

Évolution du climat et de l'océan

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

ENSEIGNEMENT

Cours : L'océan et le changement climatique ; les variations du niveau des mers

Le cours a été consacré aux fluctuations du niveau marin à différentes échelles de temps, ainsi qu'aux projections pour le prochain siècle.

Pour reconstituer les variations sur des centaines de millions d'années, les géologues utilisent la stratigraphie de sédiments déposés sur les marges continentales. L'étude d'exemples, notamment celui des marges du golfe du Lion, a permis d'illustrer l'approche géophysique de stratigraphie séquentielle.

À long terme, les variations du niveau marin sont pilotées par la géodynamique globale qui modifie la géométrie des bassins océaniques, en superficie et en profondeur. Nous avons considéré les influences respectives des variations du taux d'accrétion de la croûte océanique, des épisodes de collision continentale (exemple de la plaque indienne), ainsi que des effets climatiques liés aux variations de la $p\text{CO}_2$ atmosphérique modulée par le flux volcanique à long terme (lui-même lié à la géodynamique globale). Les amplitudes de variation du niveau marin ont été importantes (200-400 m avec de grandes incertitudes), mais les taux restent très faibles ($< 0,001$ mm/an), opérant sur des dizaines, voire des centaines de millions d'années.

Sur des échelles de temps plus courtes, les variations glaciaires interviennent sous la forme de longues phases, incluant des cycles de glaciations entrecoupées par des périodes interglaciaires. Une calotte de glace peut croître dès lors que l'insolation estivale laisse subsister une partie de la neige tombée en hiver. Cette neige accélère le refroidissement en réfléchissant le rayonnement solaire. Les amplitudes glacio-eustatiques sont importantes (50-150 m), mais sont limitées par l'extension des calottes et leur taux de croissance (maximum d'environ 10 mm/an).

La cause principale des alternances glaciaire-interglaciaire est la cyclicité de la distribution saisonnière et en latitude de l'énergie reçue du Soleil. Ces variations sont dues aux changements de la géométrie de l'orbite terrestre et de l'inclinaison

de l'axe de rotation de la Terre. Les trois cycles majeurs, bien connus des astronomes, sont ceux de l'excentricité de cette orbite, de l'obliquité de l'axe de rotation de la Terre et, enfin, de la précession des équinoxes.

Excellents indicateurs de la variation du niveau marin, les coraux constituent une véritable archive de la dynamique des calottes polaires, de l'océan et du climat du passé. Nécessitant beaucoup de lumière pour se développer, ils vivent dans de faibles tranches d'eau, entre la surface et une dizaine de mètres de profondeur. Lorsque la mer monte, le récif colonise la pente littorale et les coraux plus anciens, ennoyés sous une épaisse couche d'eau, périssent par manque de lumière.

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 lors du dernier interglaciaire, centré vers 125 000 ans BP (+ 7 m environ). La moitié de cette hausse serait liée à la réduction de moitié de la calotte groenlandaise.

Pour la dernière déglaciation, l'enregistrement le plus fiable est celui obtenu par la datation des coraux fossiles prélevés par forage de récifs coralliens des îles de La Barbade, dans les Caraïbes, et de Tahiti, en Polynésie. Le niveau marin suit le réchauffement postglaciaire entre 21 000 ans et 6 000 ans BP, avec une remontée d'environ 130 m.

Au cœur de la dernière déglaciation, le niveau est monté continûment de plus de 50 m en cinq millénaires (l'équivalent de presque toute la glace actuelle de l'Antarctique). L'essentiel de cette glace provenait de la calotte Laurentide située sur le Canada. Le rythme moyen de remontée du niveau marin était d'une douzaine de mm/an. Le taux de remontée est corrélé avec les événements climatiques globaux, notamment la succession de phases chaudes et froides. On observe ainsi des ralentissements du niveau marin pendant certaines périodes relativement froides comme le Dryas récent, ainsi que des accélérations synchrones avec les réchauffements (Bölling, préboréal).

Un autre fait majeur est l'existence d'un saut important du niveau marin, correspondant à une intense débâcle glaciaire (*Meltwater Pulse 1A*). Cet événement centré vers 14 600 ans BP a été marqué par une hausse rapide à un taux d'environ 40-50 mm/an. On ne sait pas encore précisément quelle calotte de glace s'est effondrée à l'époque mais les soupçons se portent aussi bien sur la calotte Laurentide que sur la calotte Antarctique. 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 différentes calottes.

De larges différences entre les enregistrements du niveau marin sont liées au réajustement glacio-hydro-isostatique postglaciaire. En effet, la Terre se déforme sous le poids des calottes de glace. Un inlandsis de plusieurs kilomètres d'épaisseur crée une dépression de la croûte continentale d'environ un kilomètre, ce qui entraîne des déplacements de masse à grande échelle et même une variation du moment d'inertie de la planète et donc de la durée du jour (effet similaire à celui d'un patineur qui tournerait sur lui-même et étendrait ses bras ou les ramènerait contre lui).

La signature locale du rebond isostatique postglaciaire a été décrite pour des cas différents : les zones qui étaient situées sous les calottes glaciaires et au niveau des bourrelets périglaciaires, ainsi que les régions plus éloignées (*near-field* et *far-field*). Les données de terrain sur le niveau marin à long terme (notamment par datation des coraux) et les mouvements actuels par mesure GPS sont utilisées pour

ajuster les paramètres des modèles numériques de géophysique simulant la réponse visco-élastique de la Terre à la déglaciation.

Ces modélisations du réajustement postglaciaire permettent de corriger les données du niveau marin des derniers siècles, afin de n'en retenir que la composante globale liée au changement climatique sur la même échelle de temps. Pour le dernier millénaire, les observations sont fondées sur des marqueurs géologiques spécifiques aux zones d'études (par ex. les micro-atolls des îles coralliennes ou les marais salés, *salt marshes*, des sédiments côtiers aux moyennes et hautes latitudes). Ces enregistrements montrent de faibles variations au cours de la période historique, une vingtaine de centimètres depuis un millénaire, avec une nette accélération au cours des deux derniers siècles, résultats confirmés par les données plus précises des marégraphes dont certaines séries remontent au XIX^e siècle. La couverture spatiale des marégraphes n'est pas idéale, mais elle a été améliorée considérablement ces dernières décennies. Différentes compilations régionales et globales confirment une accélération récente de la hausse du niveau des mers atteignant un taux moyen d'environ 2 mm/an dans les années 50 et de plus de 3 mm/an pour les dernières décennies.

Depuis le début des années 90, des satellites permettent de mesurer la topographie de l'océan à l'aide de radars altimétriques (Topex-Poseidon, Jason 1 et 2, etc). La « hauteur de mer » est donnée par la distance entre le satellite et la surface de la mer, en connaissant précisément la position du satellite. Ce positionnement exact est effectué par rapport aux satellites GPS et à des balises au sol (stations laser et balises DORIS). Les données brutes doivent être corrigées de nombreux phénomènes physiques. Par exemple, la propagation de l'onde radar est perturbée pendant sa traversée de l'atmosphère ainsi qu'à la surface de l'océan, en fonction de la météorologie et de l'état de la mer. Il faut aussi les corriger de phénomènes géophysiques comme les marées et le rebond isostatique postglaciaire.

Les données altimétriques ont permis de confirmer la hausse du niveau marin observée par les marégraphes et de préciser un taux d'évolution qui est actuellement de 3,2 mm/an, avec de petites fluctuations interannuelles et décennales principalement liées à l'oscillation australe (hausse pendant les événements El-Nino et baisses pendant les phases La Nina).

Les données indépendantes de changement de température des eaux de surface et profondes de l'océan permettent de conclure qu'environ un tiers de cette hausse est liée à l'expansion thermique de l'océan. Cette conclusion est corroborée par la correspondance des structures spatiales des variations positives ou négatives du niveau marin et des températures océaniques. La cartographie de ces températures a subi récemment une véritable révolution avec le déploiement de plus de trois mille flotteurs ARGO échantillonnant les deux premiers kilomètres de la colonne d'eau.

Au delà des photographies ou gravures anciennes représentant les fronts de quelques glaciers alpins, il est maintenant reconnu que ce type de glacier est en recul généralisé à l'échelle de la planète, depuis au moins un siècle. Cette fonte des glaciers de montagne contribue actuellement pour environ un mm/an de montée du niveau marin global. En plus de ces glaciers, il faut aussi prendre en compte la contribution des calottes polaires, comme le Groenland et l'Antarctique. En effet, des données de terrain montrent que les fontes estivales du Groenland ont augmenté environ de moitié au cours des trente dernières années.

De plus, une grande partie de la perte de masse des calottes est concentrée géographiquement au niveau de glaciers débouchant sur la mer et produisant de

grandes quantités d'icebergs. La complexité des phénomènes de dynamique glaciaire a été évoquée en considérant plusieurs exemples du Groenland et de l'Antarctique. Ceci nous a permis d'étudier le processus de lubrification en base de calotte, le réchauffement par l'océan du front d'un glacier émissaire ou encore l'effondrement d'une plateforme de glace et ses conséquences sur les vitesses d'écoulement de la calotte en amont.

La quantification du bilan de masse des calottes polaires est réalisée aujourd'hui à l'aide de trois types de satellites indépendants permettant de cartographier les variations d'élévation des calottes par altimétrie laser, les variations de vitesse d'écoulement par interférométrie radar et enfin les variations de masse par gravimétrie (par ex. GRACE). Toutes ces données indiquent des contributions importantes des calottes du Groenland et de l'Antarctique représentant actuellement plus d'un millimètre par an de niveau marin global. Des études récentes montrent l'accélération de ces pertes, localisées par gravimétrie spatiale au niveau du sud et de l'ouest du Groenland, ainsi que dans la partie ouest de la calotte Antarctique.

Le bilan des contributions au niveau marin est donc bouclé en tenant compte des incertitudes associées aux différentes mesures et moyennes. Le taux de 3,2 mm/an observé depuis deux décennies est expliqué par les trois composantes, d'expansion thermique, de fonte des glaciers de montagne et de perte de masse des inlandsis polaires. Une vérification partielle de ce bilan est fournie par la quantification de l'augmentation de la masse de l'océan mesurée par les satellites gravimétriques (équivalente aux deux dernières composantes précitées).

Plusieurs sources d'incertitudes ont été évoquées en se référant aux études les plus récentes, notamment au sujet du réchauffement et de l'expansion thermique de l'océan profond, du stockage d'eau douce sur les continents par les barrages artificiels, de l'extraction d'eau des aquifères et de l'irrigation, ainsi que des débats sur les corrections de rebond isostatique postglaciaire. Quelques exemples régionaux et globaux ont permis d'illustrer la sensibilité des données gravimétriques à cet effet géophysique. La dernière glaciation domine encore aujourd'hui les niveaux marins à toutes les latitudes.

En toute logique, les tendances actuelles devraient se poursuivre dans le futur à cause du réchauffement planétaire dû principalement aux émissions de gaz à effet de serre. Différents types de modèles numériques sont utilisés pour établir des projections qui dépendent des scénarios d'émissions (par ex. les scénarios B1, A1B et A2 du GIEC conduisant en 2100 à des concentrations de CO₂ de 540, 700 et 830 ppm et des réchauffements globaux de 2, 3 et 4 °C). La composante d'expansion thermique calculée par les modèles océaniques est relativement faible, de 20 à 30 cm.

Les modèles de circulation générale (GCM) sont utilisés pour calculer les conditions atmosphériques d'entrée des modèles glaciologiques. Le bilan de masse d'un glacier ou d'une calotte doit en effet tenir compte des changements des précipitations et des températures pour quantifier les variations d'accumulation et d'ablation. Ces modélisations montrent que les glaciers de montagnes et le Groenland contribueront encore à la hausse du niveau marin, mais que l'Antarctique compensera partiellement cette hausse à cause d'une augmentation moyenne des précipitations.

Le cumul des effets stériques et massiques converge vers des augmentations allant de 20 à 50 cm pour les scénarios envisagés (B1 à A2). Néanmoins, ces chiffres moyens masquent une complexité spatiale importante due aux variations de

densité de l'eau de mer et de la circulation océanique, ainsi que de la modification de l'attraction gravitationnelle liée aux nouvelles répartitions de glace et d'eau à la surface de la planète. Cette dernière composante glacio-hydro-isostatique est similaire à celle mentionnée dans le cadre de l'étude de la déglaciation.

L'observation récente des calottes ainsi que la comparaison entre le niveau marin observé et les projections numériques depuis vingt ans démontrent l'importance des phénomènes de dynamique glaciaire et suggèrent clairement leur récente déstabilisation. Ces processus ne sont pas encore modélisés explicitement dans des GCM couplés atmosphère-océan-glaces. Ce problème est lié à la petite échelle des phénomènes (par ex. production d'icebergs des glaciers émissaires) ou à des difficultés de prise en compte des mécanismes (lubrification basale de la calotte du Groenland, effet de contrefort des plateformes de glace autour de la calotte antarctique).

En attendant ces modélisations explicites, certains auteurs ont proposé d'approximer ces phénomènes à l'aide de lois empiriques de paramétrisation, faisant l'hypothèse qu'en régime transitoire la vitesse de changement du niveau marin serait une fonction croissante du réchauffement mondial (avec une réponse lente, comme la fonte des calottes, proportionnelle au réchauffement et une réponse rapide, comme l'expansion thermique, proportionnelle à sa dérivée en fonction du temps). Les coefficients numériques de ces relations dites « semi-empiriques » (le semi faisant référence aux bases physiques sous-jacentes) sont déterminés de façon statistique (donc empirique), en utilisant les observations disponibles pour le dernier siècle et les derniers millénaires.

À partir des projections de réchauffement issues des GCM, il est ensuite possible d'extrapoler l'évolution du niveau marin à l'aide de ces lois semi-empiriques. Comme on pouvait s'y attendre, les chiffres pour 2100 sont plus élevés (80 à 150 cm de B1 à A2) que les projections du GIEC. Celles-ci ne tenaient pas réellement compte de l'augmentation des phénomènes de dynamique glaciaire.

Une autre source d'inquiétude vient du caractère relativement instable de l'Antarctique de l'Ouest. Cette instabilité inhérente est liée à la position de la base de cette calotte sous le niveau marin actuel et à la morphologie de la pente du substratum, généralement dirigée vers l'intérieur de la calotte (cette fraction représentant plus de 3 m d'équivalent eustatique). Une telle configuration topographique pourrait favoriser et accélérer la perte de masse de l'Antarctique de l'Ouest, notamment par contact direct avec l'océan environnant, en particulier après disparition des plateformes de glace périphériques. Une éventuelle contribution de l'Antarctique de l'Ouest dans les prochains siècles fait l'objet de recherches actives et de débats sur la probabilité d'un tel risque.

Variations du forçage climatique solaire

Plusieurs cours et séminaires à Paris, Bruxelles, Toulouse, Orléans, Princeton ont été consacrés à l'étude du forçage solaire sur le climat.

Il a fallu attendre la fin des années 70 pour obtenir les premières données précises sur l'irradiance solaire mesurée à partir des satellites. La « constante solaire », introduite par le physicien français Claude Pouillet en 1838, fluctue à court terme et son cycle de 11 ans se caractérise par une variation de l'irradiance totale d'environ 0,1 %. Paradoxalement, l'éclairement augmente avec le nombre de taches solaires :

les taches assombrissent le Soleil, mais leur effet est plus que compensé par celui des zones brillantes, les facules, qui leur sont associées.

La compilation des mesures brutes réalisées depuis 1978 par les différents satellites présente des difficultés car les séries ne couvrent pas la totalité des trois derniers cycles. Les travaux récents convergent vers une courbe synthétique montrant que le cycle de 11 ans se superpose à une ligne de base évoluant faiblement, probablement à la baisse. Les données des satellites montrent aussi que les variations d'irradiance solaire ne sont pas homogènes sur tout le spectre, avec notamment une plus forte amplitude relative pour les rayons ultra-violets (avec des conséquences importantes sur le chauffage de la stratosphère et sur la formation de l'ozone stratosphérique par des réactions photochimiques).

Pour remonter au-delà des premières mesures par les satellites, il faut étudier d'autres données sur l'activité solaire comme les observations des taches solaires, de la variabilité géomagnétique et des nucléides cosmogéniques. Depuis 20 ans, de nombreux auteurs ont montré que le nombre, et d'autres caractéristiques des taches solaires, peuvent être utilisés pour reconstituer l'irradiance solaire au cours des 3 à 4 derniers siècles. Il est aussi possible de reconstituer l'activité solaire en étudiant l'abondance sur Terre des cosmonucléides. Ces isotopes sont formés par interaction du rayonnement cosmique galactique avec les molécules de l'atmosphère. Les protons du rayonnement primaire étant des particules chargées, la production de cosmonucléides est fortement modulée par l'intensité des champs magnétiques du Soleil et de la Terre. Les géochimistes mesurent l'abondance de ces isotopes dans des archives naturelles comme les glaces polaires (pour le béryllium 10 et le chlore 36), les anneaux d'arbre et les coraux (pour le carbone 14). Le principal enseignement de ces études est que les minima solaires sont nombreux et que le Soleil a passé une partie importante des derniers millénaires en phases calmes (de plusieurs décennies jusqu'au siècle), lorsqu'il présentait une activité magnétique et donc une irradiance plus faible.

La première recherche d'une correspondance systématique entre l'activité solaire et le climat date de plus de deux siècles avec les travaux de l'astronome anglais William Herschel. D'innombrables travaux ont été publiés depuis sur ce sujet qui fait encore l'objet de vives controverses pour plusieurs raisons majeures : les corrélations détectées ne se sont pas poursuivies dans le temps, les auteurs n'ont pas tenu compte de la superposition d'autres forçages sur les mêmes échelles de temps ou d'incertitudes et de biais systématiques dans les données climatiques utilisées, ou bien encore, les outils statistiques ont été mal utilisés.

Il existe cependant des exemples convaincants de liens entre l'activité solaire et le climat concernant différentes échelles de temps et plusieurs compartiments du système climatique. Un exemple classique est l'influence du cycle de 11 ans sur les températures et les vents de la stratosphère. L'impact de ce cycle sur la dynamique de la troposphère a aussi fait l'objet de nombreuses études, notamment sur de possibles variations systématiques de la géométrie et de l'intensité de la circulation moyenne à grande échelle (cellules de Hadley, courants jets, circulation de Walker).

Dès la fin des années 90, des auteurs danois ont annoncé avoir identifié le cycle de 11 ans dans les enregistrements de la couverture nuageuse observée par les satellites. Ces travaux ont été focalisés sur plusieurs types de nuages, en fonction de leurs altitudes. Néanmoins, les correspondances annoncées n'ont pas été confirmées par les études plus récentes.

L'étude empirique d'un lien Soleil-climat a aussi été conduite pour des échelles de temps encore plus longues, notamment la relation entre les « grands minima » d'activité solaire et la période du Petit Âge glaciaire. De nombreux progrès ont suivi, notamment grâce à la reconstitution des conditions climatiques des derniers millénaires pour différentes zones géographiques et différents compartiments du système climatique, ainsi que grâce à l'étude de l'activité solaire sur les mêmes échelles de temps à partir des cosmonucléides ^{10}Be et ^{14}C .

La comparaison des données permet de mettre en évidence l'influence du Soleil, mais aussi d'identifier des complications, car le forçage solaire se superpose à plusieurs autres causes naturelles de changement climatique sur les mêmes échelles de temps (forçages externes ou oscillations internes au système climatique). Par ailleurs, les enregistrements paléoclimatiques présentent une hétérogénéité spatiale suggérant l'importance de processus régionaux. On doit souligner que les termes évocateurs de Petit Âge glaciaire et d'Optimum médiéval simplifient des réalités contrastées avec d'importantes variabilités temporelles et spatiales.

L'évaluation de la composante solaire dans les séries climatiques passe nécessairement par une analyse statistique multivariée tenant compte des autres causes agissant sur les mêmes constantes de temps : forçages des grandes éruptions volcaniques et des gaz à effet de serre, ainsi que les oscillations intrinsèques au système climatique (par ex. la variabilité ENSO, oscillation australe El-Nino). Ces analyses sont conduites à partir des enregistrements de la température moyenne à l'échelle mondiale ou sur les données régionales pour la période récente mieux documentée.

Les différentes composantes climatiques sont identifiées en étudiant leurs répartitions géographiques et verticales, qui constituent des signatures caractéristiques : amplification du réchauffement dans la stratosphère pour une variation solaire, réchauffement stratosphérique et refroidissement troposphérique d'une éruption volcanique, refroidissement stratosphérique et réchauffement troposphérique pour une augmentation de gaz à effet de serre, signatures géographiques de l'ENSO au niveau de l'océan Pacifique et des continents adjacents. À l'échelle globale, l'amplitude thermique du cycle de 11 ans est estimée à environ 0,1-0,2 °C.

Pour la période récente, depuis 1950, il est utile de faire une comparaison au premier ordre pour en déduire que le réchauffement actuel ne peut probablement pas être expliqué par le forçage solaire. En effet, le forçage solaire, dominé par le cycle de 11 ans, ne présente pas d'augmentation à long terme, que l'on considère les mesures précises d'irradiance sur 30 ans, la modulation des rayons cosmiques, ou l'activité géomagnétique. Ceci suggère l'influence probable d'autres forçages, notamment celui des gaz à effet de serre dont les concentrations ont augmenté continuellement au cours de la même période.

L'approche empirique a évidemment ses limites car certains forçages sont encore mal quantifiés (la composante ultraviolette du spectre solaire) ou restent encore à l'état d'hypothèse (par exemple, le rôle exact des particules chargées du rayonnement cosmique) ce qui rend difficile leur prise en compte statistique. Par ailleurs, la combinaison de l'influence des forçages ne se résume pas toujours à un cumul arithmétique. En effet, un forçage externe naturel ou anthropique peut aussi influencer les variations intrinsèques comme l'amplitude ou la fréquence d'oscillations climatiques (ENSO et NAO).

La corrélation temporelle entre forçage et climat ne suffisant pas pour établir les liens de causalité, il est important et complémentaire d'envisager une deuxième voie fondée sur les mécanismes et les rétroactions climatiques associées. Les processus de base sont régis par des lois physico-chimiques et l'évaluation de leur influence sur le climat global et régional peut être réalisée à l'aide de modèles numériques du climat. La variété des forçages implique que ces modèles possèdent un niveau de sophistication élevée tout en permettant des simulations longues de plusieurs siècles. L'utilisation des modèles de circulation générale permet d'étudier finement les rétroactions climatiques qui amplifient ou atténuent le signal radiatif lié à un forçage particulier ainsi que d'envisager la combinaison multiple des forçages.

L'influence des variations de l'irradiance solaire totale est l'objet d'une abondante littérature depuis les années 70. La prise en compte des variations spectrales (notamment UV) a suivi vers le milieu des années 90. La principale complication réside dans l'utilisation d'un modèle numérique ayant une résolution satisfaisante pour simuler la dynamique de la stratosphère couplée à la troposphère et incluant un module représentant la chimie atmosphérique. Ces simulations permettent de comparer et combiner les influences respectives des variations de l'irradiance solaire totale et des fluctuations spectrales du Soleil.

En plus de ces effets directs, une hypothèse déjà ancienne a été relancée en comparant la nébulosité et le flux de rayons cosmiques. On peut faire le parallèle (simpliste) avec le principe de la « chambre à brouillard », détecteur de physique dans lequel les particules ionisantes se comportent comme des germes de condensation dont les trajectoires se matérialisent par des traînées de gouttelettes. Cette hypothèse a fait grand bruit lorsque l'équipe danoise, déjà mentionnée, a signalé une corrélation positive entre la couverture nuageuse et l'intensité du rayonnement cosmique modulée par le Soleil pendant la période de 1984 à 1991. Les études ultérieures n'ont pas confirmé cette correspondance.

Il faut souligner que l'impact climatique des nuages dépend fortement de leurs propriétés radiatives et donc de leur altitude. La modulation solaire envisagée en 1997 devait induire une diminution des nuages de haute altitude aux latitudes élevées, lors d'une période de forte activité solaire. Or ces nuages de haute altitude ont globalement tendance à chauffer la surface terrestre, et non à la refroidir comme le font les nuages de basse altitude. L'hypothèse était donc incompatible avec l'apparente corrélation entre l'activité solaire et le réchauffement durant le xx^e siècle. Ces auteurs ont ensuite modifié leur analyse en proposant une influence solaire limitée aux nuages de basse altitude dont la couverture semblait mieux suivre les fluctuations solaires. Ce changement d'hypothèse peut surprendre car on s'attendrait 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 abondent déjà.

Plusieurs équipes ont étudié en détail l'hypothèse d'un impact des rayons cosmiques sur la formation de noyaux de condensation et leurs conséquences sur l'atmosphère. Ces études variées se fondent sur des données d'observation au sol et par avion de la formation d'aérosols atmosphériques, sur le cas de perturbations rapides du rayonnement cosmique galactique lors des effets Forbush liés aux éjections de masse coronale du Soleil et enfin sur les premières simulations numériques intégrant la formation des noyaux de condensation par le rayonnement cosmique. Ces travaux récents, différents et complémentaires dans leurs approches, conduisent pour l'instant à la conclusion que les rayons cosmiques n'ont pas d'influence majeure sur le climat actuel.

Bien évidemment, de nombreuses incertitudes subsistent encore et ces travaux devront être reproduits et vérifiés. Une approche expérimentale conduite au CERN devrait permettre d'évaluer la production d'aérosols par des particules énergétiques arrivant dans différents mélanges gazeux (expérience CLOUD). Par ailleurs, d'autres hypothèses d'interaction entre les particules ionisantes et l'atmosphère ont été envisagées (par ex. sur les courants électriques atmosphériques) et devront faire l'objet d'observations directes et de modélisation numérique. De même, les observations et modélisations en astrophysique solaire devraient nous en apprendre beaucoup plus sur les modes de variation du Soleil aux différentes échelles de temps. Tous ces mécanismes méritent des études complémentaires ; l'importance de leur rôle reste à établir sur des bases scientifiques convaincantes.

Séminaires

En complémentarité avec les 14 cours à Paris, Bruxelles, Toulouse, Orléans, Zürich, Princeton et Harvard, 9 séminaires ont été organisés dans le cadre d'un colloque intitulé « L'océan et les changements climatiques » organisé le 27 mai 2011 au Collège de France.

Édouard Bard (Collège de France & CEREGE, Aix-en-Provence) : « Perspective sur le réchauffement actuel et l'absorption du CO₂ par l'océan ».

David Antoine (CNRS, Observatoire océanologique de Villefranche-sur-Mer) : « Changements récents de la biomasse océanique révélés par les observations satellitaires de la "couleur de l'océan" ».

Jean-Pierre Gattuso (CNRS, Observatoire océanologique de Villefranche-sur-Mer) : « Acidification de l'océan et son impact sur les organismes et écosystèmes marins ».

Anny Cazenave (CNES, LEGOS, Toulouse) : « Niveau de la mer, températures de l'océan et fonte des glaces ».

Herlé Mercier (CNRS, Laboratoire de physique des océans, Brest) : « Changement de l'hydrologie et de la circulation océanique : l'exemple de l'Atlantique Nord ».

Éric Guilyardi (CNRS, LOCEAN, Paris & Université de Reading) : « Modélisation numérique de l'océan : comprendre et anticiper les variations du climat ».

Laurent Bopp (CNRS, LSCE, Gif-sur-Yvette) : « Couplage entre changement climatique et biogéochimie marine : apports de la modélisation numérique ».

Résumé du colloque

L'océan est si vaste et si profond que nous oublions son rôle crucial dans les équilibres terrestres. En stockant et en répartissant la chaleur à grande échelle par d'incessants mouvements en surface et en profondeur, il est le grand régulateur thermique de notre climat. L'océan est aussi perturbé par les activités humaines à de multiples échelles, allant de la pollution locale des eaux côtières à des perturbations, souvent invisibles, à l'échelle planétaire. Le réchauffement de l'atmosphère, observé depuis un siècle, gagne l'océan qui, du fait de son volume et des propriétés de l'eau liquide, stocke déjà l'essentiel de la chaleur excédentaire. L'océan absorbe également environ le tiers du gaz carbonique rejeté par la combustion des carbonés fossiles, la déforestation et la dégradation des sols.

Le réchauffement de l'océan affecte aussi la vie marine, d'un bout à l'autre de la chaîne alimentaire : du plancton jusqu'aux poissons et mammifères prédateurs. Les organismes des profondeurs seront aussi touchés par les modifications de la ventilation des masses d'eau. Parallèlement à la perturbation climatique qu'il contribue à provoquer, le gaz carbonique acidifie les eaux de surface de l'océan, ce qui entraîne d'autres conséquences sur la vie marine, en particulier les organismes dont les coquilles sont composées de calcaire. Toutes ces influences climatiques se surimposent graduellement aux effets néfastes, déjà très visibles, de la pollution et de la surpêche.

Les orateurs du colloque se sont attachés à illustrer les observations faites de ces changements sur des aspects touchant à la physique de l'océan, ainsi qu'aux organismes biologiques. Dans sa présentation introductive, Édouard Bard, (Collège de France et CEREGE d'Aix-Marseille), nous a rappelé le rôle fondamental de l'océan dans la machinerie climatique, mais aussi et surtout que les perturbations anthropiques affectent ces mécanismes de façon globale et mesurable.

Emblématiques des changements en cours, le niveau de la mer, la température de l'océan et la fonte des glaces ont été présentés par Anny Cazenave (CNES, Laboratoire d'Études en Géophysique et Océanographie Spatiales, Toulouse). L'excès de chaleur du système climatique s'accumule pour plus de 80 % dans l'océan, qui, sous l'effet de la dilatation thermique, voit son niveau monter. À cela s'ajoute la contribution par la fonte des glaces continentales, qui est de plus en plus précisément connue grâce aux mesures d'altimétrie et de gravimétrie des satellites. Enfin, la meilleure connaissance du bilan hydrologique global, notamment avec le stock d'eau continentale, permet d'expliquer la variabilité inter-annuelle du niveau de la mer.

Herlé Mercier (CNRS, Laboratoire de Physique des Océans, Brest) a pris exemple des changements de l'hydrologie et de la circulation océanique dans l'Atlantique Nord, pour illustrer la difficulté des études actuelles pour séparer des observations le signal d'origine anthropique des variations en lien avec les oscillations naturelles.

En parallèle au changement climatique, l'excès de CO₂ atmosphérique pénètre dans l'océan, participe à son acidification, ce qui devrait affecter les organismes et écosystèmes marins. Jean-Pierre Gattuso (CNRS, Observatoire Océanologique de Villefranche-sur-Mer) a parfaitement illustré cette thématique de recherche récente mais en forte progression, notamment parce que le changement physico-chimique est non seulement avéré, mais cette acidification va se poursuivre à une rapidité sans précédent au cours des derniers millions d'années.

Les conséquences pour les écosystèmes ou les impacts socio-économiques sont encore largement sous-documentés. David Antoine (CNRS, Observatoire Océanologique de Villefranche-sur-Mer) a montré comment la variation de la biomasse marine, essentiellement estimée par la teneur en chlorophylle via différentes techniques (couleur de l'eau, mesures *in situ*), faisait l'objet de controverses depuis fort longtemps. L'apport des mesures par satellites permet des analyses globales et de relier ces variations d'abondances et de distribution du phytoplancton dans le Pacifique et l'Atlantique aux oscillations décennales des propriétés physiques de ces bassins océaniques. Hélas, la durée d'acquisition encore trop courte de ces données satellites (deux décennies) ne permet pas de fournir de réponses définitives sur le lien entre changement climatique et variations de la biomasse marine.

Les modèles numériques de l'océan et du système climatique, sont des outils indispensables, à la fois pour comprendre les mécanismes climatiques et pour évaluer les évolutions futures. Éric Guilyardi (CNRS, Laboratoire d'Océanographie et du Climat : Expérimentation et Approches Numériques, Paris, & Université de Reading) et Laurent Bopp (CNRS, Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement, Gif-sur-Yvette) ont présenté les derniers développements de ces outils informatiques, portant notamment sur le niveau de détail des processus pris en compte, avec la modélisation toujours plus complexe des écosystèmes et de la biogéochimie marine. Qu'il s'agisse des observations ou de la modélisation, toutes ces avancées dans la compréhension du lien entre l'océan et le climat prennent tout leur poids à l'heure des discussions internationales sur les actions à mener face au changement climatique.

CONFÉRENCES ET PRÉSENTATIONS

– Bard E. : « Construction d'indicateurs : Proxies océaniques, Niveau des mers, Carottes sédimentaire », Grenoble, 8 septembre 2010, réunion Sud-Est du comité de pilotage « climat-CoNRS », Laboratoire de glaciologie et de géophysique de l'environnement, Saint-Martin-d'Hères.

– Bard E. : « Les mécanismes physicochimiques », Paris, 20 septembre 2010, Académie des sciences, débat scientifique sur le climat.

– Deschamps P., Bard E. : « The last deglaciation: A review based on Tahiti coral data », Bristol (UK), 21-24 septembre 2010, colloque PALSEA sur l'évolution du niveau marin et des calottes de glace (PAGES-IGBP working group).

– Bard E. : « Climate change, the Sun and greenhouse gases », Paris, 31 janvier 2011, Fondation du Collège de France.

– Durand N., Deschamps P., Bard E., Hamelin B., Camoin G., Thomas A.L., Henderson G.M., Yokoyama Y. : « New insights into the radiocarbon calibration based on ¹⁴C and U-Th dating of corals drilled offshore Tahiti (IODP Expedition #310) » ; Deschamps P., Durand N., Bard E., Hamelin B., Camoin G., Thomas A.L., Henderson G.M., Yokoyama Y. : « A dramatic ice sheet collapse at the onset of the Bölling warming at 14.6 kyr: New evidence from the IODP "Tahiti Sea-Level" Expedition » ; Camoin G.F., Searc C., Deschamps P., Webster J.M., Abbey E., Braga J.C., Iryu Y., Durand N., Bard E., Hamelin B., Yokoyama Y., Thomas A., Henderson G. : « Reef response to sea-level and environmental changes during the last deglaciation. IODP Expedition 310 "Tahiti Sea Level" » ; Felis T., Hathorne E.C., Asami R., Deschamps P., Kölling M., Bard E., Cabioch G., Durand N., James R.H., Thomas A.L., Merkel U., Prange M., Schulz M., Cahyarini S.Y., Pfeiffer M. : « Potential of last deglacial Tahiti corals for subseasonal climate reconstructions (IODP Expedition 310)-New approaches in screening for diagenetic alteration », Cascais (Portugal), 7-9 février 2011, European Science Foundation, Final Euromarc Conference.

– Barlyaeva T., Bard E. : « Phase lags between 11-yr cycles of sunspot number, cosmic ray flux and length of day time series » ; Bard E. : « Impact du rayonnement cosmique et du Soleil sur le climat » (conférence invitée), Montpellier, 26 juin-1^{er} juillet 2011, International workshop on Cosmic rays & their interstellar medium environment (CRISM-2011 organisé par le LUPM, IN2P3-INSU U. Montpellier 2).

– Bard E. : « A review on sea-level changes during déglaciations » (conférence invitée) ; Tachikawa K., Vidal L., Bard E. : « The observational records of ocean conditions and biogeochemistry during the Holocene: in the case of Western Pacific Warm Pool » ; Bonnet N., de Garidel-Thoron T., Ménot G., Beaufort L., Buchet N., Bard E. : « Terrigenous

input and microcharcoal changes in the Gulf of Papua during the last 60 kyrs », Berne (Suisse), 25-28 juillet 2011, Congrès INQUA (International Union for Quaternary Research).

– Bard E. : « Geochemical profiles to study the Last Deglaciation and its impact on rivers » (conférence invitée en séance plénière) ; Soulet G., Ménot G., Bayon G., Rostek F., Ponzevera E., Lericolais G., Bard E. : « Binge/purge oscillations of the thawing Fennoscandian ice sheet revealed by ϵNd and biomarkers » ; Rostek F., Bard E. : « Wetland extension on the Russian plain over the past 40 Kyr: A biomarker approach from the Black Sea » ; Sanchi L., Menot G., Bard E. : « Distribution of branched tetraether lipids in a Black Sea sediment core: insights into continental temperature evolution in Central Europe over the past 40000 years » ; Ménot G., Bard E. « Quantitative reconstruction of millennial-scale temperature variations in Central Europe » ; Bonnet N., de Garidel-Thoron T., Ménot G., Beaufort L., Buchet N., Bard E. : « Terrigenous input and microcharcoal changes in the Gulf of Papua during the last 60 kyr » ; Baroni M., Bard E., Petit J.-R., Magand O., Bourles D. : « Volcanic, solar activity, and atmospheric circulation influences on cosmogenic ^{10}Be fallout at Vostok and Concordia (Antarctica) over the last 60 years », Prague (Rep. tchèque), 14-19 août 2011, 21st V.M. Goldschmidt Conference (réunion annuelle de la Geochemical Society).

ÉMISSIONS RADIOPHONIQUES

– « La tête au carré » sur France Inter, émission du jeudi 26 mai 2011 : L'Océan, le climat et nous, un équilibre fragile ? [<http://www.franceinter.fr/em/lateteaucarre/104424>].

– « Autour de la question » sur RadioFrance International, émission du vendredi 8 avril 2011 : Et si l'on regardait l'océan et le climat depuis l'Espace ? [<http://www.rfi.fr/emission/20110408-1-on-regardait-ocean-le-climat-depuis-espace>]

– « La marche des sciences » sur France Culture, émission du jeudi 22 septembre 2011 : L'Océan et la machine climatique [<http://www.franceculture.com/emission-la-marche-des-sciences-1%E2%80%99ocean-et-la-machine-climatique-2011-09-22.html>].

ACTIVITÉS DE RECHERCHES

Nos recherches réalisées au CEREGE d'Aix-en-Provence vont bénéficier d'une formidable accélération dans tous les sens du terme. En effet, l'Agence nationale de la recherche a retenu le projet ASTER-CEREGE dans le cadre de l'appel d'offre EQUIPEX du Grand Emprunt national. Ce projet, coordonné par le professeur Édouard Bard, directeur-adjoint du CEREGE, sera doté par l'ANR de 2,7 millions d'euros pour des équipements analytiques, et d'un million d'euros destinés à leur fonctionnement jusqu'en 2020.

La plateforme de géochimie isotopique ASTER-CEREGE sera administrée par l'université Aix-Marseille en collaboration avec les autres tutelles de l'UMR 6635 CEREGE : le CNRS/INSU, le Collège de France et l'IRD, et en partenariat avec un laboratoire de l'INRA installé sur le même campus du technopôle méditerranéen de l'Arbois à Aix-en-Provence.

L'objectif du projet ASTER-CEREGE est d'étendre et de diversifier la gamme instrumentale des équipements de géochimie isotopique et de les conforter au meilleur niveau international actuel. Le projet est composé de trois volets d'instrumentation complémentaires : un spectromètre de masse par accélérateur (AMS) miniature dédié spécifiquement à la mesure du carbone 14 de micro-échantillons gazeux et solides ; un spectromètre de masse à source plasma et

multicollecteur (MC-ICPMS) ; une source d'ions plus performante pour l'accélérateur ASTERisques de 5 MV déjà présent sur le site. Ces trois volets d'équipement seront utilisés de manières combinées pour des recherches suivant des thématiques scientifiques ancrées sur les grands débats de société en cours.

Étude du cycle du carbone

En plus de son utilisation comme géochronomètre, le ^{14}C naturel est le meilleur traceur géochimique pour étudier le cycle du carbone et en déterminer les constantes de temps. Les perturbations anthropiques, comme la combustion des carbones fossiles (dépourvus de ^{14}C) et l'injection de ^{14}C thermonucléaire sont des contributions supplémentaires qui permettent aussi de suivre la propagation de signaux transitoires et de compléter les estimations fondées sur la distribution du ^{14}C naturel. Les objectifs scientifiques de notre projet concernent la compréhension et le suivi du cycle du carbone et des échanges naturels et anthropiques de CO_2 entre l'atmosphère, l'océan, la végétation et les sols grâce au traçage par le ^{14}C .

En donnant la possibilité de mesurer le ^{14}C dans des échantillons de moins d'un milligramme de carbone, l'AMS a décuplé l'utilité de ce traceur géochimique, devenu quantifiable dans pratiquement toutes les phases organiques et minérales, solides, liquides ou gazeuses contenant du carbone. Développée dans les années 80, l'AMS a supplanté les techniques de comptage de la radioactivité du ^{14}C , mais plusieurs aspects rendent les analyses difficiles et onéreuses, notamment l'utilisation d'un accélérateur de haute tension (3 MV) et d'une source d'ions issus de pastilles de carbone solide.

Le premier accélérateur dédié à l'AMS en France a été le Tandetron de Gif-sur-Yvette dont la moitié du « temps machine » servait aux mesures de ^{14}C . En 2005, le Tandetron a été remplacé par l'accélérateur national ARTEMIS installé à Saclay, de conception similaire au Tandetron : source d'ions à pulvérisation (*sputtering*) par bombardement d'ions césium sur des cibles de graphite, tension d'accélération de 3 MV pour obtenir des rendements de conversion de charges suffisants au niveau de l'éplucheur (*stripper*), ceci afin de pouvoir analyser des ions positifs triplement chargés dans l'étage de haute énergie après l'accélérateur tandem. Cette technologie fiable et robuste, permet la production de données ^{14}C en routine. En parallèle, plusieurs groupes en Europe et aux États-Unis ont poursuivi des recherches techniques pour moderniser l'AMS aboutissant à des progrès majeurs : d'une part, une miniaturisation du système avec l'analyse d'ions positifs monochargés issus de l'accélérateur fonctionnant sous une tension réduite (quelques centaines de kV), d'autre part, la mesure directe des rapports isotopiques avec une source à gaz carbonique. Ceci permet de s'affranchir de l'étape de réduction du CO_2 en graphite, ouvrant la voie à des couplages analytiques pour aller encore plus loin dans la sélectivité du carbone analysé.

La reconstitution des variations passées du niveau marin

Nos études sont fondées sur la datation d'archives naturelles (coraux, stalagmites) par les méthodes des séries de l'uranium et du thorium (voir par exemple page 11 de *La Lettre* n° 28 avec un bref article décrivant nos travaux récents sur les récifs fossiles de Tahiti). Les données obtenues sont cruciales pour quantifier et comprendre la réponse des calottes de glace polaires aux variations du climat, ainsi que les

impacts sur le littoral actuel. Ces questions sont d'une grande actualité à la lumière des débats en cours sur les conséquences du réchauffement climatique, et sur la prévision de la remontée probable du niveau marin.

L'équipe du CEREGE s'est positionnée parmi les leaders mondiaux pour la reconstitution du niveau marin grâce aux datations de coraux fossiles, à l'aide de spectromètres de masse à thermo-ionisation (TIMS) de conception relativement ancienne (années 1990). L'acceptation du projet EQUIPEX ASTER-CEREGE devrait permettre de maintenir notre compétitivité par l'acquisition d'un spectromètre à source plasma double focalisation à secteur magnétique et multi-collection (MC-ICPMS). Cette technologie combine les avantages conceptuels et techniques de la spectrométrie de masse à thermo-ionisation et des ICP-MS quadripolaires. Du fait de l'introduction de l'échantillon dans une source plasma, ce type d'instrument permet un rendement d'ionisation élevé pour la majorité des éléments, ouvrant de nouveaux domaines en géochimie et géochronologie.

L'instrument de type MC-ICPMS qui intégrera la plateforme ASTER-CEREGE viendra en complément des deux TIMS qui composent le parc analytique actuel du CEREGE et sera le premier instrument de seconde génération spécifiquement dimensionné pour les analyses isotopiques des séries U-Th en France. Ceci devrait permettre de découpler notre rythme de production d'analyses ainsi que leur précision. En complément de cet instrument, une jouvence des salles blanches annexées au laboratoire de spectrométrie de masse est prévue afin de constituer une plateforme homogène de pointe.

De nombreuses autres applications de la géochimie isotopique

Les thèmes mentionnés plus haut constituent deux volets importants du projet EQUIPEX ASTER-CEREGE. D'autres applications seront envisagées, notamment celles liées au troisième volet d'équipement avec l'installation d'une nouvelle source d'ions pour l'accélérateur ASTERisques, mis en service en 2006 sur le campus du CEREGE. Cette acquisition permettra d'augmenter l'efficacité d'ionisation des échantillons et donc de dépasser les limitations actuelles à l'interprétation des données dues à la précision limitée par la statistique de comptage et la quantité des mesures effectuées.

Cette modernisation d'ASTERisques sera déterminante pour mener à bien les projets du CEREGE fondés sur la mesure d'autres cosmonucléides que le ^{14}C , notamment le béryllium 10 et le chlore 36. Notre équipe conduit les analyses de ces isotopes dans des carottes superficielles et profondes de la calotte glaciaire de l'Antarctique. L'étude conjointe des cosmonucléides ^{14}C , ^{10}Be et ^{36}Cl permet, entre autres, de reconstituer les variations de l'activité solaire, notamment pour les périodes récentes des derniers millénaires aux dernières décennies. Notre objectif est de quantifier les évolutions récentes des forçages climatiques naturels du Soleil et des volcans et de les comparer à la perturbation anthropique due aux gaz à effet de serre (programme ANR VolSol, coordonné par Édouard Bard).

Dans le cadre du projet ASTER-CEREGE, nous étudierons aussi d'autres perturbations géochimiques en cours dans l'environnement en réponse aux changements globaux et aux multiples pressions anthropiques. Une approche novatrice de traçage isotopique multi-élémentaire permettra d'étudier la distribution naturelle et la dispersion anthropique de certains métaux (U, Th, Pa, Mo, Pb, Sr, Nd, Fe, Si, etc.).

En parallèle des sujets de recherche fondamentale de forte actualité scientifique et en pointe au niveau international, notre projet représente également une ouverture délibérée vers des sujets de recherche valorisée (qualité des sols et des eaux, contrôle des émissions de carbone et de certains radioéléments, matériaux du nucléaire, etc.) Ce volet appliqué nécessitera encore de nouveaux développements méthodologiques pour utiliser pleinement nos outils d'AMS et de MC-ICPMS. La plateforme de géochimie ASTER-CEREGE continuera à ce titre à assurer sa pleine participation aux activités de deux pôles de compétitivité « Gestion des risques et vulnérabilité des territoires » et « Eau ».

PUBLICATIONS

2011

Baroni M., Bard E., Petit J.R., Magand O., Boulès D., « Volcanic, solar activity, and atmospheric circulation influences on cosmogenic ^{10}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., 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., 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., 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., 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., 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., 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., 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-Dudon B., 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., Udisti U. Unified Antarctic and Greenland climate seesaw during the last deglaciation, *Nature Geoscience*, 4, 2011, 46-49 + 32 p. suppl. [doi: 10.1038/NGEO1026].

Tachikawa K., Cartapanis O., Vidal L., Beaufort L., Bard E., « The precession phase of hydrological variability in the Western Pacific Warm Pool during the past 400 ka », *Quaternary Science Reviews*, 30, 2011, 3716-3727 [doi: 10.1016/j.quascirev.2011.09.016].

2010

Bard E., Hamelin B., Delanghe-Sabatier D., « Deglacial melt water pulse 1B and Younger Dryas sea-levels revisited with new onshore boreholes at Tahiti », *Science*, 327, 2010, 1235-1237 + 15 p. suppl.

Leduc G., Vidal L., Tachikawa K., Bard E., « Evidences for Glacial North Pacific Intermediate Water formation during the last glacial period », *Earth and Planetary Science Letters*, 298, 217-228 [doi:10.1016/j.epsl.2010.08.002].

Legras B., Mestre O., Bard E., Yiou P., « A critical look at solar-climate relationships from long temperature series », *Climate of the Past*, 6, 2010, 745-758 [doi:10.5194/cp-6-745-2010].

Ménot G., Bard E., « Geochemical evidence for a large methane release during the last deglaciation from Marmara Sea sediments », *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 74, 2010, 1537-1550 [doi:10.1016/j.gca.2009.11.022].

Rincon-Martinez D., Lamy F., Contreras S., Leduc G., Bard E., Saukel C., Blanz T., Mackensen A., Tiedemann R., « Wetter interglacials in Ecuador during the past 500 kyr and its relation to latitudinal shifts of the Equatorial Front in the eastern tropical Pacific », *Paleoceanography*, 25, 2010, PA2210, 1-15 [doi:10.1029/2009PA001868].

Siddall M., Abe-Ouchi A., Andersen M., Antonioli F., Bamber J., Bard E., Clark J., Clark P., Deschamps P., Dutton A., Elliot M., Gallup C., Gomez N., Gregory J., Huybers P., Kawamura K., Kelly M., Lambeck K., Lowell T., Mitrovica J., Otto-Bliesner B., Richards D., Stanford J., Stirling C., Stocker T., Thomas A., Thompson B., Törnqvist T., Vazquez Riveiros N., Waelbroeck C., Yokoyama Y., « The sea-level conundrum: case studies from palaeo-archives », *Journal of Quaternary Science*, 25, 2010, 19-25 [doi: 10.1002/jqs.1270].

Soulet G., Delaygue G., Vallet-Coulomb C., Böttcher M.E., Sonzogni C., Lericolais G., Bard E., « Glacial hydrologic conditions of the Black Sea reconstructed by means of geochemical pore water profiles », *Earth and Planetary Science Letters*, 296, 2010, 57-66 [doi:10.1016/j.epsl.2010.04.045].

Thevenon F., Williamson D., Bard E., Anselmetti F.S., Beaufort L., Cachier H., « Combining charcoal and elemental black carbon analysis in sedimentary archives: Implications for past fire regimes, the pyrogenic carbon cycle, and the human-climate interactions », *Global and Planetary Change*, 72, 2010, 381-389 [doi:10.1016/j.gloplacha.2010.01.014].

Vidal L., Ménot G., Joly C., Bruneton H., Rostek F., Cagatay N., Major C., Bard E., « Marmara Sea hydrology over the last 23000 years: implications for the connection with the Black Sea and the sapropel deposition », *Paleoceanography*, 25, 2010, PA1205, 1-16 [doi: 10.1029/2009PA001735].

Yiou P., Bard E., Dandin P., Legras B., Naveau P., Rust H.W., Terray L., Vrac M., « Statistical issues about solar-climate relations », *Climate of the Past*, 6, 2010, 565-573 [doi:10.5194/cp-6-565-2010].

Textes divers (vulgarisation, livres & chapitres, préfaces)

Bard E. (éd.), *L'Océan, le climat et nous : un équilibre fragile ?*, Éditions Le Pommier & Universcience, 2011, 168 pp.

Bard E. et al., *Climat : Une planète et des Hommes*, Éditions Le Cherche Midi, 2011, 335 pp.

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

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

Bard E., « Les changements climatiques récents sont-ils dus au Soleil », *Climat : Une planète et des Hommes*, Éditions Le Cherche Midi, 2011, 188-197.

Bard E., « Introduction sur les forçages naturels », *Le climat à découvert*, Éditions du CNRS, 2011, 189-190.

Chappellaz J., Petit J.R., Grousset F., Bard E., « Inclusions minérales et gazeuses dans les glaces », in « Le climat à découvert », Éditions du CNRS, 2011, 123-124.

Sicre M.A., Khodri M., Mignot J., Allard P., Balkanski Y., Bard E., « Effet des éruptions volcaniques sur le climat », *Le climat à découvert*, Éditions du CNRS, 2011, 201-203.

Bard E., « J'ai le devoir de prendre part au débat sur le climat », *La Recherche*, 439, 2010, 68-69.

Bard E., Préface du livre Sur les origines de l'effet de serre et du changement climatique, *La Ville Brûle*, 2010, 7-16.

Leduc G., Vidal L., Cartapanis C., Bard E., « Modes of eastern equatorial Pacific thermocline variability: implications for ENSO variability over the last glacial period », *PAGES News*, 18(1), 2010, 34-36.

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).

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).

DISTINCTION

2010, élu membre de l'Académie des sciences.

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

