

Annuaire du Collège de France

122^e année

2021
2022

Résumé des cours et travaux



COLLÈGE
DE FRANCE
— 1530 —

ÉVOLUTION DU CLIMAT ET DE L'OCÉAN

Edouard Bard

Membre de l'Institut (Académie des sciences),
professeur au Collège de France

La série de cours « Climats extrêmes et analogues actuels : l'Holocène et le Tardiglaciaire » est disponible, en audio et vidéo, sur le site internet du Collège de France (<https://www.college-de-france.fr/fr/agenda/cours/climats-extremes-et-analogues-actuels-holocene-et-le-tardiglaciaire>), tout comme le colloque « Variations de la circulation globale de retournement de l'océan » (<https://www.college-de-france.fr/fr/agenda/colloque/variations-de-la-circulation-globale-de-retournement-de-ocean>).

ENSEIGNEMENT

COURS - CLIMATS EXTRÊMES ET ANALOGUES ACTUELS : L'HOLOCÈNE ET LE TARDIGLACIAIRE

Il faut replacer le réchauffement climatique du dernier siècle dans un contexte temporel plus large afin d'en déterminer la singularité et de distinguer les causes sous-jacentes, naturelles et anthropiques. Les variations climatiques allant de la fin de la dernière période glaciaire, le Tardiglaciaire, au début de la période interglaciaire actuelle, l'Holocène, servent à tester de multiples hypothèses avec une fiabilité des observations généralement suffisante. Cette période de transition a été particulièrement tourmentée avec des variations majeures des principaux paramètres climatiques et des épisodes transitoires opposés à l'amélioration climatique postglaciaire.

E. Bard, « Évolution du climat et de l'océan », *Annuaire du Collège de France. Résumé des cours et travaux*, 122^e année : 2021-2022, 2025, p. 159-168, <https://journals.openedition.org/annuaire-cdf/20470>.

Cours 1 - Forçages climatiques de la déglaciation

La période en question a duré environ dix millénaires depuis 21 000 jusqu'à 11 600 ans avant le présent (BP : *before present*). Elle a été suffisamment longue pour que les lentes variations de l'orbite terrestre aient imprimé leur influence sur le climat. En effet, la géométrie de l'orbite terrestre et la position de la Terre pendant sa révolution annuelle évoluent suivant des cycles liés à l'attraction du Soleil et des autres planètes. L'excentricité de l'ellipse orbitale varie suivant des cycles d'environ 100 000 et 400 000 ans. L'obliquité, c'est-à-dire l'angle d'inclinaison de l'axe de rotation de la Terre par rapport au plan écliptique, suit un cycle d'environ 41 000 ans. La précession climatique exprimée par l'angle entre la position sur l'orbite de l'équinoxe de printemps et celle du périhélie, point le plus proche du Soleil, varie avec des périodes proches de 19 000 et 23 000 ans. La distance Terre-Soleil étant modulée par l'excentricité, le paramètre de précession climatique tient compte des deux paramètres orbitaux.

Ces variations de la géométrie de l'orbite terrestre se combinent pour faire varier l'insolation en fonction des saisons et des latitudes. Ces fluctuations de l'insolation régionale et saisonnière sont la cause première des cycles glaciaire-interglaciaire de l'époque du Pléistocène. La transition Pléistocène-Holocène est caractérisée par une augmentation de l'insolation estivale aux latitudes élevées de l'hémisphère Nord. Vers 11 500 ans BP, une obliquité maximale et une distance Terre-Soleil minimale au solstice d'été ont favorisé la fonte des calottes de glace situées en Amérique et en Europe du Nord.

Les glaciations ont eu d'énormes conséquences sur le cycle mondial du carbone qui a répondu par des baisses des teneurs atmosphériques en gaz à effet de serre comme le dioxyde de carbone, le méthane et le protoxyde d'azote. Les covariations de CO₂, CH₄ et N₂O ont amplifié les cycles glaciaires, notamment les phases de déglaciation comme la dernière qui a précédé l'Holocène.

Cours 2 - Extension des glaces pendant la déglaciation

En plus des changements du bilan radiatif terrestre mentionnés dans le premier cours, les cycles glaciaires ont induit une deuxième rétroaction positive en changeant fortement l'albédo, le coefficient de réflexion du rayonnement solaire incident, notamment au niveau des surfaces terrestres englacées. Le retrait postglaciaire des calottes de glace Laurentienne et Fennoscandienne a donc favorisé la transition climatique des hautes latitudes de l'hémisphère Nord.

Pour estimer cette contribution au cours du temps, il est nécessaire de quantifier l'engagement des continents pendant le Tardiglaciaire. Une première approche est de convertir les enregistrements du niveau marin en termes d'extension des calottes. Une méthode plus directe consiste à cartographier les traces géomorphologiques laissées par les glaciers continentaux. Ces marques sont étudiées depuis le XIX^e siècle, mais ce n'est que récemment qu'elles peuvent être datées en mesurant le temps d'exposition

des roches aux rayons cosmiques. Des cosmonucléides (^{10}Be , ^{26}Al , ^{36}Cl , ^{14}C , ^3He , ^{21}Ne) sont formés dans les blocs erratiques et les roches moutonnées que l'on analyse à l'aide de la spectrométrie de masse par accélérateur. En complément de datations classiques au radiocarbone, ces mesures de cosmonucléides *in situ* ont permis de reconstituer l'extension maximale des calottes glaciaires ainsi que leur retrait progressif au cours du Tardiglaciaire. Avec l'aide de modèles représentatifs des calottes, il est ensuite possible de cartographier les surfaces et les altitudes des glaces terrestres puis de les convertir en unité de forçage radiatif.

Un travail similaire est réalisé pour estimer l'étendue et les variations spatiales et temporelles de la glace de mer. Plusieurs indicateurs micropaléontologiques et géochimiques analysés dans les sédiments marins des zones polaires permettent de reconstituer l'extension annuelle et saisonnière de cette banquise dont l'effet sur l'albédo des hautes latitudes se cumule à celui des calottes continentales.

Cours 3 - Réchauffement postglaciaire, comparaisons données-modèles

Les paléoclimatologues ont développé de nombreux indicateurs pour estimer les températures des surfaces continentales et océaniques. Ces paléothermomètres sont principalement fondés, d'une part, sur la distribution d'espèces végétales (*e.g.* pollen, diatomées) ou animales (*e.g.* foraminifères) dont les aires d'habitat sont restreintes par les températures, et d'autre part, sur des indicateurs géochimiques (isotopes stables, éléments traces et molécules spécifiques) sensibles à la température. Plusieurs décentaines d'analyses de sédiments marins et lacustres ont permis de compiler plusieurs centaines d'enregistrements postglaciaires locaux et de cartographier les variations thermiques pour les différentes bandes de latitudes. Ces compilations montrent clairement un réchauffement postglaciaire précoce dans l'hémisphère Sud, contrastant avec une évolution complexe dans l'hémisphère Nord, caractérisée par deux transitoires froides centrées autour de 16 000 et 12 000 ans BP. À l'échelle mondiale, la température moyenne globale augmente significativement vers 17 000 ans BP, présente un renversement transitoire vers 12 000 ans BP, avant de se stabiliser vers 10 000 ans BP.

Une autre voie d'étude est d'utiliser les modèles climatiques perturbés par les forçages climatiques décrits dans les deux premiers cours. Ces modèles simulent un refroidissement glaciaire d'environ 5 °C, suivi d'un réchauffement unidirectionnel qui se poursuit pendant l'Holocène. L'absence de transitoire marquée à l'échelle mondiale ou régionale suggère que les forçages classiques sont insuffisants pour expliquer la complexité des changements climatiques du Tardiglaciaire.

La prise en compte séparée des forçages climatiques par les modèles démontre l'existence de biais systématiques dans les réponses à ces forçages. Comme nous l'avons étudié lors de cours précédents, le désaccord données-modèles au début de l'Holocène pourrait être lié à un biais de saisonnalité des indicateurs paléoclimatiques.

Néanmoins, une reconsideration récente de la modélisation montre la sensibilité des températures simulées à l'étendue de la banquise des régions polaires.

Une approche intermédiaire permet d'utiliser à la fois les séries temporelles observées et les modèles. Il s'agit d'une réanalyse par assimilation des données dont le principe est de corriger pas à pas la simulation temporelle du modèle, en tenant compte des divergences avec les évolutions observées au cours du pas de temps précédent. De façon logique, les premières applications à la déglaciation convergent vers une évolution intermédiaire par rapport aux séries indépendantes des modèles et des données : un refroidissement glaciaire d'environ 6 °C à l'échelle mondiale suivi d'un réchauffement marqué à partir de 17 000 ans BP, un faible renversement vers 12 000 et une stabilisation vers 8 000 ans BP, sans optimum holocène.

Cours 4 - La déglaciation et la circulation océanique globale

En plus des courants de surface liés à la tension des vents et à la force de Coriolis, la circulation océanique est caractérisée par un transport des masses d'eaux profondes à l'échelle mondiale *via* la circulation thermohaline ou circulation méridienne de retournement, deux appellations simplifiées qui ne rendent pas compte totalement de la complexité de ce système. En Atlantique Nord, les eaux salées d'origine subtropicale se refroidissent progressivement et plongent en profondeur dans plusieurs zones des mers nordiques et de la mer du Labrador. Ces plongées sont dues à l'augmentation de densité de l'eau de mer, mais les remontées dans les autres bassins sont liées à l'énergie mécanique du vent et des marées. Aujourd'hui, la circulation méridienne de retournement atlantique (AMOC) transporte environ 15 millions de mètres cubes par seconde (15 Sv) conduisant à un transport de chaleur vers le nord d'environ 1 pétawatt (1 PW = 10^{15} W). Cette chaleur océanique a une influence majeure sur les températures atmosphériques aux hautes latitudes de l'Atlantique Nord et de l'Europe du Nord. Étudier le phénomène actuel est cependant complexe car le réchauffement récent a probablement une influence sur l'AMOC dont l'équilibre naturel est perturbé.

La comparaison des variations de température postglaciaires pour les différentes bandes de latitude fait apparaître des contrastes systématiques avec un retard du réchauffement de l'hémisphère Nord qui est aussi marqué par deux renversements transitoires vers 16 000 et 12 000 ans BP. Ce contraste devient évident dans les courbes représentant le contraste thermique des deux hémisphères ou la décomposition en composantes principales. Les deux augmentations du gradient interhémisphérique et de la deuxième composante principale correspondent à deux minima de l'intensité de la circulation océanique profonde de l'Atlantique mis en évidence par des indicateurs géochimiques mesurés dans les sédiments marins.

Cours 5 - Circulation océanique et événement de Heinrich 1

L'influence climatique de la circulation globale de retournement peut être étudiée à l'aide de modèles numériques représentant l'atmosphère et l'océan, ainsi que les glaces marines et continentales. Une variété de modèles allant des plus simples (conceptuels) aux plus élaborés (couplages 3D) a permis de montrer que le système climatique possède plusieurs états stables caractérisés par des flux d'AMOC très contrastés. Le passage d'un état à l'autre est abrupt lorsqu'un seuil hydrologique est dépassé, mais les modèles ne sont pas encore d'accord sur les conditions définissant ces points de bifurcation.

L'autre voie d'étude de ces basculements du système climatique liés à l'AMOC consiste à reconstituer l'intensité de cette circulation à partir des sédiments océaniques. Les indicateurs de nature géochimique (rapports $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$, $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$, $^{230}\text{Th}/^{231}\text{Pa}$, $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$) ou sédimentologique (granulométrie) donnent une idée semi-quantitative de l'AMOC et convergent vers une réduction drastique pendant les transitoires froides du Tardiglaciaire : événement de Heinrich 1 centré vers 16 000 ans BP et Dryas récent vers 12 000 ans BP.

Ces refroidissements centrés sur l'Atlantique Nord et l'Europe sont les conséquences de la réduction du flux de chaleur océanique transporté normalement par l'AMOC (1 PW). La modélisation suggère que la cause des basculements serait liée à des perturbations hydrologiques de l'Atlantique Nord. Des décennies d'étude des sédiments marins ont permis de mettre en évidence et de cartographier l'augmentation des apports en eau douce provenant de la fonte des calottes de glace situées à la périphérie de l'Atlantique Nord (calottes laurentienne et fennoscandienne). Ce transport d'eau douce a eu lieu, d'une part, *via* la réactivation postglaciaire du drainage fluvial, et d'autre part, directement par vêlage d'icebergs dans l'océan, réduisant la densité des masses d'eau de surface au niveau des zones de convection de l'AMOC.

Cours 6 - Les calottes de glace et l'événement de Heinrich 1

La modélisation climatique d'un basculement de l'AMOC équivalent à l'événement Heinrich 1 indique une répartition spatiale caractéristique des changements de température de surface, avec un refroidissement centré sur l'Atlantique Nord et un réchauffement généralisé, quoique modéré, aux moyennes et hautes latitudes de l'hémisphère Sud. Certaines simulations suggèrent aussi un réchauffement des masses d'eau de subsurface en Atlantique Nord.

Les enregistrements sédimentaires indiquent que les renversements climatiques du Tardiglaciaire, Heinrich 1 et Dryas récent, font partie d'une succession d'instabilités rapides typique des périodes glaciaires. Plusieurs causes ont été proposées pour expliquer les événements de Heinrich caractérisés par des débâcles d'icebergs en Atlantique Nord : forçages externes, oscillations libres d'une calotte de glace, rétroaction des calottes en réponse aux perturbations océaniques et hydrologiques.

Dans le détail, les enregistrements sédimentaires démontrent la complexité de ces événements abrupts. Par exemple, l'événement de Heinrich 1 est constitué de deux phases successives dont les datations et l'origine font encore l'objet d'intenses recherches. Des indicateurs minéralogiques et géochimiques suggèrent des provenances différentes pour les icebergs (calottes laurentienne ou fennoscandienne). Certaines études invoquent aussi un retard des flux d'icebergs par rapport au renversement thermique. Cet éventuel déphasage implique que l'événement de Heinrich 1 ne serait pas la cause du refroidissement généralisé, mais une rétroaction amplifiant le phénomène de bascule climatique.

Une modélisation exhaustive du phénomène nécessite une représentation tridimensionnelle interactive des couplages entre l'océan, les calottes de glaces, les plateformes de glace et la banquise. Cette représentation doit être suffisamment détaillée pour prendre en compte le flux géothermique sous la calotte, la géométrie du contact entre la glace et le substratum rocheux, notamment au niveau du contact avec l'eau de mer (ligne d'échouage), ainsi que le réajustement isostatique durant la déglaciation. Les premières tentatives de modélisation complètes permettent d'identifier des mécanismes possibles pour expliquer les différentes phases observées, même s'il n'y a pas encore d'accord sur l'importance et le rôle exact de la phase de débâcle d'icebergs.

COLLOQUE - VARIATIONS DE LA CIRCULATION GLOBALE DE RETOURNEMENT DE L'OCÉAN

Le 10 juin 2022

L'objectif du colloque était de fournir un état des lieux des connaissances sur la Circulation globale de renversement (GOC : *Global Overturning Circulation*) de l'océan pour le passé, le présent et le futur. Sa composante atlantique (AMOC : *Atlantic Meridional Overturning Circulation*) est peut-être déjà affectée par le changement climatique actuel, dont une caractéristique notable est un « trou de réchauffement » observé dans les enregistrements récents de la température de surface de l'Atlantique Nord-Ouest. Néanmoins, l'existence et l'amplitude d'une tendance à long terme de l'AMOC et sa relation avec la température font encore l'objet de débats en raison d'une grande variabilité de l'AMOC à haute fréquence masquant une tendance relativement faible dans les données instrumentales des dernières décennies. Sur des échelles de temps plus longues, les conséquences des changements d'AMOC et de GOC sur le climat sont clairement perçues à l'échelle mondiale sous la forme d'un effet de bascule bipolaire entre les deux hémisphères. Pour le futur, les modèles numériques montrent que l'affaiblissement de l'AMOC accompagnera probablement le réchauffement climatique dû aux émissions de CO₂ d'origine anthropique. L'impact de l'amplitude future du forçage anthropique sur les simulations des modèles est également une source supplémentaire d'incertitude. Les conférenciers invités du colloque ont décrit des informations nouvelles sur ces différents aspects

allant de l'observation *in situ* de la circulation océanique, sa reconstitution sur des échelles de temps longues à partir d'observations paléoclimatiques, ses relations avec le cycle océanique du carbone et les différentes théories concernant sa dynamique fondées sur des modèles numériques.

Intervenants :

- Edouard Bard (Collège de France/Cerege, Aix-en-Provence) : « Introduction and paleoceanographic perspective »;
- Pascale Lherminier (Ifremer, Lops, IUEM, Brest) : « Observed variability of the Atlantic Meridional Overturning Circulation »;
- Juliette Mignot (IRD, Locean-IPSL, Paris) : « The Meridional Overturning Circulation: drivers, variability, and representation in numerical models »;
- Anne-Marie Tréguier (CNRS, Lops, IUEM, Brest) : « Importance of mesoscale processes for meridional transports, boundary currents and their variability »;
- Fortunat Joos (Université de Berne, Suisse) : « The role of the deep ocean circulation in the global carbon cycle: insights from model simulations »;
- Luke Skinner (Université de Cambridge, Royaume-Uni) : « Reconstructing and interpreting past changes in the Global Overturning Circulation and their impacts on the carbon cycle »;
- Gerrit Lohmann (Université de Brême, Allemagne) : « Modes and states of the Meridional Overturning Circulation »;
- Didier Swingedouw (CNRS, EpoC Bordeaux) : « On-going changes and possible fate of the North Atlantic ocean circulation and its impacts on climate and biodiversity ».

COURS À L'EXTÉRIEUR

- Université Aix-Marseille/Mucem Marseille, le 9 septembre 2021, un cours et huit séminaires (sous la forme d'un colloque) sur : « Les enjeux de la montée des mers »;
- Université Aix-Marseille/Cerege Aix-en-Provence, le 23 novembre 2021, un cours et huit séminaires (sous la forme d'un colloque) sur : « Le radiocarbone et les autres cosmonucléides pour la préhistoire ».

RECHERCHE

Le radiocarbone (^{14}C) est un outil de datation radiométrique et un traceur du cycle du carbone, mais les concentrations de ^{14}C dans les océans sont différentes de

celles dans l'atmosphère. Comprendre ces différences océan-atmosphère est important à la fois pour estimer les âges calendaires des échantillons marins, ainsi que pour étudier le cycle du carbone. Dans une synthèse sur le sujet (Skinner & Bard 2022), nous discutons de l'analyse du matériel fossile océanique, de la génération d'une courbe de référence atmosphérique et de l'interprétation des « métriques de ventilation » du ^{14}C marin par rapport à cette courbe de référence. Nous soulignons que le ^{14}C marin intègre les influences de l'évolution de la production cosmogénique, des échanges gazeux à l'interface air-mer, des temps de transport à l'intérieur de l'océan et du mélange des masses d'eau depuis la surface. La courbe de calibration du radiocarbone Marine20 fournit un enregistrement du ^{14}C océanique de surface à l'échelle mondiale qui tient compte de la réponse lissée de l'océan aux variations des taux de production cosmogénique et de la variation de paramètres climatiques à l'échelle mondiale. La courbe de calibration Marine20 sert également de référence pour étudier les variations régionales du ^{14}C océanique. Nous avons complété nos travaux précédents sur la construction et l'utilisation de la courbe Marine20 (Heaton *et al.* 2022, Bard & Heaton 2022). En parallèle, nous examinons les enregistrements disponibles sur la variabilité du ^{14}C marin au cours des 25 000 dernières années, en mettant en évidence l'influence des échanges océan-atmosphère sur le CO_2 atmosphérique et le climat (Skinner & Bard 2022).

Les glaciers de montagnes aux moyennes latitudes sont sensibles aux changements locaux de la température estivale. Les chronologies des fluctuations du passé fondées sur l'étude des reliefs glaciaires permettent une meilleure compréhension de la variabilité naturelle du climat à l'échelle locale. Dans une étude récente (Schimmelpfennig *et al.* 2022), nous nous concentrons sur la période holocène (11 600 dernières années) qui est un sujet de controverse quant à l'évolution de la température et des mécanismes sous-jacents. Nous avons combiné les datations obtenues grâce à deux cosmouncléides produits *in situ* (^{10}Be et ^{14}C) dans les mêmes roches qui étaient recouvertes par le glacier du Steingletscher dans les Alpes suisses. Les résultats suggèrent qu'après la déglaciation finale vers 10 000 ans BP, le glacier était similaire ou plus petit que son étendue moderne durant une période d'environ 7 millénaires. Ces résultats suggèrent que les températures estivales pendant le maximum thermique de l'Holocène étaient similaires à ceux de la fin du xx^e siècle.

L'histoire climatique du désert du Sahara au cours des derniers millénaires est relativement mal connue en raison de la rareté des archives géologiques. Nous avons contribué à une nouvelle étude de sédiments lacustres de l'oasis d'Ounianga Serir dans le nord du Tchad (Van der Meeran *et al.*, 2022). Les enregistrements couvrent la fin de l'Holocène et confirment qu'il y a environ 4 200 ans BP, le Sahara a connu un épisode d'hyperaridité encore plus extrême que le climat désertique actuel. Le lac terminal hypersalin ne s'est jamais asséché en raison de l'apport d'eaux souterraines, mais son bilan hydrique était sensible à la variation temporelle des précipitations locales et à l'évaporation. Nos enregistrements géochimiques montrent que les variations hydroclimatiques du Sahara central ont suivi l'intensité de la mousson tropicale

d'Afrique de l'Ouest, modulée sur de courtes échelles de temps par les régimes météorologiques liés aux changements de la circulation de l'océan Atlantique aux moyennes latitudes.

Le climat du début du Pléistocène est caractérisé par des cycles glaciaires de 41 000 ans, mais ceux-ci ont rarement été mis en évidence dans les archives continentales d'Amérique du Sud. Nous avons contribué à l'obtention et à l'étude d'enregistrements analysés dans les sédiments du bassin de Colonia au sud-est du Brésil (Rodríguez-Zorro *et al.*, 2022). L'approche est fondée sur la comparaison de multiples indicateurs comme les analyses chimiques élémentaires, les biomarqueurs, les charbons de bois, le pollen et les diatomées. Trois périodes glaciaires et quatre interglaciaires ont été identifiées dans les séquences disponibles. Les périodes glaciaires sont caractérisées par une forêt semi-décidue et de fortes teneurs en matière organique dans le lac. En revanche, les périodes interglaciaires sont marquées par une augmentation de la forêt sempervirente et une réduction de la sédimentation organique. Ces phases alternées de végétation et de productivité lacustre sont attribuées aux contrastes de température qui régulaient les apports d'humidité océanique à la latitude de Colonia. Après 1,4 million d'années avant le présent, les périodes glaciaires et interglaciaires changent avec une augmentation des forêts d'Araucaria et des baisses de température en phase avec la tendance générale au refroidissement observée dans les enregistrements marins de cette région.

PUBLICATIONS DE 2022

Bard E. et Heaton T.J., « Comment on “¹⁴C plateau tuning – A misleading approach or trendsetting tool for marine paleoclimate studies?” by Michael Sarnthein and Pieter M. Grootes », *Climate of the Past*, vol. 1, n° 8, 2022, <https://doi.org/10.5194/cp-2021-173-CC1>.

Djamali M., Capano M., Askari A., Faucherre N., Guibal F., Northedge A., Rashidian E., Tuna T. et Bard E., « An absolute radiocarbon chronology for the World Heritage site of Sarvestan (SW Iran); a late Sasanian heritage in early Islamic era », *Archaeometry*, vol. 64, 2022, p. 545-559, <https://doi.org/10.1111/arcm.12716>.

Harper B.B., Droxler A.W., Webster J.M., Montagna P., Yokoyama Y., Humblet M., Jorry S.J., Beaufort L., Tachikawa K., Bard E. et Pons-Branchu E., « Shelf-edge deglacial reef establishment and subsequent partial demise: Response to distinct pulses of sea-level rise associated with environmental changes », in G. Camoin, N. Hallmann et E. Samakassou (dir.), *Coral Reefs and Sea-Level Change: Quaternary Records and Modelling*, Gent, International Association of Sedimentologists, coll. « Special Publication », vol. 49, 2022, p. 141-171, HAL : hal-04016217.

Heaton T.J., Bard E., Bronk Ramsey C., Butzin M., Hatté C., Hughen K.A., Köhler P. et Reimer P.J., « A Response to community questions on the Marine20 radiocarbon age calibration curve: Marine reservoir ages and the calibration of ¹⁴C samples from the oceans », *Radiocarbon*, vol. 65, n° 1, 2022, p. 247-273, <https://doi.org/10.1017/RDC.2022.66>.

Lugli F., Nava A., Sorrentino R., Vazzana A., Bortolini E., Oxilia G., Silvestrini S., Nannini N., Bondioli L., Fewlass H., Talamo S., Bard E., Mancini L., Müller W., Romandini M. et Benazzi S., « Tracing the mobility of a Late Epigravettian (~13 ka) male infant from Grotte di Pradis (Northeastern Italian Prealps) at high-temporal resolution », *Scientific Reports*, vol. 12, 2022, art. 8104, p. 1-13, <https://doi.org/10.1038/s41598-022-12193-6>.

Rodríguez-Zorro P.A., Ledru M.P., Favier C., Bard E., Bicudo D.C., Garcia M., Marquardt G., Rostek F., Sawakuchi A.O., Simon Q. et Tachikawa K., « Alternate Atlantic forest and climate phases during the early Pleistocene 41 kyr cycles in southeastern Brazil », *Quaternary Science Reviews*, vol. 286, 2022, art. 107560, p. 1-15, <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2022.107560>.

Schimmelpfennig I., Schaefer J.M., Lamp J., Godard V., Schwartz R., Bard E., Tuna T., Akçar N., Schlüchter C., Zimmerman S. et ASTER Team, « Glacier response to Holocene warmth inferred from in situ ^{10}Be and ^{14}C bedrock analyses in Steingletscher's forefield (central Swiss Alps) », *Climate of the Past*, vol. 18, 2022, p. 23-44, <https://doi.org/10.5194/cp-18-23-2022>.

Skinner L.C. et Bard E., « Radiocarbon as a dating tool and tracer in palaeoceanography », *Reviews of Geophysics*, vol. 60, n° 1, 2022, art. e2020RG000720, p. 1-64, <https://doi.org/10.1029/2020RG000720>.

Van der Meeren T., Verschuren D., Sylvestre F., Nassour Y.A., Naudts E.L., Aguilar Ortiz L.E., Deschamps P., Tachikawa K., Bard E., Schuster M. et Abderamane M., « A predominantly tropical influence on late Holocene hydroclimate variation in the hyperarid central Sahara », *Science Advances*, vol. 8, n° 14, 2022, art. eabk1261, p. 1-10, <https://doi.org/10.1126/sciadv.abk1261>.