circumpolaire de l'Océan Austral qui aurait entraîné l'isolement climatique de l'Antarctique et son entrée en glaciation. Des causes d'origine astronomique, avec une configuration orbitale particulière caractérisée par une faible insolation estivale aux hautes latitudes. Et enfin, des causes liées à l'influence de la géodynamique sur le cycle du carbone : d'une part, une baisse limitée d'environ un quart du taux d'accrétion océanique et d'autre part (surtout) la conséquence de la collision de la plaque Indienne avec le continent asiatique. En effet, la surrection de l'Himalaya et du plateau Tibétain a eu un impact majeur sur la circulation atmosphérique, la mousson et sur l'altération physique et chimique des roches cristallines de cette région du globe. La modélisation numérique prenant en compte ces différents effets, indique que le forçage prépondérant est l'effet de serre du gaz carbonique. Les variations orbitales expliqueraient la nature abrupte du phénomène. L'ouverture des passages de Drake et de Tasmanie et l'établissement du courant circumpolaire antarctique, n'auraient qu'un rôle secondaire.

L'analyse des isotopes de l'oxygène aux différentes latitudes de l'océan mondial, montre que le climat mondial se réchauffe fortement à la transition Oligocène-Miocène, il y a environ 25 millions d'années. L'étude des sédiments océaniques et continentaux confirme le caractère mondial du réchauffement miocène. Cette période correspond aussi à l'expansion des plantes en C₄, adaptées à de basses teneurs en CO₂, à de fortes températures et à des saisons sèches. La transition de la flore est reconstituée à partir des pollens, notamment ceux des graminées, ainsi qu'à partir d'une hausse généralisée du rapport isotopique ¹³C/¹²C mesuré dans les dents d'herbivores, les paléosols et la matière organique sédimentaire. Les faunes se sont adaptées à ces changements de la végétation et du climat, en particulier les mammifères avec les évolutions caractéristiques des équidés et des proboscidiens traduisant les changements de régime alimentaire (folivore vs. graminivore) et l'adaptation à la course dans un paysage de steppes et de savanes ouvertes.

Le climat mondial se refroidit progressivement à partir du milieu du Miocène, mais ce n'est que vers trois millions d'années avant le présent que le climat se dégrade vraiment avec une nouvelle intensification glaciaire au Pliocène. Plusieurs causes ont été envisagées pour expliquer la dégradation mio-pliocène. Les reconstitutions de la teneur en gaz carbonique ne montrent pas d'accord entre les différents indicateurs. Néanmoins, l'enregistrement considéré comme le plus fiable ne montre pratiquement pas de variation de la pCO₂ entre 20 et 7 millions d'années avant le présent ce qui suggère que d'autres causes sont à l'origine des fluctuations climatiques observées.

Les variations orbitales pourraient expliquer certains événements comme l'épisode glaciaire Mi-1 vers 23 millions d'années et l'intensification des glaciations à partir de trois millions d'années. Néanmoins, ces configurations orbitales favorables aux

glaciations sont cycliques et il est donc probable que d'autres causes sont responsables de la tendance à long terme sur plus de dix millions d'années.

Même si les continents avaient à peu près leurs géométries et positions actuelles, plusieurs « petits » changements de la physiographie ont probablement eu un impact sur la circulation océanique globale. La période considérée correspond effectivement à l'établissement de la circulation moderne avec l'ouverture du détroit de Fram, la fermeture de l'Isthme de Panama et un changement de la géométrie du Passage Indonésien. L'étude de la répartition des faunes et la mise en évidence de migrations à grande échelle (ex. des deux Amériques), ont permis de suivre ces changements sur les continents.

L'impact de ces variations physiographiques sur la circulation océanique est indéniable comme le montre l'analyse géochimique comparée des sédiments carbonatés de l'Atlantique et du Pacifique, traduisant les contrastes de salinité de surface et de ventilation profonde de ces deux océans. D'autres séries géochimiques ont permis de mettre en évidence l'établissement de la stratification en salinité du Pacifique Nord (halocline) vers trois millions d'années avant le présent.

Ces multiples modifications de l'océan ont eu de nombreuses répercussions sur le climat mondial, conduisant globalement à l'installation de grandes calottes de glace dans l'hémisphère nord. Afin de quantifier l'impact des variations des flux de chaleur océanique sur l'évaporation et les précipitations, il est nécessaire de considérer les résultats de la modélisation numérique. Les simulations récentes confirment l'impact de la fermeture de l'Isthme de Panama sur la température et les précipitations de l'hémisphère nord. La prise en compte de la stratification du Pacifique Nord semble indispensable pour expliquer l'installation de la calotte nord-américaine. Au niveau de la zone intertropicale, la migration vers le Nord de la Nouvelle-Guinée serait à l'origine du refroidissement de l'Océan Indien et de l'assèchement de l'Afrique de l'Est entre quatre et trois millions d'années avant le présent.

Au cours des quatre derniers millions d'années, on assiste à une évolution caractéristique des cycles glaciaires : d'une part une lente intensification des glaciations (les calottes sont de plus en plus volumineuses) et, d'autre part, une évolution de la fréquence des épisodes glaciaires : avec une cyclicité de 41 000 ans avant 1,4 million d'années et d'environ 100 000 ans après 700 000 ans avant le présent. Le cycle de 41 000 ans est clairement lié au cycle de l'obliquité de l'axe de rotation de la Terre. Par contre, la cyclicité d'environ 100 000 ans fait encore l'objet de nombreuses recherches car le cycle de l'excentricité orbitale, d'environ 100 000 ans, ne peut en rendre compte, son influence sur l'insolation étant extrêmement faible. Par ailleurs, la bande de fréquence de 100 000 ans est relativement diffuse et pourrait être liée à des multiples de l'obliquité (82 000 et 123 000 ans). L'évolution du volume des glaces continentales, étudiée finement à partir du rapport $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ de l'océan profond, montre que l'influence du cycle de précession d'environ 19-23 000 ans est pratiquement absent avant 900 000 ans et

qu'il apparaît dans les enregistrements avec le cycle de 100 000 ans. Ce bouleversement des caractéristiques, en amplitude et fréquence du phénomène glaciaire, est appelé la « transition mi-Pléistocène » (MPT en Anglais).

Pour comprendre les causes de cette évolution, j'ai fait quelques rappels sur la dynamique des calottes de glace, notamment les différents facteurs qui régissent l'accumulation hivernale et l'ablation estivale. Le bilan de masse dépend évidemment de la température et des précipitations sous forme de neige. Il est aussi crucial de tenir compte d'autres facteurs qui agissent sur le bilan de glace, comme l'élévation de l'inlandsis qui contribue à sa préservation, la subsidence isostatique qui entraîne une rétroaction positive sur la croissance et la fonte de la calotte, la formation d'une plate-forme ou barrière de glace (*ice shelf* en Anglais) lorsque la calotte déborde sur l'océan, la présence en base de calotte de sédiments gorgés d'eau qui favorisent l'écoulement (couche lubrifiante), ce phénomène pouvant être amplifié par l'eau des lacs supraglaciaires, formée pendant la fonte estivale, qui peut pénétrer dans les crevasses jusqu'en base de calotte.

Plusieurs mécanismes ont été envisagés pour expliquer les caractéristiques de la transition mi-Pléistocène. L'absence des cycles de précession dans l'enregistrement du volume des glaces continentales pourrait être expliqué par une compensation des variations des inlandsis des deux hémisphères subissant des changements d'insolation en antiphasse. Le faible volume des calottes antérieures à la transition serait une condition de cette compensation. D'autres chercheurs pensent que l'énergie solaire totale reçue en été contrôle la vitesse de variation en masse des calottes. Cette énergie totale estivale dépend essentiellement de l'obliquité ce qui expliquerait la dominance de cette fréquence avant la transition mi-Pléistocène.

Néanmoins, les paramètres orbitaux ne permettent pas d'expliquer à eux seuls la transition graduelle en amplitude et fréquence. Plusieurs hypothèses ont donc été proposées pour en rendre compte. Certains chercheurs ont envisagé qu'une baisse à long terme de la teneur atmosphérique en gaz carbonique aurait favorisé les glaciations. Cependant, les données disponibles sur la $p\text{CO}_2$ ne suggèrent pas d'évolution significative dans ce sens (l'enregistrement sur 800 000 ans à partir des bulles d'air des glaces de l'Antarctique montrant même une augmentation de la $p\text{CO}_2$ des périodes glaciaires).

Une autre explication possible est l'érosion mécanique du régolithe. Cette hypothèse est fondée sur des observations géologiques suggérant que les calottes précédant la transition auraient été très étendues en surface alors même que leurs masses étaient plus faibles (en particulier la calotte nord-américaine). Avant la transition mi-Pléistocène, la présence du régolithe, couche d'altérite formée aux périodes chaudes du Tertiaire, aurait conduit à l'étalement des calottes. L'érosion de cette couche lubrifiante aurait ensuite permis aux calottes de croître beaucoup plus en altitude et donc en volume global.

Des inlandsis beaucoup plus gros auraient conduit à une synchronisation interhémisphérique, notamment en raison de l'influence de l'océan sur les plateformes de glace périphériques ainsi que d'autres connexions possibles liées à des rétroactions du cycle du carbone comme en témoignent l'émergence du cycle à 100 000 de la $p\text{CO}_2$ atmosphérique et les variations du rapport isotopique $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ benthique de l'Atlantique et du Pacifique (et du gradient entre ces deux océans). Ces grandes fluctuations du cycle du carbone à partir de la transition mi-Pléistocène signalent la séquestration du CO_2 dans l'océan profond et illustrent l'importance probable de l'effet de serre pour expliquer la sévérité des conditions glaciaires postérieures à la transition.

De multiples indicateurs mesurés dans plusieurs types d'archives géologiques permettent de reconstituer le climat des grandes glaciations du dernier million d'années. En particulier, la comparaison entre les enregistrements des sédiments marins et des glaces polaires montre que les grands cycles glaciaires d'environ 100 000 ans sont caractérisés par des variations de température, de niveau marin et de $p\text{CO}_2$ globalement en phase. La datation uranium-thorium des coraux fossiles indique que le niveau marin s'est abaissé de plus d'une centaine de mètres pendant les glaciations et a dépassé le niveau actuel pendant quelques périodes rares et brèves, notamment le Dernier Interglaciaire centré vers 125 000 ans avant le présent (environ + 7 m). La moitié de cette hausse serait liée à la réduction de moitié de la calotte Groenlandaise.

Les données paléothermométriques indiquent un refroidissement généralisé d'environ 4 °C pendant les phases glaciaires, avec une amplification marquée sur les continents et les latitudes les plus hautes. La comparaison de séries de température aux différentes latitudes indique une amplification d'environ un facteur deux à trois, traduisant l'existence de rétroactions positives spécifiques aux zones polaires. Par exemple, la cartographie des banquises des deux hémisphères suggère que leur influence était beaucoup plus marquée pendant les phases froides.

Le bilan des forçages radiatifs de la dernière glaciation suggère que la baisse des teneurs en gaz à effet de serre, notamment le CO_2 (baisse de 100 ppm), est responsable pour environ un tiers de la perturbation climatique. Ce forçage serait dominant sous les tropiques ce qui expliquerait leur refroidissement d'environ 2 °C. Au premier ordre, les observations de l'amplification polaire et du refroidissement tropical sont compatibles avec la sensibilité climatique estimée par les modèles numériques.

La dernière transition glaciaire-interglaciaire a été étudiée avec une bonne résolution temporelle ce qui permet de quantifier les déphasages entre les multiples paramètres du climat. Le réchauffement post-glaciaire est rapide à l'échelle géologique, mais relativement lent en moyenne mondiale : quelques degrés sur dix mille ans. L'augmentation postglaciaire du CO_2 atmosphérique n'est pas la cause du réchauffement initial, mais il n'est pas non plus une simple réponse au réchauffement océanique. Ainsi, l'effet de la solubilité (4 %/°C \approx 10 ppm/°C) n'est

responsable que d'environ 20 ppm. L'augmentation de CO₂ observée, environ 100 ppm, est liée à de nombreuses rétroactions du cycle du carbone impliquant notamment l'océan profond comme le montrent les enregistrements du ¹³C/¹²C des foraminifères benthiques.

La chronologie et la structure du réchauffement postglaciaire sont variables d'une région à une autre. Dans certaines zones, les enregistrements indiquent même de grandes amplitudes, des accélérations brusques (par ex. 10 °C en quelques décennies au Groenland) et des refroidissements transitoires : l'événement du Dryas Récent dans l'Hémisphère Nord et le Renversement Froid Antarctique dans la zone Australe (*Antarctic Cold Reversal* en Anglais). Le réchauffement semble avoir été initié par l'augmentation de l'insolation estivale liée aux variations de l'orbite terrestre. L'augmentation de l'effet de serre (CO₂, CH₄, N₂O) a suivi les premiers signes locaux d'élévation de température, mais précède l'essentiel du réchauffement. Il s'agit d'une rétroaction positive expliquant environ le tiers de l'amplitude thermique.

La fonte des calottes de glace peut être étudiée en cartographiant et en datant les moraines terminales sur les continents. Néanmoins, l'enregistrement le plus fiable est celui du niveau marin obtenu par la datation uranium-thorium des coraux fossiles prélevés en forant les récifs coralliens, notamment ceux des îles de La Barbade dans les Caraïbes et de Tahiti en Polynésie. Globalement, le niveau marin suit le réchauffement postglaciaire avec un retard de plusieurs millénaires. La remontée moyenne est relativement lente, 130 m en 15 000 ans, mais elle ponctue d'accélération(s) causée(s) par la débâcle des calottes : plusieurs mètres par siècle pour l'événement « Melt Water Pulse 1A » qui a eu lieu, il y a environ 14 500 ans. La comparaison et la modélisation géophysique des niveaux marins observés en Atlantique et dans le Pacifique permettent de localiser les sources de glace et la chronologie de la fonte des différents inlandsis de la dernière période glaciaire.

Pour compléter le cours sur l'histoire du climat, un colloque de séminaires a été consacré au rôle du Soleil comparé à ceux des autres forçages climatiques.

Le flux d'énergie reçue du Soleil, la « constante solaire » (l'éclairement ou l'irradiance), varie en fait à de nombreuses échelles de temps. Depuis la formation du Soleil, il y a environ 4,6 milliards d'années, son activité a augmenté d'environ 30 %. Dans sa jeunesse, la surface de la Terre recevait donc moins d'énergie, ce qui a probablement contribué à expliquer certaines périodes de glaciation extrême. Plus proches de nous, au cours des derniers siècles, différentes observations ont permis de mettre en évidence la variabilité de l'activité du soleil. Les aurores boréales, ainsi que les taches solaires observées depuis l'invention de la lunette astronomique, ont permis ainsi de démontrer l'existence d'une cyclicité très prononcée de 11 ans, ainsi que des variations cycliques ou irrégulières sur plusieurs dizaines et centaines d'années.

Ces variations de l'activité solaire ont pu être rapprochées des hauts et bas climatiques en Europe, reconstitués par les historiens, et confirmés par les paléoclimatologues. Ainsi, le « Petit Age Glaciaire » du xiv^e au $xviii^e$ siècle correspond globalement à une période de faible activité du Soleil (Minima de Maunder, Spörer et Wolf), tandis que le réchauffement global du climat qui a suivi est contemporain d'une augmentation de cette activité.

Pourtant, il a fallu attendre les mesures suffisamment précises des satellites, depuis seulement une trentaine d'années, pour pouvoir quantifier ce flux d'énergie solaire et en démontrer les variations. L'éclairement total varie ainsi d'environ 0,1 % au cours d'un cycle de 11 ans. Ces trente années d'observations ne permettent pas de prouver l'existence d'une tendance pluridécennale de l'éclairement, tendance qui au plus serait très limitée. C'est pour cette raison que le Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (GIEC) n'attribue à l'augmentation du flux d'énergie solaire qu'une contribution très limitée au réchauffement global du dernier siècle. D'autres mesures indirectes de l'activité du soleil permettent des reconstitutions avant l'ère des satellites. Des mesures du flux de particules cosmiques mais aussi de la perturbation du champ magnétique à la surface de la Terre, tous deux contrôlés par le champ magnétique solaire, permettent de remonter sur plus d'un siècle.

Au-delà, les isotopes cosmogéniques, formés par l'interaction du rayonnement cosmique sur l'atmosphère, notamment le carbone-14 et le béryllium-10, sont des outils très précieux car ils permettent de remonter sur plusieurs milliers d'années dans le passé. Comme l'origine commune aux enregistrements de ces deux isotopes est l'activité du Soleil, leur très bonne correspondance est une preuve de leur fiabilité comme traceurs de l'activité du Soleil. Malheureusement, tous ces enregistrements sont trop indirects pour permettre de quantifier par eux-mêmes les variations du flux d'énergie solaire. Pour cette raison, les nombreuses études qui ont tenté d'expliquer les variations climatiques des derniers siècles aux derniers millénaires à l'aide de l'activité du soleil ne reposent que sur des corrélations empiriques. Les mécanismes physiques qui pourraient expliquer l'impact climatique de l'activité solaire restent à découvrir. L'enjeu de cet impact sur la prévision des changements climatiques futurs est tel qu'il est très important de progresser par des approches pluridisciplinaires associant les astrophysiciens aux climatologues. Tel était le but de ce colloque, qui se proposait ainsi de faire le point à la fois sur le fonctionnement du Soleil et sur celui du système climatique, notamment des différentes composantes sensibles à l'activité du soleil.

Sylvaine Turck-Chièze, du Laboratoire Plasmas Stellaires et Astrophysique Nucléaire du CEA, à Saclay, a ainsi exposé l'apport de la modélisation à la connaissance du fonctionnement de notre étoile. Des modèles de complexités différentes permettent ainsi de tester différentes hypothèses de fonctionnement, mais aussi d'en prévoir l'évolution. Elle a aussi dressé un bilan des connaissances actuelles et rappelé que les observations du satellite SoHO, lancé en 1995, ont conduit à une vision nouvelle du Soleil. Une partie de la dynamique interne du

Soleil a été élucidée, cependant des questions persistent encore sur le cœur solaire et sur l'interaction entre le champ magnétique de la région radiative et celui de la région convective.

Gérard Thuillier, du Service d'Aéronomie du CNRS, à Verrières-le-Buisson, a ensuite exposé les principaux forçages climatiques et les mécanismes possibles de l'impact climatique du soleil. Il n'existe pas d'accord général pour les reconstitutions de l'éclairement solaire total pour le passé, mais de nouveaux projets sont en cours afin de fournir de nouvelles données. Ainsi, Gérard Thuillier nous a présenté l'expérience PICARD dont l'objectif est de mesurer l'irradiance solaire totale ainsi que le diamètre du soleil, ces deux paramètres étant peut-être liés. Cette expérience embarquée devrait être mise en orbite l'année prochaine dans les conditions idéales de développement du prochain cycle solaire, le cycle 24.

Thierry Dudok de Wit, du Laboratoire de Physique et Chimie de l'Environnement et de l'Université d'Orléans, a montré quels sont les impacts de l'activité du Soleil sur l'environnement de la planète Terre, en termes de bombardement de particules et d'émissions d'ondes électromagnétiques notamment. Il a également insisté sur la composante ultraviolette (UV) de ces émissions, qui présente une variabilité bien supérieure à celle de l'irradiance totale, et dont l'impact sur la stratosphère (*via* la formation de l'ozone) pourrait représenter un mécanisme important.

Olivier Boucher, de l'Office Météorologique Britannique (Meteorological Office, Hadley Centre), a expliqué comment les modèles actuels du climat prennent en compte les interactions internes au système climatique basées sur les cycles biogéochimiques, notamment le cycle du carbone. Ces modèles sont utilisés pour réaliser des projections des changements climatiques sur le prochain siècle, notamment dans le cadre du GIEC. Ces modèles prévoient ainsi que ces interactions amplifient un réchauffement dû aux gaz à effet de serre, plutôt que de le limiter.

Claudia Stubenrauch, du Laboratoire de Météorologie Dynamique du CNRS et de l'École Polytechnique, a exposé les principales propriétés radiatives des nuages et les différents moyens de mesure de ces propriétés à l'échelle globale. Les nuages jouent des rôles importants mais complexes dans le système climatique. En outre, il a été proposé que leur formation pourrait être influencée par l'activité du Soleil, il est donc capital d'avoir des mesures aussi complètes que possible de cette composante. Claudia Stubenrauch a ainsi montré que les différents types de mesures par satellites sont complémentaires et doivent être associées afin d'avoir une information complète sur les différents nuages et leurs propriétés.

Enfin, Sandrine Bony-Léna, du même Laboratoire de Météorologie Dynamique, a montré comment les modèles climatiques permettent de mieux comprendre la réponse du climat à une perturbation externe (sensibilité du climat à un forçage). En particulier, les modèles permettent de décomposer cette réponse entre les différentes interactions propres au système climatique. Un des résultats importants est de limiter la contribution des nuages à environ un quart de la réponse globale

du climat. Ainsi, même si l'activité solaire jouait un rôle *via* ces nuages, cette composante du climat ne pourrait amplifier les variations de l'activité solaire de manière plus importante.

Cette journée consacrée aux variations climatiques et au rôle du Soleil et autres forçages externes fut l'occasion de réunir des scientifiques appartenant à différentes communautés, mais dont les objectifs de recherche se rejoignent. Ce colloque a permis de faire le point sur l'état des connaissances actuelles et des nombreuses questions qui subsistent encore.

Les séminaires de l'année 2007-2008

En complémentarité avec les douze cours (à Paris, Chicago, Kiel, Utrecht-Texel, Bruxelles et Cambridge), neuf séminaires ont été organisés dont la liste est donnée ci-dessous par ordre chronologique.

Dans le cadre du colloque intitulé « Climats du passé et du futur » organisé le 13 février 2008 au Palais des Académies de Belgique (Bruxelles) en collaboration avec l'Université Libre de Bruxelles :

- André Berger (Université Catholique de Louvain, Belgique) « Notre exceptionnellement long interglaciaire ».
- Roland Souchez (Université Libre de Bruxelles, Belgique) « Isotopes des gaz dans la glace et changements climatiques ».

Dans le cadre du colloque intitulé : « Variations climatiques : rôle du Soleil et des autres forçages externes » organisé le 30 mai 2008 à Paris (Amphithéâtre Marguerite de Navarre) :

- Edouard Bard (Collège de France) « Perspectives historiques et paléoclimatiques ».
- Sylvaine Turck-Chièze (Laboratoire Plasmas Stellaires et Astrophysique Nucléaire du CEA, Saclay) « Fonctionnement du Soleil et origines de sa variabilité ».
- Gérard Thuillier (Service d'Aéronomie du CNRS, Verrières-le-Buisson) « Les forçages externes du système climatique et l'expérience PICARD ».
- Thierry Dudok de Wit (Laboratoire de Physique et Chimie de l'Environnement, CNRS et Université d'Orléans) « Relations Soleil-Terre et le rôle de la composante UV ».
- Olivier Boucher (Meteorological Office, Hadley Centre, Angleterre) « Cycles biogéochimiques et rétroactions climatiques ».
- Claudia Stubenrauch (Laboratoire de Météorologie Dynamique, CNRS, Ecole Normale Supérieure, Ecole Polytechnique) « Propriétés des nuages et leur variabilité à partir des observations spatiales ».
- Sandrine Bony-Léna (Laboratoire de Météorologie Dynamique, CNRS, Ecole Normale Supérieure, Ecole Polytechnique) « Modélisation de la réponse du climat à un forçage externe ».

Autres cours et conférences de l'année 2007-2008

Aix-en-Provence, 3 décembre 2007. Europôle de l'Arbois : « Variations climatiques naturelles et anthropiques ».

Aix-en-Provence, 22 janvier 2008. Institut d'Etudes Politiques : « Notre société face au climat ».

Lamont-Doherty Earth Observatory de l'Université Columbia New York, 22 mai 2008 : « Paleomonsoon records viewed from the ocean ».

Paris, 26 juin 2008. Sénat OPECST (Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques) : « L'enjeu de la multidisciplinarité pour comprendre le changement climatique ».

Activités de recherches

Cette année, l'équipe de la Chaire de l'Évolution du Climat et de l'Océan a poursuivi son étude de la variabilité solaire à long terme et de son impact sur le climat mondial.

Nos recherches à ce sujet sont fondées sur la comparaison d'enregistrements totalement indépendants : le ^{14}C mesuré dans les cernes d'arbres et le béryllium 10 analysé dans les glaces de l'Antarctique (^{14}C et ^{10}Be sont deux cosmonucléides formés dans la haute atmosphère). Ces séries ont permis, d'une part, de retrouver les périodes de faible activité solaire déjà connues des astronomes grâce aux comptages des taches solaires et aux observations directes d'aurores boréales, et d'autre part, de mettre en évidence des minima solaires encore plus anciens. Notre reconstitution de l'irradiance solaire sur 1 000 ans a été choisie par les modélisateurs du climat comme courbe de forçage « étalon » (cf. p. 479 du rapport IPCC-GIEC 2007). Cette étude est en cours d'extension pour les sept derniers millénaires (comparaison de la courbe ^{14}C INTCAL04 avec les données ^{10}Be de la carotte de glace de Vostok en Antarctique Central ; collaboration avec le CSNSM et le LSCE).

Les mesures de ^{10}Be peuvent maintenant être faites au CEREGE à l'aide du nouvel accélérateur de 5MV ASTER installé sur le campus de l'Arbois à Aix-en-Provence. La chimie préparative du béryllium (extraction et purification) est réalisée dans le laboratoire de la chaire de l'évolution du climat et de l'océan (bâtiment Trocadéro de l'Arbois). L'équipe est impliquée dans le programme de mesure du ^{10}Be sur une nouvelle carotte de glace. Le forage de Dôme Talos, site proche de la mer de Ross, a atteint 1 619,20 m de profondeur. La glace formant le fond du forage est très ancienne, et d'après une première datation, la carotte couvre les derniers 65 000 ans à une profondeur de 1 300 m. Le forage a été échantillonné pour les mesures du ^{10}Be et les échantillons de glace sont stockés dans un entrepôt frigorifique à proximité du CEREGE. Ce forage au Dôme Talos a été réalisé dans le cadre du projet TALDICE mené principalement par une collaboration franco-italienne. Le projet reçoit un soutien national de l'INSU (programme LEFE Talos Dome) et de l'IPEV pour la logistique polaire.

Publications

2008

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, 230-236 (2008).

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, doi : 10.1029/2007GC001904, 1-16 (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, 302-307 (2008).

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, 3118-3133 (2007).

BLANCHET C.L., THOUVENY N., VIDAL L., LEDUC G., TACHIKAWA K., BARD E., BEAUFORT L. Terrigenous input response to glacial/interglacial climatic over southern Baja California : a rock magnetic approach. *Quaternary Science Reviews*, sous presse.

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., MENOT 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, GB4008, doi:10.1029/2006GB002852, 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).

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

BARD E. Les variations climatiques du passé et de l'avenir, in « Les géosciences au service de l'Homme : comprendre l'avenir », éditions Hirli, 177-195 (2007).

Collectif. « Quel temps fera-t-il demain ? », éditions Tallandier, 107-120 ; 167-174 (2007).

BARD E. Bac to basics : l'effet de serre. *La Recherche*, hors-série n° 3, 46-53 (2007).

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

L'Echo (Belgique), p. 11, 24 avril 2008. La paléoclimatologie nous parle.

La Libre Belgique, p. 17, 14 février 2008. Accepter des actions qui nous coûtent.

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

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

Conférences dans le cadre de colloques internationaux

Londres, 8-10 janvier 2008 : Quaternary Research Association Annual Meeting (Royal Geographical Society). BARD E. The Wiley Lecture : The last deglaciation and its impacts in the North Atlantic and adjoining seas.

Cambridge et Londres (Royal Society), 10-13 mars 2008, The Leverhulme Climate Symposium 2008. BARD E. The solar variability.

Vienne, 13-18 avril 2008 : European Geosciences Union General Assembly.

— BÖNING P., BARD E. Millennial scale thermocline ventilation changes in the Indian Ocean as implied from aragonite preservation in the Arabian Sea.

— CAMOIN G., SEARD C., DESCHAMPS P., DURAND N., YOKOYAMA Y., MATSUZAKI H., WEBSTER J., BRAGA J.C., BARD E., HAMELIN B. Reef accretion during the post-glacial sea-level rise at Tahiti (French Polynesia) : I.O.D.P. #310 expedition « Tahiti sea level ».

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

— FELIS T., ASAMI R., BARD E., CAHYARINI S.Y., DESCHAMPS P., DURAND N., HATHORNE E., KÖLLING M., PFEIFFER M. Pronounced interannual variability in South Pacific temperatures during the early deglacial — coral-based results from IODP Expedition 310.

— LEDUC G., VIDAL L., CARTAPANIS O., BARD E. Modes of Eastern Equatorial Pacific thermocline variability : implications for ENSO dynamics over the last glacial period.

— NAUGHTON F., SANCHEZ GONI M.F., KAGEYAMA M., BARD E., DUPRAT J., CORTIJO E., MALAIZÉ B., JOLY C., ROSTEK F., TURON J.-L. Alternative mechanisms explaining the complex pattern of Heinrich events in the North Atlantic mid-latitudes.

— THOMAS A.L., HENDERSON G.M., DESCHAMPS P., YOKOYAMA Y., BARD E., HAMELIN B., DURAND N., CAMOIN G. Lowstand sea levels from U-Th dating of pre-LGM corals : results from IODP expedition 310 « Tahiti sea level ».

Vancouver, 13-18 juillet 2008, Goldschmidt Conference.

— THOMAS A.L., HENDERSON G.M., DESCHAMPS P., YOKOYAMA Y., BARD E., HAMELIN B., DURAND N., CAMOIN G. The timings of sea level change during the last glacial cycle, from U/Th dating of submerged corals : Results from IODP expedition 310 « Tahiti sea level ».

Responsabilités diverses :

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

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).

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

Membre de la délégation du gouvernement français accompagnant le Ministre J.-L. Borloo à la Conférence sur le Changement Climatique des Nations Unies (Bali, Indonésie, décembre 2007).

Participant à la table ronde sur le climat en présence du Président N. Sarkozy et du Prince Albert II (Monaco, 25 avril 2008).

Participant à l'audition au Sénat (OPECST) au sujet de la création d'un observatoire de l'Arctique (Paris, 26 juin 2008).

Distinction

2008, Wiley Lecture de la Quaternary Research Association (Royal Geographical Society, Londres),