

Évolution du climat et de l'océan

M. Édouard BARD, professeur

Forçages externes du système climatique

Le cours de cette année était consacré aux variations des processus qui influencent le climat et dont les causes sont reliées à des phénomènes extérieurs à la terre. Une attention particulière a été portée à la variabilité solaire, des dernières décennies jusqu'à plusieurs millénaires. Après avoir étudié ce que l'on sait avec une relative exactitude, j'ai ensuite abordé certaines études et controverses récentes au sujet d'enregistrements de l'activité solaire sur plus de dix mille ans et sur l'hypothèse d'un forçage climatique direct des rayons cosmiques modulés par le soleil. J'ai ensuite étudié les théories actuelles fondées sur la variation des paramètres de l'orbite terrestre et leur influence sur l'insolation en fonction des latitudes et des saisons. Des développements ont été abordés au sujet de l'influence climatique de la lune à court et long terme. J'ai terminé ce cours en faisant le point sur certains débats récents au sujet de l'influence de l'inclinaison de l'orbite sur les flux de poussières extraterrestres et sur l'hypothèse de l'impact climatique à long terme de la rotation de notre galaxie.

Pendant de nombreuses années, l'énergie rayonnée par le soleil était supposée invariable. D'où l'utilisation du terme de « constante solaire » introduite par Claude Pouillet en 1838. Néanmoins, certains doutaient de cette stabilité en invoquant des corrélations troublantes entre des fluctuations de l'activité solaire et des phénomènes atmosphériques mal expliqués. Les recherches sur les mécanismes de l'influence solaire sur le climat bénéficient d'un formidable regain d'attention, non sans controverses. Il est clair que l'activité solaire varie selon différentes échelles de temps. Un témoin de ces fluctuations est la variation du nombre de taches solaires selon des cycles de onze ans. Grâce aux mesures réalisées par les sondes spatiales, il est maintenant clair que la « constante solaire » fluctue elle aussi à court terme et que le cycle de onze ans se caractérise par une variation de l'éclairement total d'environ 0,1 %. Paradoxalement, l'éclairement augmente avec le nombre de taches solaires : les taches assombrissent le

soleil, mais leur effet est masqué par celui des zones brillantes qui leur sont associées. Plusieurs équipes d'astrophysiciens ont développé des modèles pour traduire les observations de l'activité solaire en termes d'éclairement. Leurs travaux ont permis d'estimer que l'éclairement solaire varie également à long terme, avec des périodes de faible éclairement qui correspondent à des baisses d'activité du soleil.

Nous ne disposons de données que pour les quatre derniers siècles, et aucune observation astronomique fiable ne permet de quantifier l'éclairement solaire avant l'invention de la lunette astronomique. Il est cependant possible de reconstituer l'activité magnétique du soleil (reliée à l'éclairement) en étudiant l'abondance sur terre de certains isotopes, les cosmonucléides. Ces derniers se forment par interaction du rayonnement cosmique (surtout des protons) avec les molécules de l'atmosphère, et leur production est modulée par l'intensité du champ magnétique solaire. Les géochimistes mesurent l'abondance des cosmonucléides dans des « archives naturelles » : les glaces polaires (pour le béryllium 10 et le chlore 36), les anneaux d'arbre ou les coraux (pour le carbone 14). Les fluctuations de l'éclairement ainsi reconstituées sont en bon accord avec celles établies à partir des enregistrements du nombre de taches solaires. Le principal enseignement de ces études est que les minima d'éclairement sont nombreux et que le soleil a passé une partie importante des derniers millénaires en phase calme, avec probablement un éclairement plus faible que la valeur actuelle de 1 368 watts par mètre carré.

Pour certains chercheurs, l'éclairement solaire augmenterait actuellement. Cette tendance est, à l'heure actuelle, imprécise et controversée. Pour obtenir une bonne estimation il faut pouvoir comparer l'éclairement pendant les minima du cycle solaire de 11 ans car les maxima d'activité se caractérisent par une extrême variabilité de haute fréquence liée à la présence des taches et à la rotation du soleil. Or l'analyse récente de Willson & Mordvinov ne tient que sur la comparaison des deux minima de 1986 et 1997. Il faut aussi noter que les différentes bases de données disponibles sont assez fragmentaires et qu'elles doivent d'abord être homogénéisées et corrigées de plusieurs facteurs, pour certains liés à la dégradation des capteurs dans l'espace. Pour l'instant, il existe essentiellement deux reconstitutions : celle de Willson & Mordvinov qui montrerait une augmentation annuelle de 0,005 % de l'éclairement et l'autre, sans tendance à long terme, établie par Lean & Fröhlich. Il faudra probablement attendre le prochain minimum vers 2008 pour trancher entre ces deux interprétations.

Certains chercheurs ont remis au goût du jour une hypothèse déjà ancienne au sujet de l'influence du rayonnement cosmique sur les nuages. On peut faire le parallèle, simpliste, avec le principe de la « chambre à brouillard », ancien détecteur de physique des particules dans lequel les ions produits par les interactions des particules ionisantes avec le gaz se comportent comme des germes de condensation le long des trajectoires. L'hypothèse défendue par les chercheurs met en avant la modulation du rayonnement cosmique par le champ magnétique du vent

solaire : un minimum d'activité du soleil va de pair avec une augmentation du rayonnement cosmique sur terre, et provoquerait une augmentation de la nébulosité. Cette théorie a fait grand bruit en 1997 lorsqu'une équipe danoise a signalé une corrélation positive entre la couverture nuageuse et l'intensité du rayonnement cosmique modulé par le soleil pour la période 1984-1991. Mais aucune étude ultérieure n'est venue confirmer cette correspondance. Qui plus est, les données régionales concernant les États-Unis montreraient même une corrélation opposée à celle proposée par les Danois.

Il est important de souligner que l'hypothèse est encore très mal quantifiée à plusieurs niveaux : relation entre les rayons cosmiques et les noyaux de condensation, variation temporelle et spatiale de la modulation solaire... L'impact climatique des nuages dépend aussi fortement de leurs propriétés radiatives et notamment de leur altitude. La modulation solaire envisagée par les Danois devrait induire une diminution des nuages de haute altitude aux hautes latitudes, lors d'une période de forte activité solaire. Or ces nuages de haute altitude ont en fait globalement tendance à réchauffer le climat, et non à le refroidir comme le font les nuages de basse altitude. L'hypothèse serait donc incompatible avec l'apparente corrélation entre l'activité solaire et le réchauffement mondial. Les chercheurs danois ont ensuite modifié leur analyse et proposent désormais une influence solaire limitée aux nuages de basse altitude dont la couverture semblerait mieux suivre les fluctuations solaires. Bien que les auteurs présentent quelques hypothèses de travail, cette nouvelle proposition semble un peu paradoxale car on s'attend plutôt à un effet solaire maximum pour la partie haute de l'atmosphère et non pour sa partie la plus basse dans laquelle les noyaux de condensation ne manquent pas. Les données sur les prochains cycles solaires nous diront donc si cette piste est vraiment sérieuse. Pour l'instant, les mécanismes physico-chimiques d'un éventuel effet du rayonnement cosmique sur la formation des nuages restent très mal compris.

Les variations de l'inclinaison de l'axe de rotation de la terre et des caractéristiques de son orbite ont suffi à modifier la répartition en latitudes, et selon les saisons, de l'énergie reçue du soleil et ainsi provoquer la succession de périodes glaciaires reconstituées par les paléoclimatologues. L'excentricité de l'orbite caractérise sa forme elliptique et varie suivant des cycles d'environ 100 000 et 400 000 ans. L'obliquité est l'inclinaison de l'équateur terrestre par rapport au plan de l'écliptique, définissant ainsi les latitudes des tropiques et des cercles polaires. L'obliquité vaut aujourd'hui $23^{\circ}27'$ et fluctue entre 22° et 25° avec une période moyenne de 41 000 ans. La précession positionne les saisons par rapport aux axes de l'orbite et suit un cycle moyen d'environ 22 000 ans. Ce mouvement lent trouve son origine dans le fait que la terre n'est pas une sphère parfaite, mais elle possède un bourrelet équatorial sur lequel agissent l'attraction gravitationnelle du soleil, de la lune et des autres planètes. Ces forces tendent à ramener le bourrelet équatorial dans le plan de l'écliptique et donc génèrent cette oscillation. La conséquence directe est une avance des équinoxes d'environ une vingtaine

de minutes chaque année. Dans l'hémisphère nord, l'hiver a lieu aujourd'hui quand notre planète est la plus proche du soleil et inversement, la terre est la plus éloignée du soleil durant l'été de l'hémisphère nord. Il y a 11 000 ans, c'était le contraire. Comme l'avait déjà calculé Milutin Milankovitch, ces variations des paramètres orbitaux provoquent de grandes fluctuations de l'insolation aux différentes latitudes et pour les différentes saisons. Le facteur crucial de sa théorie climatique est l'insolation d'été aux hautes latitudes de l'hémisphère nord : un été relativement froid permettant la préservation de la neige d'une année sur l'autre ce qui amorce l'accumulation d'une calotte de glace. Ce processus s'accélère de lui-même car la neige réfléchit les rayons du soleil et contribue à l'accumulation de glace.

Les séminaires de l'année 2004-2005

L'année académique de la chaire avait bien démarré avec la préparation et le déroulement du symposium des 12 et 13 octobre 2004. Cette rencontre intitulée « L'Homme face au climat » a remporté un franc succès. Le symposium a réuni des chercheurs des disciplines physico-chimiques, biologiques et environnementales, ainsi que des spécialistes en sciences humaines. Les différentes conférences ont permis aux chercheurs et au public d'avoir une vue élargie et multidisciplinaire du problème et d'engager une réflexion réaliste et diversifiée sur les rapports qu'entretient l'Homme avec son environnement façonné par le climat.

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

2 février 2005 (Université Autonome de Barcelone) : Antoni Rosell-Melé (ICREA et UAB)

« A historical perspective on global warming and the role of greenhouse gases in climate change »

2 février 2005 (Université Autonome de Barcelone) : Graham Mortyn (UAB)
« Causes and consequences of the El Niño/Southern Oscillation (ENSO) climate phenomenon »

8 avril 2005 : Édouard Bard
« How harsh was the last ice age ? A review on climate data for the last glacial maximum »

8 avril 2005 : Bette Otto-Bliesner (National Center for Atmospheric Research, Colorado, USA)
« The glacial world : Carbon dioxide and the ocean circulation play major roles »

8 avril 2005 : Johan Nilsson (Department of Meteorology, Stockholm University, Sweden)
« The effect of vertical mixing on ocean heat transports »

8 avril 2005 : Ray Pierrehumbert (University of Chicago, USA)

« Atmospheric mechanisms of interhemispheric and tropical-intertropical coupling »

8 avril 2005 : Amy Clement (RSMAS, University of Miami, Florida, USA)

« Global Controls on the Tropical Pacific Warm Pool and Implications for the Glacial Climate »

8 avril 2005 : Gilles Ramstein (LSCE CEA-CNRS Gif-sur-Yvette, France)

« Is it possible to infer from a hierarchy of models, the mean climate and variability during glacial times ? »

8 avril 2005 : Paul Valdes (University of Bristol, UK)

« Earth System Modelling of the Last Glacial Maximum »

Activités de recherches

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

Les concentrations et les flux massifs de matière organique marine dans les sédiments ne donnent qu'une idée qualitative de la productivité biologique de surface. En effet, la préservation de composés organiques dépend des conditions ambiantes dans la colonne d'eau, en particulier sa teneur en oxygène. Les zones océaniques à forte productivité biologique sont caractérisées par un déficit prononcé en oxygène dans les eaux de profondeurs intermédiaires (environ 300 à 1 000 m). Ce déficit d'oxygène résulte d'un équilibre entre la dégradation par oxydation de la matière organique en sédimentation et la recharge par advection de masses d'eaux plus riches en oxygène. Les changements de circulation océanique peuvent donc aussi avoir joué un rôle supplémentaire dans la genèse des enregistrements.

Cette année l'équipe de la Chaire d'Évolution du Climat et de l'Océan a focalisé son attention sur le nord de la mer d'Arabie qui est le siège d'un minimum en oxygène étendu et stable. À l'échelle annuelle, son intensité est largement contrôlée par l'amplitude des moussons d'été et d'hiver. Nous avons donc participé à l'organisation et à l'expédition en mer MD143 CHAMAK du

Marion Dufresne. Celle-ci s'est déroulée en septembre-octobre 2004 de Kor El Fakhhan (Émirats Arabes Unis) à Mascate (Oman). Plusieurs carottes de sédiments ont été prélevées au large du Pakistan. En particulier, deux longues carottes de type Calypso, caractérisées par des taux de sédimentation élevés, constituent le centre d'intérêt de nos études actuelles. Il s'agit d'une carotte prélevée à 2 200 m de profondeur au nord de Murray Ridge, et d'une seconde carotte prélevée à 830 m de profondeur sur la marge du Pakistan, dans la zone de minimum en oxygène. Cette dernière montre des séquences de sédiments laminés. Ces séries sédimentaires sont aisément datables et représentent donc de précieuses archives climatiques.

Afin de reconstituer la variabilité de l'activité des moussons et de l'intensité du minimum en oxygène, nous avons engagé une étude multi-marqueurs géochimiques et micropaléontologiques dont les objectifs principaux sont les suivants : premièrement, reconstituer la chronologie des événements de manière à identifier les forçages et les réponses, deuxièmement comprendre quel facteur, de la productivité ou de la circulation océanique intermédiaire, contrôle l'intensité du minimum en oxygène, et enfin, estimer si les variations de l'intensité des moussons ont la capacité de contribuer aux changements climatiques aux échelles millénaires par des rétroactions telles que l'émission de gaz à effet de serre (en particulier N₂O).

Publications de l'équipe

2004

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

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

BARD E., MÉNOT-COMBES G., ROSTEK F. Present status of radiocarbon calibration and comparison records based on polynesian corals and Iberian Margin sediments. *Radiocarbon* 46, 1189-1203 (2004).

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

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

BORELLA S., MÉNOT-COMBES G., LEUENBERGER M. Sample homogeneity and a-cellulose extraction from tree rings for stable isotope analyses, In : *Stable Isotope Analytical techniques*, P.D. Groot (ed), Elsevier Publishing (2004).

HUGHEN K.A., BAILLIE M.G.L., BARD E., BECK J.W., BERTRAND C., BLACKWELL P.G., BUCK C.E., BURR G., CUTLER K.B., DAMON P.E., EDWARDS R.L., FAIRBANKS R.G., FRIEDRICH M., GUILDERSON T.P., KROMER B., McCORMAC G., MANNING S., BRONK RAMSEY C., REIMER P.J., REIMER R.W., REMMELE S., SOUTHON J.R., STUIVER M., TALAMO S., TAYLOR F.W., VAN DER PLICHT J., WEYHENMEYER C.E. MARINE04 marine radiocarbon age calibration 26-0 ka BP. *Radiocarbon* 46, 1059-1086 (2004).

MÉNOT-COMBES G., COMBES P.-P. et BURNS S.J. Climatic information from delta-13C in plants by combining statistical and mechanistic approaches. *The Holocene*, 14, 931-939.

PATERNE M., AYLIFFE L.K., ARNOLD M., CABIOCH G., TISNÉRAT-LABORDE N., HATTÉ C., DOUVILLE E., BARD E. Paired ^{14}C and $^{230}\text{Th}/\text{U}$ datings on surface corals from Marquesas and Vanuatu (sub-equatorial Pacific) in the 3000 to 15,000 cal yr range. *Radiocarbon* 46, 551-566 (2004).

PRABHU C.N., SHANKAR R., ANUPAMA K., TAIEB M., BONNEFILLE R., VIDAL L., PRASAD S. A 200-Ka pollen and oxygen isotopic record from two sediment cores from the eastern Arabian Sea, *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 214, 309-321 (2004).

REIMER P.J., BAILLIE M.G.L., BARD E., BAYLISS A., BECK J.W., BERTRAND C., BLACKWELL P.G., BUCK C.E., BURR G.S., CUTLER K.B., DAMON P.E., EDWARDS R.L., FAIRBANKS R.G., FRIEDRICH M., GUILDERSON T.P., HOG A.G., HUGHEN K.A., KROMER B., McCORMAC G., MANNING S., BRONK RAMSEY C., REIMER R.W., REMMELE S., SOUTHON J.R., STUIVER M., TALAMO S., TAYLOR F.W., VAN DER PLICHT J., WEYHENMEYER C.E. INTCAL04 terrestrial radiocarbon age calibration. *Radiocarbon* 46, 1029-1058 (2004).

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

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

TACHIKAWA K. and ELDERFIELD H. Chemistry of benthic foraminiferal shells for recording ocean environments : Cd/Ca, $\delta^{13}\text{C}$ and Mg/Ca. In Global environmental change in the ocean and on the land (ed. M. Shiomi, H. Kawahata, H. Koizunu, and A. Tsuda). Terrapub-Kluwer, 249-263 (2004).

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

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

VAN DER PLICHT J., BECK J.W., BARD E., BAILLIE M.G.L., BLACKWELL P.G., BUCK C.E., FRIEDRICH M., GUILDERSON T.P., HUGHEN K.A., KROMER B., McCORMAC F.G., BRONK RAMSEY C., REIMER P.J., REIMER R.W., REMMELE S., RICHARDS D.A., SOUTHON J.R., STUIVER M., WEYHENMEYER C.E. NOTCAL04 comparison-calibration ¹⁴C records 26-50 cal kyr BP. *Radiocarbon* 46, 1225-1238 (2004).

VIDAL L., ARZ H. Oceanic climate variability at Millennial time scale : modes of climate connections, in Battarbee R.W., F. Gasse and C. Stickley (Eds), Past climate variability through Europe and Africa, Kluwer Academic Pub., 25-39 (2004).

2005

BARKER S., CACHO I., BENWAY H., TACHIKAWA K. Planktonic foraminiferal Mg/Ca as a proxy for past oceanic temperatures : a methodological overview and data compilation for the Last Glacial Maximum, *Quaternary Science Reviews* 24, 821-834 (2005).

DUPONT L., DONNER B., VIDAL L., PEREZ E., WEFER G. Linking desert evolution and coastal upwelling : Pliocene climate change in Namibia, *Geology* 33, 461-464 (2005).

LICARI L. and MACKENSEN A. 2005. Benthic foraminifera off West Africa (1°N to 32°S) : Do live assemblages from the topmost sediment reliably record environmental variability ? *Marine Micropaleontology* 55, 205-233 (2005).

SILENZI S., BARD E., MONTAGNA P., ANTONIOLI F. Isotopic and elemental records in a non-tropical coral (*Cladocora caespitosa*) : Discovery of a new high-resolution climate archive for the Mediterranean Sea. *Global Planetary Change* 49, 101-127 (2005).

Textes de vulgarisation

BARD E. Neuf clés pour comprendre l'effet de serre. *La Recherche*, dossier 17, 8-13 (2004).

BARD E. Coups de Soleil sur la planète. *La Recherche*, dossier 17, 26-29 (2004).

BARD E. Le climat va-t-il basculer ? *La Recherche*, dossier 17, 34-40 (2004).

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

Conférences dans le cadre de colloques

Vienne, avril 2005 : European Geosciences Union annual meeting.

Titres des présentations :

— BARD E., MÉNOT-COMBES G., ROSTEK F. Present status of radiocarbon calibration / comparison records based on Iberian Margin sediments.

— SANCHEZ GONI M.F., SHACKLETON N.J., DUPRAT J., TURON J.L., BARD E., EYNAUD F., PEREZ FOLGADO M., PEYPOUQUET J.-P. Terrestrial and marine responses to the Dansgaard-Oeschger events in and off Iberia.

— MÉNOT-COMBES G., BARD E., ROSTEK F., SCHULTE S. Evidence for a large methane release during the last deglaciation based on diploptene and diplopterol records from Marmara Sea sediments.

— Special evening session on Recent advances in dating of Late Quaternary sediments : perspectives and problems (tenue avec NJ Shackleton and RG Fairbanks).

Responsabilités diverses

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

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

Distinction

Lauréat de la Comer Science & Education Foundation (USA) dont le montant du prix sera investi dans le cadre des travaux de la chaire de l'Évolution du climat et de l'océan.