

## Évolution du climat et de l'océan

M. Édouard BARD, membre de l'Institut  
(Académie des sciences), professeur

ENSEIGNEMENT : L'OCÉAN ET LE CHANGEMENT CLIMATIQUE ;  
VARIATIONS DE LA CIRCULATION OCÉANIQUE

Le cours a été consacré à la description des changements de l'hydrologie et de la circulation océanique en comparant systématiquement les fluctuations à long terme avec les plus récentes.

### Variations des températures de l'océan

Après une introduction sur les variations paléoclimatiques, nous avons abordé les variations récentes de la température des océans. Parallèle aux données concernant le réchauffement atmosphérique débuté depuis plus d'un siècle, les océanographes disposent d'enregistrements de la température de l'océan de surface qui remontent au XIX<sup>e</sup> siècle. Depuis les mesures « au seau » recueillies sur le pont des navires marchands de la Compagnie des Indes jusqu'au réseau international de bouées fixes et dérivantes, les techniques ont sans cesse été améliorées, et les anciennes données corrigées, afin de pouvoir cartographier les variations des isothermes océaniques.

Nous avons ensuite passé en revue les différentes techniques pour mesurer les températures en profondeur comme les sondes CTD (*Conductivity, Temperature, Depth*), les bathythermographes perdables utilisés à bord des navires marchands (sondes XBT pour *eXpendable BathyThermograph*) et les outils les plus modernes comme les milliers de flotteurs ARGO déployés depuis le début des années 2000 ou bien encore les planeurs sous-marins (*gliders*).

Une seconde partie du cours a été dédiée à la mesure des températures par imagerie spatiale. Depuis les années 60 avec les satellites de la NOAA en orbite polaire (TIROS, *Television Infrared Observation Satellite*), la température de surface est quantifiée grâce à des radiomètres mesurant le rayonnement thermique infrarouge de la surface de l'océan (5 canaux sur AVHRR) avec une résolution de l'ordre du kilomètre. Les satellites polaires sont complémentaires des satellites géostationnaires GOES (*Geostationary Operational Environmental Satellite*) et permettent de cartographier en « temps réel » la température des eaux de surface à partir d'une

compilation des multiples données. Ceci permet de visualiser la dynamique océanique avec ses nombreux « tourbillons » (par ex. les anneaux du Gulf Stream). Des problèmes comme l'effet de peau et une sensibilité à l'absorption atmosphérique (vapeur d'eau, aérosols) et aux nuages, limitent encore l'utilisation des satellites, mais des développements récents permettent d'en corriger certains. Ainsi des satellites de nouvelle génération (ATSR *Along Track Scanning Radiometer*) visualisent-ils la surface des océans à partir de deux angles permettant de supprimer les effets atmosphériques.

Toutes les données de températures acquises au cours du temps sont ensuite compilées afin de pouvoir calculer des évolutions régionales ou globales. Nous avons décrit quelques-unes des limitations des couvertures temporelles et spatiales de la base de données actuelle. Par ailleurs, des biais systématiques ont été mis en évidence récemment pour certains outils de mesure (notamment les XBT) ce qui nécessite des calibrations soignées et des corrections méticuleuses.

Le résultat principal de ces études est que, à l'échelle du siècle, pratiquement toutes les régions de l'océan de surface se sont réchauffées. La courbe de la température moyenne de surface à l'échelle mondiale montre une évolution similaire à celle des températures atmosphériques avec une tendance d'environ 1 °C sur le dernier siècle. La comparaison des anomalies de température océanique des satellites avec les mesures *in situ* montre que la variabilité interannuelle est dominée par l'oscillation ENSO (*El Niño Southern Oscillation*). Ce phénomène couplant l'atmosphère et l'océan Pacifique, est caractérisé par une inversion des gradients de pression atmosphérique (alizés, circulation de Walker), une migration vers l'Est des zones chaudes océaniques, et des pluies et un affaiblissement des remontées d'eau froide (*upwellings*) sur la côte sud-américaine. Le phénomène ENSO domine aussi la variabilité interannuelle de la température atmosphérique, notamment sous les tropiques.

Les mesures de températures *in situ* montrent que le réchauffement progresse dans l'océan par diffusion de la chaleur et par advection océanique. Le réchauffement est particulièrement marqué dans le premier kilomètre en Atlantique et dans la zone australe, mais une grande incertitude subsiste pour l'océan profond qui se serait réchauffé faiblement. Les données de température permettent de calculer l'évolution du stockage énergétique de l'océan qui est de plus de 200 zettajoules ( $2.10^{23}$  J) depuis les années 70. En fait, l'océan stocke l'essentiel ( $\approx 90\%$ ) de la chaleur excédentaire à cause de son grand volume et de la capacité thermique massique de l'eau. En connaissant l'évolution du stockage énergétique de l'océan, il est possible de calculer son équivalent en expansion thermique, qui correspond à peu près au tiers (1,1 mm/an) de la montée du niveau marin observée depuis 20 ans (environ 3,3 mm/an) par les satellites altimétriques (TOPEX-Poseidon, JASON) et les marégraphes.

## Changements des salinités de l'océan

Après la température, nous avons considéré la salinité des océans. Ce paramètre hydrologique représente la concentration en sels ioniques dissous dans l'eau de mer dont la mesure traditionnelle par voie chimique a été supplantée par une mesure (et une définition) de conductimétrie.

En plein océan, la salinité de surface est contrôlée principalement par l'évaporation et les précipitations, elles-mêmes liées aux conditions atmosphériques régionales. Par ailleurs, la circulation atmosphérique maintient des gradients importants entre des bassins océaniques, comme entre l'Atlantique nord qui est plus salé que le Pacifique nord aux mêmes latitudes. Un flux net de vapeur d'eau entre l'Atlantique et le Pacifique est compensé par une circulation en profondeur de masses d'eau salée depuis l'Atlantique nord. La distribution de la salinité de l'océan permet ainsi d'identifier les masses d'eau et leurs mouvements.

Des capteurs de conductivité équipent différents types d'outils comme les sondes CTD des océanographes, les thermosalinographes sur les navires marchands, les bouées fixes et dérivantes ainsi que plus récemment les flotteurs ARGO et les *gliders*. Comme pour les températures, les compilations historiques montrent une concentration des données sur les routes des navires marchands, laissant encore de nombreux vides dans les cartographies mensuelles.

Ce n'est que récemment que la NASA et l'ESA ont développé des satellites capables de cartographier les salinités de l'océan. La méthode est fondée sur la mesure de l'énergie des micro-ondes de la raie L de l'hydrogène (fréquence de 1,4 GHz et longueur d'onde de 21 cm) qui dépend de la salinité, mais aussi de la température et de l'état de surface de l'océan (rugosité elle-même corrélée à la vitesse du vent). Observer la Terre dans la plage micro-ondes en bande L nécessite soit une grande antenne soit un radiomètre interférométrique doté de plusieurs petits récepteurs capables de mesurer la différence de phase du rayonnement incident. Ce sont les deux options qui ont été choisies respectivement par la NASA pour son satellite Aquarius lancé en 2011 et par l'ESA pour le satellite SMOS lancé en 2009.

La compilation des données récentes montre que les salinités de surface ont changé au cours des cinq dernières décennies, avec notamment une augmentation du contraste entre l'Atlantique nord et le Pacifique nord. L'analyse des salinités en fonction de la profondeur révèle aussi des changements cohérents en Atlantique, même si certaines zones présentent des évolutions temporelles complexes liées par exemple à des plongées intermittentes d'eau profonde en mer du Labrador.

Au premier ordre, l'observation majeure est une augmentation systématique du contraste de salinité entre les gyres subtropicales et les zones de plongée d'eaux profondes et intermédiaires aux plus hautes latitudes. À l'échelle de l'océan mondial, les contrastes indiquent un transfert net d'eau douce des tropiques vers les hautes latitudes, constituant la signature d'une intensification du cycle hydrologique. Pour l'Atlantique nord, le bilan quantitatif du stockage de la chaleur et du flux d'eau douce au cours des 50 dernières années est cohérent avec la formule de Clausius-Clapeyron reliant la pression de vapeur saturante en fonction de la température. En d'autres termes, tout se passe comme si le réchauffement augmentait la teneur en eau de l'atmosphère, conduisant à une intensification du cycle hydrologique.

### Variations de la ventilation des océans

La teneur en oxygène dissous de l'eau de surface varie principalement en fonction de la solubilité et donc de sa température. Dès qu'une masse d'eau a quitté la surface, la teneur en  $O_2$  diminue à cause de la respiration microbienne. La mesure de la teneur en  $O_2$  est réalisée par la méthode de Winkler (titration de l'iode formé par oxydation d'un précipité de manganèse) ou par mesure du courant électrique de

la diffusion d'O<sub>2</sub> à travers une membrane (sonde CTD permettant une haute résolution spatiale). Comme pour la salinité, la distribution d'O<sub>2</sub> permet d'identifier les masses d'eau et leurs mouvements. L'océan est aussi caractérisé par des zones déficitaires en oxygène (OMZ) vers 400 m de profondeur (suboxie voire anoxie) qui sont liées au maximum de reminéralisation de la matière organique par les bactéries.

Dans le contexte du réchauffement actuel, plusieurs phénomènes ont tendance à renforcer les OMZ : solubilité en baisse, stratification des eaux de surface, baisse de la convection profonde auxquelles s'ajoute une eutrophisation côtière pour certaines zones affectées par les rejets des fleuves. Les données d'O<sub>2</sub> compilées depuis plus de 50 ans montrent clairement une diminution d'O<sub>2</sub> des eaux intermédiaires (notamment le Pacifique équatorial) ayant pour conséquences de « creuser » les OMZ et d'étendre verticalement et horizontalement ces zones déficitaires. Quelques études suggèrent déjà un impact sur les organismes marins, notamment sur les espèces préférant les eaux bien oxygénées (par ex. le marlin bleu de l'Atlantique).

### Évolutions des banquises de l'Arctique et de l'Antarctique

L'eau de mer gèle quand la température de surface descend en dessous de -1,8° C. La glace de mer prend différents aspects depuis des cristaux disséminés dans l'eau de mer (*frazil*), en passant par la glace « en crêpes » jusqu'à la formation d'une banquise pluriannuelle de plusieurs mètres d'épaisseur. L'étendue de la glace de mer varie largement en fonction des saisons : de 6 à 16 millions de km<sup>2</sup> en mer arctique et de 3 à 20 millions de km<sup>2</sup> autour du continent antarctique.

La banquise a une influence sur le climat régional et global, notamment en raison de son coefficient d'albédo élevé qui lui permet de réfléchir les rayons du Soleil et d'éviter que ceux-ci ne réchauffent directement l'océan sous-jacent. La banquise limite aussi les échanges de chaleur et de gaz entre l'océan et l'atmosphère. D'autres effets importants sont liés à la congélation de l'eau de mer et à la fonte saisonnière. Les zones concernées sont caractérisées par une stratification de surface avec formation d'une couche froide et peu salée (halocline froide). La formation de glace de mer s'accompagne du rejet du sel et de la formation de saumures qui plongent en profondeur. Comme on le voit, de nombreux phénomènes climatiques et hydrologiques sont liés à la glace de mer, conduisant à des effets de rétroaction sur le climat régional.

La banquise affecte aussi la distribution des organismes du plancton, certains étant adaptés à la zone de variations saisonnières d'englacement. On peut citer les dinoflagellées, les diatomées et les radiolaires dont les restes minéraux ou organiques préservés dans les sédiments permettent de cartographier d'anciennes positions de la banquise. Ces études montrent des variations très significatives dans les zones arctiques et antarctiques pendant la période glaciaire. Par contre, les premiers essais de reconstitution de l'extension de la banquise arctique sur le dernier millénaire indiquent de faibles variations, encore très imprécises.

Sur la période récente, les informations les plus complètes sont obtenues par les satellites mesurant l'extension et l'épaisseur de la banquise. On peut citer notamment AMSR-E, avec des mesures passives des micro-ondes (2002-11), QuikSCAT, avec un radar micro-onde (1999-09), ICESat, par altimétrie lidar (2003-10) et CryoSat-2, réalisant de l'altimétrie par radar (2005+2010-).

Les compilations de données montrent une diminution significative de l'extension des glaces arctiques depuis 1978 (déviations par rapport à la moyenne mensuelle d'environ - 4 % par décennie). Cette diminution a débuté au début des années 70, comme le montre la série complétée par des observations de terrain depuis les années 50. Les variations d'autres paramètres confirment la tendance en Arctique, notamment l'allongement de la période de fonte de la banquise, ainsi que le recul de la banquise pluriannuelle cartographiée par les satellites micro-ondes (ex. AMSR-E) et altimétriques (par ex. ICESat, CryoSat, mesurant l'épaisseur de la banquise). La déclassification des mesures par sonar des sous-marins militaires américains permet aussi de détecter la diminution de moitié de l'épaisseur de la banquise depuis les années 80.

Nous avons considéré les mêmes types de données pour la banquise australe, notamment celles mesurées par les satellites. Le résultat principal est que, depuis 1978, on ne détecte pas d'évolution relative aussi importante que pour la banquise de l'hémisphère nord.

### **Variations des circulations superficielle et profonde**

Plusieurs types de capteurs permettent de mesurer la vitesse des courants marins, en particulier les courants superficiels rapides liés à la tension du vent à la surface de l'eau et à la force de Coriolis. On peut citer les courantomètres à rotors, les courantomètres à effet Doppler, différents types de flotteurs dérivants... La surface de l'océan est « bosselée » en permanence à cause de la circulation océanique. Cette topographie dynamique peut être cartographiée aujourd'hui en combinant les données des satellites altimétriques et gravimétriques. La topographie dynamique est particulièrement variable dans le temps au niveau des courants de bords ouest (instabilités & tourbillons) et au niveau du courant circumpolaire Antarctique.

En plus d'une variabilité à hautes fréquences, les séries océanographiques semblent indiquer des évolutions à plus long terme. Nous avons considéré l'augmentation de la hauteur dynamique de la zone australe en réponse à l'augmentation des vents d'ouest ainsi que la migration vers le sud des fronts associés au courant circumpolaire antarctique. Nous avons ensuite fait le point sur les variations des échanges entre les océans Indien et Atlantique au niveau de la réflexion du Courant des Aiguilles, au sud du continent africain. Au cours des 20 dernières années, les données montrent un doublement des flux d'eau, de sel et de chaleur qui constituerait la signature de la migration vers le sud des vents d'ouest. Un autre exemple de tendance récente, celui-ci à l'ouest de l'Atlantique sud, est la migration vers le sud de la zone de confrontation entre les courants du Brésil et des Malouines.

En Atlantique nord, les données des satellites et des courantomètres indiquent une baisse d'intensité du gyre subpolaire et de la vitesse des courants de surface associés. Dans les mers nordiques, les océanographes observent des variations cohérentes de la température et de la salinité correspondant à un transport de masses d'eau. La variabilité décennale est en partie liée à l'oscillation nord-atlantique (NAO). Cette oscillation naturelle se caractérise par une variation de l'intensité et de la localisation des dépressions traversant l'Atlantique d'est en ouest. En modulant les effets respectifs des gyres subtropical et subpolaire, la NAO contrôle en partie la variabilité des courants observée en Atlantique nord. L'étude de sédiments récents du bassin d'Islande confirme cette corrélation entre courants et NAO pour les deux derniers siècles.

La variabilité de la circulation profonde est plus difficile à estimer car elle nécessite des mesures *in situ* de courants plus lents que ceux de la surface. En Atlantique nord, il est possible d'étudier les différentes composantes de l'eau profonde nord-atlantique (NADW) en mesurant la vitesse par courantométrie de l'eau dense passant au dessus des seuils topographiques entre l'Islande et l'Écosse et entre l'Islande et le Groenland (détroit du Danemark). Les séries montrent une grande variabilité de haute fréquence (du jour à la saison) mais pas de tendance significative à long terme.

Une autre méthode pour étudier les variations des flux des différentes masses d'eau de l'Atlantique est de faire un bilan des données hydrographiques au niveau d'une section est-ouest. Les premiers calculs des courants vers 25° N suggéraient une diminution systématique du flux d'eau profonde. Ces premiers résultats préliminaires ont justifié le lancement d'un gigantesque effort de mesure directe des flux à partir de capteurs océanographiques déployés sur une section entre la Floride et le Maroc à 26,5° N (programme RAPID-MOCHA).

Depuis 2004, les différentes observations permettent de séparer les différentes composantes du flux d'eau : transport du Gulf Stream, transport lié aux gradients de densité, composante de surface liée à la tension du vent... La circulation profonde se caractérise par une très grande variabilité de haute fréquence (notamment saisonnière), mais la série depuis 2004 ne présente pas de tendance significative à long terme, mis à part une surprenante diminution transitoire en 2009-2010.

D'autres séries océanographiques ont été établies pour des sections moins complètes vers 40° N (« Ligne W ») et 16° N (MOVE). Les données disponibles illustrent encore des variations rapides importantes, mais pas d'évolution à long terme convaincante. Une conclusion similaire peut-être tirée des premières estimations depuis 2002 de la composante superficielle de la circulation méridienne de renversement (MOC) grâce aux données altimétriques des satellites et aux données hydrographiques des flotteurs ARGO.

## **Le réchauffement postglaciaire et ses causes**

Plusieurs cours à l'École polytechnique fédérale de Zurich (ETHZ) et à l'université nationale australienne (ANU) de Canberra ont été consacrés à l'étude du réchauffement postglaciaire et à l'élucidation de ses causes.

Le climat des derniers millions d'années se caractérise par une alternance cyclique de périodes glaciaires. La raison principale en est la cyclicité de la répartition géographique de l'insolation due aux lentes variations des paramètres de l'orbite terrestre. En plus de ces variations orbitales, on sait aussi que la teneur en dioxyde de carbone co-varie avec ces glaciations, les variations de CO<sub>2</sub> constituant ce que l'on appelle une rétroaction positive des variations orbitales. Néanmoins, le rôle exact de l'effet de serre est encore l'objet d'incertitudes, notamment pour les épisodes rapides des déglaciations.

Avec des collègues américains (Shakun *et al.*, 2012, *Nature*), nous avons étudié précisément l'évolution des températures pendant la dernière déglaciation de - 21 000 à - 8 000 ans avant le présent : une période suffisamment récente pour être étudiée avec précision. Nous avons compilé une centaine d'enregistrements répartis à la surface de la planète, dont ceux que nous avons déjà publiés pour l'Atlantique et l'Océan Indien (cf. Bard *et al.*, 1987, *Nature* ; 1997, *Nature* ; 2000,

*Science*). Il a fallu reprendre ces enregistrements, homogénéiser la calibration des températures et des échelles de temps, avant de pouvoir calculer des moyennes zonales et mondiales.

L'objectif principal a été de comparer les variations de température avec l'évolution de la teneur en CO<sub>2</sub> atmosphérique mesurée dans les bulles contenues dans les carottes de glace de l'Antarctique. Cet effort constitue un progrès significatif et complémentaire des travaux de glaciologie considérant le décalage entre le CO<sub>2</sub> atmosphérique (global) et la température locale en Antarctique. Le premier résultat majeur de notre étude est que la température moyenne mondiale a globalement suivi l'augmentation de CO<sub>2</sub> qui a joué, comme on va le voir, un rôle moteur dans cette transition climatique.

Pour comprendre les mécanismes de déglaciation, il faut regarder de plus près, en considérant les différentes bandes de latitudes. On constate que la zone qui se réchauffe la première vers – 21 000 ans, est située aux plus hautes latitudes de l'hémisphère nord. L'augmentation transitoire de la température de l'hémisphère nord est ensuite relayée par un réchauffement massif des hautes latitudes de l'hémisphère sud, notamment au niveau de l'Antarctique. Ce réchauffement austral suit de près la courbe de CO<sub>2</sub> atmosphérique qui débute sa montée vers – 18 000 ans.

Par contre, les moyennes et hautes latitudes de l'hémisphère nord ont attendu environ 3000 ans avant de se réchauffer de façon abrupte vers – 14 700 ans (épisode du Bølling). Si l'on considère uniquement le secteur de l'Atlantique nord et de l'Europe, on voit même que les températures baissent fortement pendant deux épisodes transitoires de la déglaciation centrés vers – 16 000 et – 12 000 ans (événements de Heinrich 1 et du Dryas récent). Par contre, ces deux périodes froides correspondent à des réchauffements de la zone australe, notamment au niveau de l'Antarctique.

Comme nous l'expliquerons plus loin, ce comportement en antiphasé des deux hémisphères est la signature de l'effet de « bascule climatique » lié à la circulation méridienne de renversement de l'Atlantique. En effet, des données géochimiques complémentaires (rapports <sup>13</sup>C/<sup>12</sup>C, Cd/Ca, <sup>143</sup>Nd/<sup>144</sup>Nd, <sup>231</sup>Pa/<sup>230</sup>Th) mesurées sur des sédiments de l'Atlantique confirment l'effondrement de cette circulation profonde pendant les deux refroidissements transitoires centrés vers – 16 000 et – 12 000 ans. Par ailleurs, d'autres enregistrements géochimiques permettent d'identifier l'origine du CO<sub>2</sub> qui augmente rapidement à partir de – 18 000 ans. Les rapports <sup>13</sup>C/<sup>12</sup>C du CO<sub>2</sub> des bulles d'air des glaces de l'Antarctique, ainsi que l'analyse des teneurs en opale des sédiments de l'océan austral et du rapport <sup>14</sup>C/<sup>12</sup>C de coraux profonds démontrent que le CO<sub>2</sub> atmosphérique provient bien des profondeurs de l'océan sud.

Avant de pouvoir reconstituer le déroulement de la déglaciation, il est utile de souligner l'importance de l'océan Atlantique dans les transports de chaleur à l'échelle planétaire. Actuellement, les eaux de surface des régions tropicales de l'océan Atlantique, chaudes et salées, sont transportées vers le nord *via* les courants de surface, en particulier le Gulf Stream et la Dérive nord-atlantique. Pendant leur trajet en latitude, ces courants se refroidissent, ce qui entraîne une densification des eaux de surface (plus l'eau est salée ou froide, plus elle est dense). Arrivées en mers du Groenland, d'Islande, de Norvège et du Labrador, les eaux de surface deviennent si denses qu'elles plongent dans les abysses, permettant la réoxygénation des couches profondes de l'océan Atlantique.

Ce processus de convection est entretenu continuellement par le transport d'eau de surface depuis les régions intertropicales. Peu à peu, les différentes plongées d'eau profonde se mélangent et forment la masse d'Eau profonde nord-atlantique (NADW) qui entraîne environ 15 à 20 millions de mètres cubes par seconde (15-20 Sv), constituant la branche profonde de la circulation méridienne de renversement (MOC) de l'Atlantique. Lorsque l'on considère les transports de chaleur, on constate que la circulation atlantique transporte un flux net de l'hémisphère sud vers l'hémisphère nord, d'environ 1 Petawatts ( $10^{15}$  W). Une éventuelle variation de cette circulation aurait donc des effets opposés sur les températures des deux hémisphères.

Les flux d'eau douce vers l'Atlantique nord peuvent perturber la densité des eaux de surface, paramètre contrôlant la plongée en profondeur des masses d'eau dans les mers nordiques. Une légère augmentation de l'apport des pluies, des fleuves ou de la fonte d'icebergs par rapport à la valeur actuelle entraîne une légère diminution de la convection profonde et un refroidissement modéré en Atlantique nord.

Le système peut aussi basculer vers un autre mode si le flux d'eau douce atteint un seuil critique. Ce nouvel état se caractérise par une quasi-absence de circulation profonde et par des températures beaucoup plus basses en Atlantique nord et sur les continents adjacents. Un refroidissement intense centré sur l'Atlantique nord accompagné d'un réchauffement plus faible mais généralisé à l'hémisphère sud, est donc la conséquence de la réduction du transport de chaleur interhémisphérique et de l'augmentation de la formation d'eau profonde et intermédiaire dans l'océan Austral lorsque la formation d'eau profonde nord atlantique est réduite. C'est effectivement ce qui s'est passé à plusieurs reprises pendant la déglaciation, compliquant le réchauffement lié à l'insolation et à l'effet de serre du  $\text{CO}_2$ .

La dernière déglaciation s'est donc déroulée en cinq grandes étapes. Tout commence vers - 21 000 ans, alors que la Terre est en pleine phase glaciaire. Se déclare alors un réchauffement dû à l'augmentation progressive de l'insolation de l'hémisphère nord, notamment aux latitudes les plus hautes. Comme le confirme des données géochimiques locales, ce réchauffement précoce a déstabilisé les grandes calottes de glace qui étaient centrées vers 65° N (calottes laurentienne et fennoscandienne).

À partir de - 19 000 ans, les évolutions des deux hémisphères divergent à cause de l'effondrement de la circulation océanique profonde qui altère le flux de chaleur méridien. Le nord commence à se refroidir, tandis que le sud s'échauffe, notamment au niveau de l'Antarctique. Malgré le refroidissement intense autour de l'Atlantique nord (événement Heinrich 1 équivalent du Dryas ancien), la moyenne de la température planétaire augmente vite à cause des émissions de  $\text{CO}_2$  par l'océan Austral.

La circulation de l'Atlantique finit par se rétablir vers - 14 700 ans (Bølling), ce qui a pour effet d'arrêter pendant deux millénaires le réchauffement de la zone australe par effet de bascule océanique (Renversement froid antarctique = *Antarctic Cold Reversal*). Le réchauffement rapide du Bølling correspond aussi à une accélération de la fonte des calottes de glace (Pulse d'eau de fonte 1 A = *Melt Water Pulse 1 A*; Bard *et al.* 1990, *Nature*; 1996; *Nature*; 2010, *Science*; Deschamps *et al.*, 2012, *Nature*).

Le réchauffement général ainsi que la fonte des calottes se poursuivent et conduisent à une deuxième phase transitoire froide dans l'hémisphère nord entre - 13 000 et - 11 500 ans (Dryas récent), période caractérisée une nouvelle fois par un réchauffement de la zone australe, notamment en Antarctique. La circulation atlantique se rétablissant vers - 11 500 ans, les températures des différentes bandes de latitudes se stabilisent vers - 9 000 ans à des niveaux proches de la climatologie actuelle.



Pour visualiser simplement les effets de la bascule climatique, il suffit de considérer la différence entre les températures moyennes des deux hémisphères nord et sud. Cette courbe a une forme caractéristique en W, clairement corrélée avec les enregistrements des traceurs géochimiques de la circulation profonde.

Afin d'aller au-delà des comparaisons visuelles et statistiques, il est important d'utiliser un modèle numérique simulant le couple océan-atmosphère. Notre étude inclut donc un volet de modélisation climatique réalisée avec un modèle de circulation général (GCM) performant développé par les chercheurs du *National Center for Atmospheric Research* et de l'université du Wisconsin, co-auteurs de l'étude menée par Shakun *et al.* (2012).

Cette modélisation climatique a confirmé l'importance du forçage du CO<sub>2</sub> atmosphérique pour expliquer la tendance générale de réchauffement pendant la déglaciation. Le modèle permet aussi de quantifier les transitoires nord et sud causées par des variations de flux de chaleur océanique liées aux effondrements épisodiques de la circulation profonde atlantique.

La modélisation climatique donne le moyen d'introduire de façon indépendante les forçages d'insolation, d'extension des glaces et des gaz à effet de serre pour estimer (au premier ordre) les influences respectives des différents facteurs. On peut souligner que l'effet de diminution de l'albédo, lié à la disparition progressive des grandes calottes, est resté confiné aux hautes latitudes de l'hémisphère nord. Cet effet ne permet pas d'expliquer le réchauffement de quelques degrés Celsius aux basses et moyennes latitudes, notamment pour l'hémisphère sud. Par ailleurs, la modélisation numérique a permis de quantifier l'importance de l'océan dans les échanges de chaleur à l'échelle de la planète.

Le rôle de l'océan n'est donc pas limité à une atténuation des variations climatiques, mais il peut amplifier, réduire, voire inverser transitoirement, une évolution climatique à long terme. Même si notre étude concerne un réchauffement mondial sur une longue période, il y a des parallèles utiles avec l'évolution du climat moderne. En effet, les relations causales et les déphasages entre les forçages (CO<sub>2</sub>, ensoleillement...) et les évolutions des températures régionales et globales sont aussi au cœur de la problématique du changement climatique actuel. L'effet modérateur de l'océan, qui retarde (ou inverse) le réchauffement postglaciaire dans l'hémisphère nord et peut masquer transitoirement et/ou régionalement des changements irréversibles, est transposable à la problématique actuelle.

Les changements climatiques du dernier siècle sont d'une ampleur plus faible que la déglaciation. Fort heureusement pour nos sociétés, il n'y a pas eu de débâcle provenant de volumes de glace comme les calottes laurentienne ou fennoscandienne. Néanmoins, la plupart des modèles numériques prévoient pour le prochain siècle une diminution (modérée) de la circulation méridienne de renversement de l'Atlantique. Dans les simulations numériques, cet effet conduit généralement à un moindre réchauffement atmosphérique en Atlantique nord, avec des répercussions sur les continents adjacents, notamment l'Europe.

### **Variations du niveau marin pendant la dernière déglaciation**

Plusieurs cours à l'ENS d'Ulm, l'ENSG de Nancy (INPL) et à l'université nationale australienne (ANU) de Canberra, ont été consacrés à nos derniers travaux sur le niveau marin pendant la déglaciation, notamment ceux publiés dans la revue

*Nature* du 29 mars 2012 (collaboration entre l'équipe du CEREGE et des chercheurs des universités d'Oxford et de Tokyo).

Nous avons pu mettre en évidence une remontée spectaculaire du niveau marin, il y a 14 650 ans, en phase avec la période chaude qui marqua la fin de la dernière déglaciation (Deschamps *et al.*, 2012, *Nature*). Ces résultats sont particulièrement importants au regard de la remontée actuelle du niveau des mers qui est une des manifestations les plus préoccupantes du réchauffement climatique. Depuis le début du XX<sup>e</sup> siècle, les enregistrements marégraphiques suggèrent une hausse du niveau de la mer de 1,5 à 2 mm/an. Plus récemment, les observations des satellites altimétriques indiquent une hausse moyenne globale de 3,3 mm/an sur les deux dernières décennies. Cette augmentation est attribuée au réchauffement planétaire depuis un siècle. Si l'estimation de leurs contributions respectives fait encore l'objet de recherches actives, il est établi que l'expansion thermique des océans et la fonte des calottes polaires, Groenland et Antarctique, et des glaciers de montagne en sont les causes majeures.

Les compilations du dernier rapport du GIEC (2007) indiquent que la remontée du niveau marin à l'horizon 2100 devrait se situer entre 20 à 60 cm, selon les différents scénarios des émissions de gaz à effet de serre. Néanmoins, comme le précise ce rapport, les modèles climatiques utilisés jusqu'en 2007 ne simulent pas de façon réaliste la dynamique des calottes polaires en réponse au réchauffement mondial. Les projections du GIEC de 2007 ne sont donc considérées que comme des limites inférieures de la remontée du niveau marin.

Les simulations les plus récentes s'appuyant sur des modèles statistiques semi-empiriques suggèrent une remontée du niveau marin comprise entre 60 et 180 cm à l'année 2100. Comme on le voit, l'enjeu est de taille puisque environ 3,2 milliards de personnes, soit la moitié de population mondiale, habitent sur une côte ou à moins de 200 km d'un littoral et un dixième de la population vit aujourd'hui à moins de 10 mètres au dessus du niveau de la mer.

Une façon d'appréhender la dynamique des calottes de glaces et donc d'améliorer la modélisation et la prévision des variations futures du niveau marin est de s'appuyer sur des archives géologiques qui ont enregistré les variations passées du niveau marin. À ce titre, les carottes forées dans les récifs coralliens comme Tahiti et la Barbade fournissent des indications particulièrement précieuses sur ces variations et donc sur le comportement des calottes de glace par le passé.

Des enregistrements obtenus à l'aide de ces archives ont ainsi permis de mettre en évidence des remontées extrêmement rapides du niveau de la mer par le passé, en particulier lors de la dernière déglaciation. Au cours de cette période qui a vu le niveau marin passer de la cote - 130 mètres depuis le dernier maximum glaciaire, vers - 21 000 ans, au niveau actuel, la remontée du niveau marin n'a pas été constante mais a été ponctuée par des accélérations rapides du niveau marin associées à des débâcles massives des calottes de glace.

La plus importante de ces accélérations que les paléoclimatologues nomment *Melt-Water Pulse 1A* (MWP-1A) restait par bien des aspects énigmatique (Bard *et al.*, 1990, *Nature*). En s'appuyant sur des coraux prélevés dans le cadre d'une expédition internationale au large de Tahiti, nos nouveaux résultats (Deschamps *et al.*, 2012, *Nature*) lèvent le voile sur cet événement climatique, sans aucun doute un des plus marquants des derniers 20 000 ans.

Les coraux dits hermatypiques sont des organismes qui vivent exclusivement dans les eaux tropicales. Très sensibles à la luminosité et à la température, ils croissent

à fleur d'eau, dans un intervalle de profondeur très restreint, ce qui en fait de bons marqueurs du niveau de la mer. C'est pourquoi l'étude des coraux fossiles qui se sont formés au cours des dernières centaines de milliers d'années permet de reconstituer les variations du niveau de la mer et les changements environnementaux au cours du temps.

Par ailleurs, les coraux peuvent être datés avec une excellente précision par la méthode uranium-thorium qui s'appuie sur la désintégration radioactive de l'uranium naturel présent dans le squelette calcaire des coraux. À titre d'exemple, la précision des datations obtenues au CEREGE dans le cadre de ce projet est de l'ordre d'une trentaine d'années pour des échantillons vieux de 15 000 ans.

En 2005, ECORD (*European Consortium for Ocean Research Drilling*) a mis en œuvre, dans le cadre du programme international IODP (*Integrated Ocean Drilling Program*) co-financé par l'INSU-CNRS (Institut national des sciences de l'Univers), une campagne de forage sur les pentes des récifs actuels de Tahiti. Cette expédition a été motivée par les travaux initiés dans les années 90 à partir de carottages effectués par l'IRD, toujours à Tahiti, et qui ont fait l'objet de publications marquantes de l'équipe du CEREGE (Bard *et al.*, 1996 *Nature* ; Bard *et al.*, 2010, *Science*). C'est donc sur la base d'un projet, soumis dès 1999 par le CEREGE, que l'expédition a pu voir le jour et carotter en 2005 trois sites situés au large de l'île de Tahiti (voir aussi Thomas *et al.*, 2009, *Science*). Nos travaux sur les coraux de Tahiti ont été soutenus financièrement par la Fondation Comer (États-Unis), la Fondation européenne de la science (ESF-EuroMARC), la Communauté européenne (projet Past4Future), le Collège de France et l'Institut de recherche pour le développement.

Les résultats obtenus confirment l'existence du MWP-1A qui restait en partie controversé, et précisent son amplitude, sa chronologie, et sa durée. Le MWP-1A a débuté il y a 14 650 ans et coïncide avec le début de la première période chaude, dite du Bølling, qui marqua la fin de la déglaciation dans l'hémisphère nord. Au cours de cet événement, la remontée du niveau marin aurait été de presque 16 mètres en moins de 350 ans. La vitesse de la remontée du niveau marin aurait atteint au minimum de 40 mm/an, vitesse qu'il faut comparer au taux moyen de 10 mm/an estimé pour la dernière déglaciation ou au 3 mm/an observés aujourd'hui.

En s'appuyant sur des simulations de modèles géophysiques, nous avons montré que la calotte antarctique avait probablement contribué significativement au MWP-1A, donnant un nouvel éclairage sur les relations complexes entre climat global, circulation océanique et niveau marin, et le rôle que ce flux catastrophique d'eau douce apporté à l'océan a pu jouer sur la fin de la déglaciation. Ces travaux illustrent la réponse des calottes glaciaires, en particulier de la calotte antarctique, à une perturbation climatique majeure.

#### SÉMINAIRE : L'OcéAN ET LES CHANGEMENTS CLIMATIQUES

Pour compléter les douze cours à Paris, Nancy, Zürich, et Canberra, sept séminaires ont été organisés dans le cadre d'un colloque intitulé « L'océan et les changements climatiques », organisé le 30 mars 2012 au Collège de France.

Programme :

– Édouard Bard (Collège de France & CEREGE, Aix-en-Provence) : « Introduction and paleoceanographic perspective ».

- Harry Bryden (School of Ocean and Earth Science, Université de Southampton) : « Variability in the deep circulation of the North Atlantic Ocean ».
- Monika Rhein (Institut de physique environnementale, Université de Brême) : « Changes in water mass formation and spreading pathways in the North Atlantic ».
- Jochem Marotzke (Institut Max Planck de météorologie, Hambourg) : « Predictability and prediction of Atlantic circulation and climate ».
- Gilles Reverdin (CNRS, Laboratoire d'océanographie et du climat, IPSL, Paris) : « Atlantic surface currents ».
- Mathieu Rouault (Département d'océanographie, Université du Cap, Afrique du Sud) : « Hydrographic data on the Agulhas Current in the context of the Indian, Atlantic and Southern Ocean circulations ».
- Arne Biastoch (GEOMAR, Centre Helmholtz pour la recherche sur l'Océan, Kiel) : « Modelling the Agulhas Current and its coupling with the Atlantic circulation ».

Couvrant plus de 70 % de notre planète, les océans redistribuent, avec l'atmosphère, l'énergie que notre planète reçoit du soleil. Les actions conjointes des vents et de la force de Coriolis induisent des courants de surface, la plupart connus depuis des siècles par les marins. Néanmoins, ceux-ci ne soupçonnaient pas l'existence d'un système beaucoup plus vaste, à l'échelle du globe, en lien avec les circulations des couches intermédiaires et profondes de l'océan.

L'océan peut donc jouer un rôle majeur dans le système climatique, ne se limitant pas à une atténuation passive des variations atmosphériques. La circulation océanique a-t-elle varié dans le passé et comment se comportera-t-elle dans le futur avec des modifications probables des températures, des pluies et des vents ? Pour tenter de répondre à ces questions, le colloque a réuni au Collège de France des océanographes de plusieurs pays. Dans sa présentation introductive, Edouard Bard a rappelé le rôle fondamental de l'océan dans la machinerie climatique, puis illustré les variations de la circulation océanique dans le cadre d'évolutions à long terme à l'échelle des siècles et des millénaires. Harry Bryden (Centre national d'océanographie, université de Southampton) a fait le bilan des recherches sur la variabilité actuelle en Atlantique nord, notamment le Gulf Stream et le courant de retour vers le sud. Les méthodes utilisées vont de l'analyse des données hydrographiques sur plus d'un demi-siècle à des mesures directes des flux d'eau sur une section instrumentée à 26,5° N entre la Floride et le Maroc.

Une approche complémentaire est d'étudier les masses d'eau de l'Atlantique nord, plus haut en latitude, pour suivre leur plongée au niveau des mers nordiques et de la mer du Labrador. Monika Rhein (Institut de physique environnementale, université de Brême) a décrit des recherches récentes fondées sur des lignes de mouillages instrumentées ainsi que sur la pénétration dans l'océan de traceurs chimiques comme les fréons d'origine anthropique. Les séries temporelles illustrent une complexité à court terme qui serait liée à l'Oscillation nord-atlantique, mais elles sont encore trop courtes pour distinguer une tendance de long terme. Gilles Reverdin (Laboratoire d'océanographie et du climat, CNRS-IRD-UPMC Paris) a montré comment la combinaison des données des satellites altimétriques et des bouées dérivantes, permet de cartographier les courants de surface et de décrire un système de « supergyre » de l'hémisphère sud, connectant les trois principaux océans.

Les modèles numériques du couple océan-atmosphère permettent de faire des projections à long terme, tout en simulant la variabilité océanique de plus haute

fréquence. Jochem Marotzke (Institut Max Planck de météorologie, Hambourg) a fait le point sur la possibilité d'améliorer les prévisions climatiques en initialisant un modèle océanique avec les observations atmosphériques. Ces travaux de modélisation montrent l'importance de la prise en compte du couplage dynamique atmosphère-océan pour prévoir les températures de surface en Atlantique nord et en Europe au cours de la prochaine décennie.

Dans le cadre du colloque, l'importance et la complexité du rôle de l'océan dans les échanges planétaires de la chaleur et les interactions avec l'atmosphère ont été illustrés à partir de l'exemple du courant des Aiguilles, au niveau de la pointe sud de l'Afrique. Mathieu Rouault (Département d'océanographie de l'université du Cap) a d'abord décrit l'influence de ce courant sur la météorologie régionale, puis montré comment une partie du courant retourne vers l'océan Indien, tandis qu'une composante s'échappe vers l'Atlantique par une série de tourbillons. Depuis 40 ans, le transfert d'un bassin à l'autre aurait augmenté de façon très significative, affectant l'hydrologie et la circulation de l'Atlantique sud. Comme l'a ensuite montré Arne Biastoch (GEOMAR, Centre Helmholtz pour la recherche sur l'Océan, Kiel) ce lien entre le courant des Aiguilles et la circulation Atlantique fait l'objet d'efforts de modélisation numérique dont la résolution spatiale est sans cesse améliorée pour simuler les tourbillons transitoires de façon explicite.

Il ressort de l'étude des données et de la modélisation numérique que les variabilités de la circulation méridienne atlantique et de son impact climatique peuvent être comprises en tenant compte des influences des hautes latitudes des deux hémisphères. On souligne des plongées en mer du Labrador et mers nordiques, ainsi que des effets conjugués de multiples phénomènes ayant lieu dans l'hémisphère sud, notamment les échanges de masses d'eau au sud de l'Afrique, *via* le passage de Drake au sud de l'Amérique et au niveau des systèmes de vents d'ouest soufflant sur l'océan Austral.

#### COLLOQUES INTERNATIONAUX

Vidal L., Pothin A., Revel M., Tachikawa K., Garcia M., Sonzogni C., Rostek F. et Bard E., « Climate variability in the Levant Basin during the last deglaciation », Salamanque (Espagne), 21-23 septembre 2011, *Joint RCMNS-RCANS Interim Colloquium Climate changes, bioevents and geochronology in the Atlantic and Mediterranean over the last 23 Myr.*

Bard E. : « Long term variations of cosmic rays », Potsdam (Allemagne), 15-18 novembre 2011, *COST ES1005 science meeting, TOSCA Towards a more complete assessment of the impact of solar variability on the Earth's climate.*

Felis T., Asami R., Deschamps P., Hathorne E.C., Koelling M., Durand N., Cabioch G., Bard E. : « Tropical South Pacific sea surface temperatures during the last deglaciation from Tahiti corals », Vienne, 22-27 avril 2012, *European Geosciences Union (EGU) General Assembly* ; Vidal L., Pothin A., Revel M., Tachikawa K., Garcia M., Sonzogni C., Bard E., « Climate Variability in the Levant basin during the last deglaciation » ; Wilhelm B., Arnaud F., Sabatier P., Crouzet C., Brisset E., Guiter F., Reyss J.L., Chaumillon E., Tachikawa K., Bard E., Delannoy J.J. : « 1.4 kyrs of flash flood events in the Southern European Alps: implications for extreme precipitation patterns and forcing over the north-western Mediterranean area ».

Bard E.: « Iberian and Pakistan margins tie-points and timescales », Paris (Fondation Hugot), 6 juillet 2012, *IntCal group workshop on the radiocarbon calibration.*

Heaton T.J., Bard E., Hughen K.A. : « Elastic tiepointing - Transferring chronologies between records » ; Durand N., Deschamps P., Bard E., Hamelin B., Camoin G., Thomas A.L., Henderson G.M., Yokoyama Y. : « New insight into the radiocarbon calibration using  $^{14}\text{C}$  and U-Th ages of corals drilled offshore Tahiti (IODP Expedition #310) » ; Sepulcre S., Deschamps P., Bard E. : « Assessing with radiocarbon the U-Th dating method applied to sedimentary aragonite » ; Soulet G., Ménot G., Garreta V., Rostek F., Zaragosi S., Lericolais G., Bard E. : « Reservoir age evolution in the former Black Sea 'Lake' » ; Reimer P.J., Bard E., Bayliss A., Beck J.W., Blackwell P.G., Bronk Ramsey C., Buck C.E., Edwards R.L., Friedrich M., Grootes P.M., Guilderson T.P., Hafliðason H., Hajdas I., Hatté C., Heaton T.J., Hogg A.G., Hughen K.A., Kaiser K.F., Kromer B., Manning S.W., Niu M., Reimer R.W., Richards D.A., Scott E.M., Southon J.R., Turney C.S.M., van der Plicht J. : « Proposed update to the IntCal09, SHCal04 and Marine09 radiocarbon calibration curves », Paris (UNESCO), 9-13 juillet 2012 : 21st International Radiocarbon Conference.

Bard E. (conférence invitée) : « Rapid and large sea level changes during déglaciations », Canberra (Australie), 24 juillet 2012, *Sea Level Rise Forum organisé par l'Université Nationale Australienne (ANU)*.

Bard E. (conférence invitée) : « The climate variability during the Holocene: a perspective based on sea-level, solar insolation and irradiance forcings », Brisbane (Australie), 5-10 août 2012, *34th International Geological Congress (IGC)*.

## ACTIVITÉS DE RECHERCHES

### Forçages climatiques naturels

Le projet « VOLSOL. Forçages climatiques naturels volcanique et solaire » est un projet de l'Agence nationale de la recherche (ANR). Coordonné par E. Bard, il associe trois laboratoires : le CEREGE d'Aix-Marseille (UMR co-dirigée par E. Bard et partenaire de la chaire), le LGGE de Grenoble (Laboratoire de glaciologie et géophysique de l'environnement) et le LATMOS de Paris (Laboratoire atmosphères, milieux, observations spatiales).

La compréhension de l'influence de l'Homme sur le climat, particulièrement depuis le milieu du  $\text{XX}^{\text{e}}$  siècle, avec l'augmentation des émissions de gaz à effet de serre, nécessite une meilleure connaissance des forçages anthropiques et naturels (voir la *Lettre du Collège de France* n° 31, 2011, p. 32-35 ; <http://lettre-cdf.revue.org/1210>). Pour la période récente, les deux principaux forçages climatiques naturels sont d'origine volcanique et solaire. Les observations satellitaires ont permis de documenter l'activité solaire grâce aux mesures d'irradiance effectuées depuis 1978 et d'observer l'influence des éruptions volcaniques comme celle du Pinatubo (Philippines) en 1991. Les données des satellites ne couvrent que les 30 dernières années et ne sont donc pas suffisantes pour tester de manière complète la relation entre ces deux forçages naturels et l'évolution du climat.

Le projet VOLSOL a donc pour objectif de reconstituer les forçages volcanique et solaire au cours des derniers 2000 ans à partir d'archives glaciaires provenant des sites de Dôme C et de Dôme Talos en Antarctique. Au cours de cette période, les variations climatiques sont bien étudiées et quantifiées, et les archives disponibles avec une haute résolution permettent de fournir de nouvelles séries temporelles synchronisées de ces forçages et du climat.

L'activité solaire peut être reconstituée dans le passé grâce à l'étude de l'abondance sur Terre des cosmonucléides comme le béryllium-10. Cet isotope est formé par

l'interaction du rayonnement cosmique galactique avec des atomes présents dans l'atmosphère terrestre. Or le flux de rayonnement cosmique qui atteint la Terre dépend des champs magnétiques du Soleil et de la Terre. Les variations de concentration de ce cosmonucléide dans les archives glaciaires renseignent donc sur l'activité solaire passée.

L'activité volcanique est reconstituée à partir de plusieurs indicateurs. Les signaux volcaniques sont d'abord repérés par des augmentations de la concentration de sulfate dans les carottes de glace. Ensuite, l'analyse de la composition isotopique du soufre et de l'oxygène du sulfate permet de savoir si le nuage volcanique a atteint la stratosphère, située à environ 10 km d'altitude, et donc si l'éruption volcanique a eu un impact sur le climat global.

Les signaux enregistrés dans les archives glaciaires sont ensuite analysés à l'aide de la modélisation pour pouvoir comprendre et prendre en compte les liens entre ces différents indicateurs dans les reconstructions des forçages volcanique et solaire. Par exemple, la concentration de  $^{10}\text{Be}$  peut être modifiée par les éruptions volcaniques, le  $^{10}\text{Be}$  ayant tendance à s'attacher aux aérosols de sulfate volcanique.

Les premiers enregistrements de concentration de  $^{10}\text{Be}$  sur les sites de Dôme C et Vostok ont permis de mieux comprendre la complexité des liens entre les marqueurs solaires et volcaniques (i.e. l'influence des éruptions sur le marqueur solaire, Baroni *et al.*, 2011). Une amélioration des reconstitutions de l'activité solaire a pu être apportée (Delaygue & Bard, 2011 ; Schmidt *et al.*, 2011, 2012). La mesure de la concentration de sulfate au cours des derniers 2000 ans a permis de repérer plus de 50 événements volcaniques dont certains n'avaient jamais été détectés auparavant (Savarino *et al.*, en prép.). Les mesures se poursuivent en parallèle de comparaisons modèles-données afin de mieux comprendre les forçages volcanique et solaire au cours des derniers 2000 ans.

## Projet EQUIPEX ASTER-CEREGE

Durant l'année académique 2011-2012, une partie significative de l'effort de l'équipe a été dédiée au projet EQUIPEX ASTER-CEREGE coordonné par E. Bard (voir la *Lettre du Collège de France* n° 31, 2011, p. 24-25 ; <http://lettre-cdf.revues.org/1196>). L'objectif est d'étendre et de diversifier le parc instrumental dédié à la géochimie isotopique de la plateforme analytique installée au CEREGE d'Aix-en-Provence. L'université Aix-Marseille gère les financements d'équipement (2,7 millions d'euros) et de fonctionnement (1 million d'euros sur 10 ans) en provenance de l'ANR des Investissements d'avenir.

Notre projet EQUIPEX comporte trois volets d'instrumentation complémentaires qui constituent un dispositif expérimental unique sur le plan international : élément n° 1, un spectromètre de masse par accélérateur miniature (AixMICADAS) dédié à la mesure du  $^{14}\text{C}$  de microéchantillons gazeux et solides, accompagné de son laboratoire de purification du carbone ; élément n° 2, un spectromètre de masse à source plasma et multicollecteur (MC-ICPMS) accompagné de son unité ultra-propre de préparation des échantillons ; élément n° 3, une source d'ions plus performante pour l'accélérateur ASTERisques de 5 MV déjà présent sur le site du technopôle de l'Arbois.

Cette année, nous avons porté notre effort sur le recrutement de plusieurs collaborateurs (notamment Yoann Fagault et Thibaut Tuna) qui travaillent désormais

au projet ASTER-CEREGE ainsi qu'à la planification de nouvelles surfaces techniques destinées à accueillir les instruments (en particulier l'élément n° 1).

En parallèle à la constitution de l'équipe, nous avons eu de nombreux échanges avec le Laboratoire de physique des faisceaux d'ions de l'École polytechnique fédérale de Zurich (*Laboratory for Ion Beam Physics*, ETHZ) afin de préparer un accord formel de collaboration pour construire, tester et installer le spectromètre AixMICADAS incluant son interface à CO<sub>2</sub>.

Nous avons aussi planifié l'ajout d'une extension au bâtiment Trocadéro occupée par l'équipe. L'ensemble des travaux porte sur l'extension du bâtiment (130 m<sup>2</sup>), la réhabilitation et la transformation de plusieurs bureaux existants en laboratoires (75 m<sup>2</sup> en rez-de-jardin), et la création d'une salle de dépouillement et de réunion (environ 65 m<sup>2</sup> au premier étage). L'extension de 130 m<sup>2</sup> sera construite avec un accès direct aux différentes surfaces rénovées (75 m<sup>2</sup>) du bâtiment existant. L'extension sera constituée d'une salle de 60 m<sup>2</sup> destinée au spectromètre AixMICADAS (avec des contraintes techniques lourdes comme une charge au sol de 5 t, une climatisation précise, et des arrivées de fluides techniques), un laboratoire de préparation des échantillons des glaces polaires (20 m<sup>2</sup>), une chambre froide (8 m<sup>2</sup>) pour le stockage des carottes de glace et un local technique (environ 20 m<sup>2</sup>). La réhabilitation va permettre de récupérer environ 75 m<sup>2</sup> de laboratoire supplémentaire en transformant les surfaces libérées par l'ancienne équipe de Xavier Le Pichon. La salle informatique du rez-de-jardin de l'aile sud (environ 30 m<sup>2</sup>) va être remplacée par un laboratoire de chromatographie destiné à la purification de molécules organiques spécifiques pour les analyser ensuite avec AixMICADAS. Les trois bureaux situés dans la coursive seront transformés en laboratoires destinés au prétraitement des échantillons, à la transformation de la matière organique et des carbonates en CO<sub>2</sub> gazeux et enfin à la réduction du CO<sub>2</sub> en carbone pour produire des cibles de graphite. Une nouvelle salle de réunion sera posée sur la coursive du premier étage et soutenue par des piliers à l'extérieur du bâtiment.

Ce travail de planification a nécessité de nombreuses réunions et interactions avec le maître d'ouvrage et le maître d'œuvre préalablement au dépôt de la demande de permis de construire en avril 2012. Le technopôle de l'Arbois supporte le coût total (environ 0,75 million d'euros) de ces nouvelles surfaces techniques qui seront livrées au second trimestre 2013.

Le spectromètre AixMICADAS sera dédié à la mesure du <sup>14</sup>C de microéchantillons gazeux et solides provenant de la purification matières carbonées d'origines atmosphérique et océanique, ou issues de la chromatographie de composés moléculaires ou inorganiques. Le système que nous installerons sera équipé de deux sources, solide et à gaz, afin de pouvoir choisir l'une des deux en fonction de la taille et du type d'échantillon, ainsi que de la précision attendue et du nombre d'analyses à effectuer.

Nous prévoyons de concentrer des molécules individuelles par chromatographie préparative (liquide et gazeuse) pour ensuite les analyser avec la source à gaz d'AixMICADAS. L'avantage d'un tel couplage est de pouvoir travailler sur de petits échantillons dans de bonnes conditions de « blancs » analytiques, ainsi que d'augmenter le nombre d'analyses. Une source à gaz permet aussi le couplage avec plusieurs systèmes d'injection automatisés (analyseur élémentaire, hydrolyse acide, ampoules scellées).

Un des objectifs de l'acquisition d'AixMICADAS est de développer une méthode permettant la mesure du <sup>14</sup>C sur des molécules organiques spécifiques issues de la



séparation par chromatographie gazeuse et liquide. Parmi les nombreuses applications possibles, on peut citer par exemple la datation sur des molécules fossiles (biomarqueurs) provenant de sources connues comme les alcénones marines ou lacustres ou les alcanes terrigènes, les lipides membranaires (par ex. les tétraéthers) ou bien certains produits de dégradation de la chlorophylle (par ex. les chlorines). Cette méthode permettra de se doter d'un outil complémentaire des datations traditionnelles sur les carbonates et permettra ainsi d'améliorer la précision et la résolution des modèles d'âge des carottes sédimentaires.

La principale difficulté de cette technique réside dans l'isolation des molécules provenant d'un mélange complexe tel que des sédiments marins. Les molécules sont extraites dans un solvant organique puis séparées par chromatographie en phase liquide ou en phase gazeuse suivant les composés ciblés. Les fractions isolées doivent être purifiées et en quantité suffisante pour permettre une mesure par SMA. AixMICADAS permettra de travailler sur de très petits échantillons (jusqu'à 0,05 mg de carbone). Toutefois, la capacité des colonnes chromatographiques étant limitée à quelques centaines de ng par composé, il est nécessaire d'accumuler les fractions en effectuant des injections répétées du même échantillon.

Nous sommes actuellement dans la phase d'optimisation des méthodes de séparation chromatographiques des composés préservés dans les carottes sédimentaires. Une attention particulière a été portée à l'optimisation de la méthode d'extraction et de séparation des pigments (mise en solution, résolution et temps de rétention). Un collecteur de fraction sera installé sur la chaîne de chromatographie liquide haute performance. Il est aussi prévu de réaliser des mesures  $^{14}\text{C}$  sur des molécules issues de la séparation par chromatographie en phase gazeuse.

## PUBLICATIONS

### 2012

Camoin G.F., Seard C., Deschamps P., Webster J.M., Abbey E., Braga J.C., Iryu Y., Durand N., Bard E., Hamelin B., Yokoyama Y., Thomas A.L., Henderson G.M. et Dussouillez P., « Reef response to sea-level and environmental changes during the last deglaciation: Integrated Ocean Drilling Program Expedition 310, Tahiti Sea Level », *Geology*, 40, 2012, 643-646 [doi:10.1130/G32057.1].

Cartapanis O., Tachikawa K. et Bard E., « Latitudinal variations in intermediate depth ventilation and biological production over northeastern Pacific Oxygen Minimum Zones during the last glacial period », *Quaternary Science Reviews*, 53, 2012, 24-38 [doi: 10.1016/j.quascirev.2012.08.009].

Deschamps P., Durand N., Bard E., Hamelin B., Camoin G., Thomas A.L., Henderson G.M., Okuno J. et Yokoyama Y., « Ice sheet collapse and sea-level rise at the Bølling warming 14,600 yr ago », *Nature*, 483, 2012, 559-564 + 35 p. suppl., [doi:10.1038/nature10902].

Felis T., Merkel U., Asami R., Deschamps P., Hathorne E.C., Kölling M., Bard E., Cabioch G., Durand N., Prangue M., Schulz M., Cahyarini S.Y. et Pfeiffer M., « Pronounced interannual variability in tropical South Pacific temperatures during Heinrich stadial 1 », *Nature Communications*, 3(965), 2012, 1-7 + 17 p. suppl. [doi: 10.1038/ncomms1973].

Ménot G. et Bard E., « A precise search for drastic temperature shifts of the past 40,000 years in southeastern Europe », *Paleoceanography*, 27, PA2210, 2012, 1-13, [doi: 10.1029/2012PA002291].

Schmidt G.A., Jungclaus J.H., Ammann C.M., Bard E., Braconnot P., Crowley T.J., Delaygue G., Joos F., Krivova N.A., Muscheler R., Otto-Bliesner B.L., Pongratz J., Shindell D.T., Solanki S.K., Steinhilber F. et Vieira L.E.A., « Climate forcing reconstructions for use in PMIP simulations of the Last Millennium (v1.1) », *Geoscientific Model Development*, 5, 2012, 185-191 [doi: 10.5194/gmd-5-185-2012].

Shakun J.D., Clark P.U., He F., Liu Z., Otto-Bliesner B., Marcott S.A., Mix A.C., Schmittner A. et Bard E., « Global warming preceded by increasing carbon dioxide concentrations during the last deglaciation », *Nature*, 484, 2012, 49-54 + 52 p. suppl. [doi: 10.1038/nature10915].

Thomas A.L., Fujitab K., Iryu Y., Bard E., Cabioch G., Camoin G., Cole J.E., Deschamps P., Durand N., Hamelin B., Heindel K., Henderson G.M., Masona A.J., Matsuda H., Ménabréaz L., Omori A., Quinn T., Sakai S., Sato T., Sugihara K., Takahashi Y., Thouveny N., Tudhope A.W., Webster J., Westphal H. et Yokoyama Y., « Assessing uplift rates and paleo water depths for Tahiti reefs using U-Th chronology of altered corals », *Marine Geology* 295-298, 2012, 86-94 [doi: 10.1016/j.margeo.2011.12.006].

Wilhelm B., Arnaud F., Sabatier P., Crouzet C., Brisset E., Chaumillon E., Disnar J.R., Guiter F., Malet E., Reyss J.L., Tachikawa K., Bard E. et Delannoy J.-J., « 1400yr of extreme precipitation patterns over the Mediterranean French Alps and possible forcing mechanisms », *Quaternary Research*, 78, 2012, 1-12 [doi: 10.1016/j.yqres.2012.03.003].

## 2011

Baroni M., Bard E., Petit J.R., Magand O. et Boulès D., « Volcanic, solar activity, and atmospheric circulation influences on cosmogenic  $^{10}\text{Be}$  fallout at Vostok and Concordia (antarctica) over the last 60 years », *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 71, 2011, 7132-7145 [doi: 10.1016/j.gca.2011.09.002].

Cartapanis O., Tachikawa K. et Bard E., « North-eastern Pacific oxygen minimum zone variability over the past 70 kyr: impact of primary production and oceanic circulation », *Paleoceanography*, 26, Pa4208, 2011, 1-17 [doi:10.1029/2011Pa002126].

Delaygue G. et Bard E., « An Antarctic view of beryllium-10 and solar activity for the past millennium », *Climate Dynamics*, 36, 2011, 2201-2218 [doi:10.1007/s00382-010-0795-1].

Schmidt G.A., Jungclaus J.H., Ammann C.M., Bard E., Braconnot P., Crowley T.J., Delaygue G., Joos F., Krivova N.A., Muscheler R., Otto-Bliesner B.L., Pongratz J., Shindell D.T., Solanki S.K., Steinhilber F. et Vieira L.E.A., « Climate forcing reconstructions for use in PMIP simulations of the Last Millennium (v1.0) », *Geoscientific Model Development*, 4, 2011, 33-45 [doi: 10.5194/gmd-4-33-2011].

Searc C., Camoin G., Yokoyama Y., Matsuzaki H., Durand N., Bard E., Sepulcre S. et Deschamps P., « Microbialite development patterns in the last deglacial reefs from Tahiti (French Polynesia; IODP Expedition #310): implications on reef framework architecture », *Marine Geology*, 279, 2011, 63-86 [doi: 10.1016/j.margeo.2010.10.013].

Sepulcre S., Vidal L., Tachikawa K., Rostek F. et Bard E., « Sea-surface salinity variations in the northern Caribbean sea across the mid-Pleistocene transition », *Climate of the Past*, 7, 2011, 75-90 [doi: 10.5194/cp-7-75-2011].

Soulet G., Ménot G., Lericolais G. et Bard E., « A revised calendar age for the last reconnection of the black sea to the global ocean », *Quaternary Science Reviews*, 30, 2011, 1019-1026 [doi: 10.1016/j.quascirev.2011.03.001].

Soulet G., Ménot G., Garreta V., Rostek F., Lericolais G., Zaragosi S. et Bard E., « Black Sea "Lake" reservoir age evolution since the Late Glacial hydrologic and climatic implications », *Earth and Planetary Science Letters* 308, 2011, 245-258 [doi: 10.1016/j.epsl.2011.06.002].

Stenni B., Buiron D., Frezzotti M., Albani S., Barbante C., Bard E., Barnola J.M., Baroni M., Baumgartner M., Bonazza M., Capron E., Castellano E., Chappellaz J., Delmonte B., Falourd S., Genoni L., Iacumin P., Jouzel J., Kipfstuhl S., Landais A., Lemieux D., Maggi V., Masson-Delmotte V., Mazzola C., Minster B., Montagnat M., Mulvaney R., Narcisi B., Oerter H., Parrenin F., Petit J.R., Ritz C., Scarchilli C., Schilt A., Schüpbach S., Schwander J., Selmo E., Severi M., Stocker T.F. et Udisti U., « Unified antarctic and greenland climate seesaw during the last déglaciation », *Nature Geoscience*, 4, 2011, 46-49 + 32 p. suppl. [doi: 10.1038/ngeo1026].

### Textes divers (vulgarisation, livres & chapitres, préface)

Bard E., « Préface », in Petit-Maire N. (éd.), *Sahara. Les grands changements climatiques naturels*, Errance, 2012, 9-10.

Bard E., « Influence du Soleil sur le climat », *L'Astronomie*, 125, 2011, 8-44.

Bard E., « Influence du Soleil sur le climat », *Lettre du Collège de France*, 31, 2011, 32-35.

Bard E., « L'océan mondial », in *L'Océan, le climat et nous : un équilibre fragile ?*, Le Pommier & Universcience, 2011, 6-45.

Bard E., « Les changements climatiques récents sont-ils dus au soleil », in *Climat. Une planète et des hommes*, Le Cherche Midi, 2011, 188-197.

Bard E., « Introduction sur les forçages naturels », in Jeandel C. et Mosseri R. (dir.), *Le climat à découvert*, CNRS, 2011, 189-190.

Chappellaz J., Petit J.R., Grousset F. et Bard E., « Inclusions minérales et gazeuses dans les glaces », in Jeandel C. et Mosseri R. (dir.), *Le climat à découvert*, CNRS, 2011, 123-124.

Sicre M.A., Khodri M., Mignot J., Allard P., Balkanski Y. et Bard E., « Effet des éruptions volcaniques sur le climat », in Jeandel C. et Mosseri R. (dir.), *Le climat à découvert*, CNRS, 2011, 201-203.

### RESPONSABILITÉS DIVERSES

Directeur-adjoint du Centre européen de recherche et d'enseignement en géosciences de l'environnement (UMR CEREGE Aix-Marseille Université, CNRS, IRD, Collège de France).

Coordinateur de l'EQUIPEX ASTER-CEREGE.

Membre du comité de pilotage du LABEX OT-MED.

Membre du conseil scientifique de l'OPECST (Sénat & Assemblée nationale).

Membre du groupe de travail IntCal sur la calibration du radiocarbone.

Membre du comité de pilotage du projet international PALSEA sur l'évolution du niveau marin et des calottes de glace (PAGES-IGBP working group).

Commissaire scientifique d'exposition à la Cité des sciences et de l'industrie (« L'océan, le climat et nous », 2011-2012).

### DISTINCTIONS

2011, élu membre associé de l'Académie royale de Belgique, section des sciences.

2012, *Jaeger-Hales Lecturer* de l'Australian National University (Canberra).

