

ANNUAIRE du **COLLÈGE DE FRANCE** 2019 - 2020

Résumé des cours et travaux

120^e
année



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

Mots-clés : climat, océan, optimum holocène, Période interglaciaire, forçage orbital, gaz à effet de serre, déforestation, Néolithique

COURS – CLIMATS EXTRÊMES ET ANALOGUES ACTUELS : L'OPTIMUM HOLOCÈNE

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 des derniers millénaires peuvent servir à tester de multiples hypothèses avec une fiabilité des enregistrements généralement suffisante. Pour ces périodes reculées, les connexions entre les populations humaines étaient relativement limitées en comparaison avec notre société mondialisée. Il est donc *a priori* plus facile d'identifier l'impact des changements climatiques régionaux sur les sociétés anciennes. Ces leçons de l'histoire et de la préhistoire peuvent aussi nous éclairer dans nos choix et réactions face au changement climatique actuel et à ses expressions régionales souvent amplifiées par rapport à la tendance à l'échelle mondiale.

L'Holocène correspond à l'époque géologique qui a suivi la dernière période glaciaire caractérisée par des changements majeurs du climat terrestre, une température moyenne environ 5 °C plus basse que l'actuelle, d'énormes calottes glaciaires continentales centrées sur le Canada et la Scandinavie, ainsi qu'une extension de la banquise plus importantes aux deux pôles. La grande spécificité de cette période postglaciaire est d'avoir permis l'essor de sociétés humaines complexes fondées sur l'agriculture et l'élevage.

La détermination du début de l'Holocène a été l'objet de nombreux travaux au cours du dernier siècle. Les premières déterminations fondées sur des méthodes

différentes montraient des désaccords flagrants : 80000 ans d'après les premiers calculs fondés sur la théorie astronomique des paléoclimats, de 30000 à 10000 ans en étudiant les taux d'érosion de roches situées sous les chutes d'eau du Niagara et de Saint Anthony (Mississippi), jusqu'à moins de 9000 ans en comptant les couches annuelles (varves) de sédiments déposés lors du retrait de la calotte de glace scandinave. Des progrès significatifs ont été réalisés depuis ces premières estimations, mais la durée de l'Holocène dépend en fait de sa définition : certains auteurs arguent en effet de l'aspect diachronique du début de l'Holocène, tandis que d'autres choisissent des définitions strictes mais arbitraires à partir d'un stratotype (sédiments périglaciaires de Suède, calotte de glace du Groenland) ou d'une chronozone définie par le radiocarbone (10000 ans ^{14}C).

Les carottes de glace du Groenland permettent de définir de façon précise une limite séparant la fin de la glaciation (événement tardiglaciaire du Dryas récent) et le début de la période chaude postglaciaire (préboréal). Cette définition climatique régionale implique que l'Holocène aurait débuté environ 11 550-11 650 ans avant le présent¹ défini par convention à l'année 1950. Cette durée glaciologique est équivalente à 10 000 années du radiocarbone, après que cet âge soit corrigé du biais systématique de cette méthode radiochronologique. En effet, un âge de 10000 ans ^{14}C correspond à un âge calendaire de 11500 ans BP d'après les courbes de calibration publiées depuis 1990, confirmées cette année dans le cadre de la calibration IntCal20 (voir plus bas le volet sur la recherche pour 2020).

Les glaces du Groenland fournissent les séries paléoclimatiques les plus détaillées concernant la transition Pléistocène-Holocène. De nombreuses carottes forées du sud au nord de la calotte du Groenland ont été analysées pour la composition isotopique de l'oxygène de la glace qui montre des variations très cohérentes entre les différents sites. À l'échelle mondiale, le rapport $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ des précipitations varie de façon quasi linéaire des tropiques jusqu'aux pôles avec une pente d'environ 1,5 °C par ‰ de déviation de l'indice $\delta^{18}\text{O}$. Cette calibration empirique fondée sur la distribution géographique actuelle du $\delta^{18}\text{O}$ des précipitations a permis d'illustrer la stabilité du climat de l'Holocène ($\pm 1,5$ °C) au Groenland, en contraste marqué avec la variabilité du climat glaciaire caractérisé par des interstades chauds et des stades froids (variations d'une dizaine de degrés Celsius).

La mesure directe de la température dans les trous de forage du Groenland montre une évolution en fonction de la profondeur différente du profil à l'équilibre thermique avec le climat actuel. Il est donc possible de reconstituer, par inversion mathématique, l'évolution de la température locale au cours de la transition postglaciaire. Cette méthode a conduit à une révision majeure de l'amplitude des variations glaciaires et à la mise en évidence d'une période plus chaude d'environ 2 °C au début de l'Holocène.

En complément de ces enregistrements au Groenland, des sédiments lacustres et marins ont été étudiés à l'échelle mondiale. Des paléothermomètres géochimiques et micropaléontologiques ont été appliqués à ces archives permettant d'établir une courbe globale des fluctuations de température pendant l'Holocène. Les variations moyennes sont assez faibles ($\pm 0,5$ °C), mais elles indiquent une anomalie positive prolongée de 10000 à 5000 ans BP, *i.e.* l'optimum holocène, suivie d'une dégradation qui culmine avec la période du Petit Âge glaciaire (voir cours 2018-2019).

1. BP = *before present*.

La base de données des séries holocènes permet de compiler les enregistrements par bandes de latitude. L'optimum holocène est particulièrement marqué aux hautes latitudes de l'hémisphère nord, alors que les températures intertropicales présentent une tendance faible et opposée. Il ne semble pas y avoir d'amplification thermique sur les continents par rapport aux océans, mais cette observation n'est peut-être pas robuste, compte tenu du faible nombre des enregistrements continentaux. En contrepoint de ces estimations moyennes, la complexité des variations climatiques locales et la difficulté de leur détection par paléothermométrie ont été illustrées à partir de l'exemple des séries géochimiques et palynologiques du lac de Saint-Front en Auvergne.

Il est utile de replacer l'interglaciaire de l'Holocène parmi les autres périodes interglaciaires du dernier million d'années. Ces phases chaudes et relativement brèves (durée moyenne $\approx 10\,000$ ans), séparent les grandes périodes glaciaires du Pléistocène dont les rythmes sont liés aux variations de l'orbite terrestre, bien étudiées dans le cadre de la théorie astronomique des paléoclimats. Des séries de paléotempérature à haute résolution ont été enregistrées dans les sédiments marins (notamment ceux de la marge Ibérique en Atlantique Nord) et les glaces polaires, essentiellement en Antarctique car les forages du Groenland remontent à peine jusqu'à la dernière période interglaciaire vers 125000 ans BP (Éémien).

Les carottes de glace de l'Antarctique permettent en outre de replacer les réchauffements interglaciaires en fonction de l'évolution des teneurs atmosphériques en CO_2 et CH_4 . Les maxima de ces gaz à effet de serre sont partiellement responsables des réchauffements interglaciaires, constituant des rétroactions positives qui ont amplifié le forçage primaire des fluctuations de l'insolation d'origine orbitale. Les profils moyens, excluant l'Holocène, de la température, du CO_2 et du CH_4 montrent des tendances décroissantes sur la durée moyenne des interglaciaires ($\approx 10\,000$ ans). Ces tendances moyennes sont en contraste flagrant avec les enregistrements pour l'Holocène qui indiquent une stabilité des températures en Antarctique et des profils en V pour le CO_2 et le CH_4 . En effet, la teneur atmosphérique en CO_2 de l'Holocène est décroissante, jusqu'à atteindre un minimum de 260 ppm vers 6000 ans BP, suivi d'une croissance régulière d'environ 20 ppm jusqu'au temps présent, avant la révolution industrielle. La singularité du profil de CH_4 est encore plus marquée avec un minimum des teneurs holocènes vers 5000-4000 ans BP.

Ces contrastes ont conduit à l'hypothèse d'une perturbation anthropique dès le milieu de l'Holocène (hypothèse de Bill Ruddiman). La comparaison entre les profils interglaciaires moyens et les profils holocènes impliquent des anomalies à la fin de l'Holocène d'environ 40 ppm pour le CO_2 et de 250 ppb pour le CH_4 , qui seraient liées à la déforestation, à l'agriculture et à l'élevage par les populations du Néolithique. Ces anomalies anthropiques et préhistoriques des gaz à effet de serre auraient contribué à maintenir des températures élevées en Antarctique durant tout l'Holocène, alors qu'elles auraient dû décroître sous l'influence des seuls forçages naturels. Cette hypothèse anthropique est encore l'objet d'incertitudes conduisant à d'intenses débats, notamment pour ce qui concerne la démographie et l'impact des activités des premiers défricheurs néolithiques, ainsi qu'au sujet de l'ampleur des variations de température pendant l'Holocène, qui à l'échelle mondiale présentent un maximum prolongé de 10000 à 5000 ans BP (*i.e.* optimum holocène).

Afin de tester l'hypothèse anthropique holocène, il est utile d'étudier plus finement les variations des teneurs en CO_2 atmosphérique. Pour identifier les sources de

carbones, on peut mesurer le rapport isotopique $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ directement sur le CO_2 des bulles d'air occluses dans les carottes de glace. Les fractionnements isotopiques liés à des effets cinétiques ou thermodynamiques, peuvent servir à distinguer les contributions des principaux réservoirs du cycle du carbone terrestre, comme l'atmosphère, les océans, les différents types de plantes terrestres et marines, les sols et les tourbières, ainsi que les carbonnes géologiques. Pour les derniers siècles, les variations temporelles de la teneur en CO_2 atmosphérique et du $\delta^{13}\text{C}$ sont utilisées conjointement à des modèles du cycle du carbone pour séparer les changements des flux de carbone vers l'océan et la biosphère continentale. Cette double déconvolution conduit à la détermination des stockages océanique et biosphérique d'environ 3-4 gigatonnes de carbone (GtC) par an, en réponse aux émissions anthropiques actuelles liés aux combustibles fossiles et à la déforestation. La même approche a été appliquée aux variations de CO_2 et $\delta^{13}\text{C}$ au cours de l'Holocène, ces dernières étant de très faible ampleur : augmentation de 0,3 ‰ de 11000 à 8000 ans BP, suivie d'une quasi-stabilité jusqu'à la période moderne.

Les observations seraient donc compatibles avec un stockage de carbone terrestre supplémentaire culminant entre 5000 et 6000 ans BP vers des valeurs de 200-300 GtC, accompagné d'un relargage de CO_2 océanique lié à l'évolution des carbonates marins au cours de l'Holocène. Les variations observées depuis 7000 ans BP pourraient donc s'expliquer par de faibles émissions de carbone essentiellement naturelles (notamment un puits terrestre < 50 GtC). Néanmoins, une interprétation alternative des mêmes séries a été proposée par les tenants de l'hypothèse anthropique en invoquant une source anthropique préhistorique beaucoup plus importante (> 300 GtC), partiellement compensée par un stockage naturel dans les tourbières dont l'extension s'est considérablement accrue au cours de l'Holocène. La différence entre ces flux anthropiques et le puits naturel des tourbières permettrait d'expliquer les 20 ppm d'augmentation de la $p\text{CO}_2$ atmosphérique observée au cours des 7 000 dernières années.

RECHERCHE

Le radiocarbone est la méthode de datation la plus utilisée pour la période des 50 000 dernières années. Elle est fondée sur la désintégration radioactive du ^{14}C produit originellement dans la haute atmosphère par interaction avec les particules du rayonnement cosmique. La teneur en ^{14}C d'un échantillon fossile est comparée à la teneur en ^{14}C de l'atmosphère, qui constitue la référence de départ, avant sa disparition régulière par désintégration radioactive avec une période de 5 700 ans. Les données brutes de la datation radiocarbone ne constituent pas un absolu, car la teneur atmosphérique en ^{14}C change au fil du temps. Cette teneur en ^{14}C dépend du taux de production par le rayonnement cosmique ainsi que des réarrangements du cycle biogéochimique du carbone. Pour calculer l'âge d'un objet ancien à partir de la mesure du ^{14}C qu'il contient, il faut connaître la teneur en ^{14}C de l'atmosphère contemporaine de l'époque d'apparition de cet objet. L'âge radiocarbone initial est donc corrigé (on dit calibré) en comparant la teneur en ^{14}C mesurée avec celles d'autres échantillons pour lesquels des âges justes et précis ont été obtenus par des méthodes indépendantes comme le comptage des cernes annuels des arbres ou la datation des carbonates par la méthode à l'uranium-thorium (U-Th). Depuis trente ans, les courbes de calibration du radiocarbone sont élaborées par le groupe de

travail international IntCal, qui vient de publier une importante mise à jour (IntCal20 ; Reimer *et al.*, 2020² ; Heaton *et al.*, 2020 ; Bard *et al.*, 2020).

Cet effort international inclut les résultats obtenus par le Cerege qui dispose du spectromètre AixMICADAS installé dans le cadre des projets Équipex Aster-Cerege et ANR CarboTRYDH. Une comparaison internationale sur des séries d'arbres subfossiles (Wacker *et al.*, 2020) montre la qualité de ces nouvelles datations réalisées au moyen de cet instrument (Capano *et al.*, 2020a et 2020b). Le Cerege fait partie du groupe des huit laboratoires les plus justes et les plus précis au monde, qui ont tous été mis à contribution pour l'établissement de cette nouvelle calibration.

La courbe IntCal20 permet de calculer le rythme de l'horloge radiocarbone avec une précision sans précédent Bard *et al.*, 2020). Pour l'essentiel des 50 000 dernières années, la pente de la courbe est inférieure à l'unité, ce qui signifie que l'horloge radiocarbone fonctionne au ralenti. Ceci vient encore confirmer des études publiées il y a plus de trente ans à partir de datations ¹⁴C et U-Th de coraux (Bard *et al.*, 1990, *Nature*) qui avaient permis d'établir certaines dates fondamentales du calendrier de la Terre comme celle du dernier maximum glaciaire à 21000 ans BP (au lieu de 18000 ans BP au ¹⁴C), ainsi que le début de la période de l'Holocène vers 11500 ans BP (au lieu de 10000 ans BP au ¹⁴C).

Le nouveau résultat majeur est que la pente de la courbe IntCal20 est caractérisée par un maximum prolongé entre 50000 à 40000 ans BP (Bard *et al.*, 2020). Au cours de ce maximum, l'horloge radiocarbone a tourné environ deux fois plus vite que l'écoulement réel du temps. Cette accélération considérable s'étale sur plusieurs millénaires. Cette dilatation du temps radiocarbone est liée à l'effondrement du champ géomagnétique pendant un événement géophysique centré vers 41000 ans BP (excursion magnétique de Laschamps). L'arrivée sur Terre des particules du rayonnement cosmique est en effet modulée par l'intensité de la dynamo terrestre comme l'indique la correspondance entre les enregistrements paléomagnétiques et les concentrations de béryllium 10 des glaces polaires (comme le ¹⁴C, l'isotope ¹⁰Be est un radionucléide formé par le rayonnement cosmique).

L'impact de la dilatation du temps radiocarbone entre 50000 et 40000 ans BP peut s'illustrer en considérant des sites préhistoriques occupés par les derniers Néandertaliens et les premiers hommes modernes d'Europe (Bard *et al.*, 2020). Le recouvrement chronologique entre les plus anciens vestiges d'*Homo sapiens* et les Néandertaliens les plus récents est de plus de six millénaires avec le radiocarbone. Après calibration, cette durée est réduite à moins de quatre millénaires en années calendaires. Pour la préhistoire et l'évolution humaine, l'impact de la dilatation temporelle du radiocarbone ira bien au-delà de l'étude de la coexistence des néandertaliens et des hommes modernes. Cette dilatation du temps devrait aussi affecter les discussions sur la colonisation de l'Eurasie et de l'Australie, ainsi que permettre d'améliorer l'étalonnage de l'horloge génétique humaine. Elle aura encore d'autres conséquences dans des domaines variés comme la paléoclimatologie et la géophysique, ainsi que pour tous les utilisateurs de la datation au radiocarbone pour cette période reculée.

2. Certaines références bibliographiques abrégées données dans cette partie « Recherche » figurent dans la liste mise à disposition par l'auteur sur le site internet du Collège de France. Les références complètes des autres, pour les années antérieures à 2020, sont données dans les résumés d'*Annuaire* des années précédentes.

La destruction d'échantillon nécessaire à la datation en spectrométrie de masse par accélérateur classique pourrait causer des dommages irréparables pour les restes osseux les plus précieux en préhistoire. Fort heureusement, la source d'ions à CO₂ gazeux d'AixMICADAS permet de s'affranchir de cette contrainte grâce à la très petite taille des échantillons (Bard *et al.*, 2015). Ceux-ci représentent de 5 à 50 microgrammes de carbone et peuvent ne contenir que quelques zeptomoles de ¹⁴C (Tuna *et al.*, 2018).

Dans le cadre d'une collaboration initiée en 2016 avec l'institut Max-Planck d'anthropologie de l'évolution de Leipzig, l'unité du radiocarbone du Cerege a développé une nouvelle approche pour dater le collagène purifié à partir d'ossements préhistoriques. La première étape a consisté à établir une méthode optimale de synthèse du CO₂ à partir du collagène au moyen d'un analyseur élémentaire et d'un piège à zéolite couplé à la source d'ions d'AixMICADAS (Fewlass *et al.*, 2018 et 2019).

Dans un second temps, cette nouvelle méthode a été utilisée pour dater des échantillons de collagène purifié à partir de fragments de restes humains provenant de sites célèbres comme la triple sépulture humaine de Dolni Vestonice en République tchèque (Fewlass *et al.*, 2019b) et la grotte de Bacho Kiro en Bulgarie (Fewlass *et al.*, 2020), pour laquelle les mêmes ossements humains datés par ¹⁴C ont fait l'objet d'analyses génétiques et protéomiques (Hublin *et al.*, 2020).

En collaboration avec des chercheurs du Lampea d'Aix-en-Provence, nous avons initié un programme important de datations directes par le radiocarbone de vestiges paléontologiques d'espèces mammaliennes glaciaires provenant de sites archéologiques français. Ce programme est fondé sur l'unité du radiocarbone du Cerege qui permet de dater avec le nouveau spectromètre AixMICADAS des micro-échantillons de collagène et d'acides aminés purifiés à partir de restes osseux. Ce projet se présente comme le premier programme exclusivement consacré aux datations directes en France pour la grande faune pléistocène (mammouth laineux, rhinocéros laineux, cerf mégacéros, ours des cavernes, hyène des cavernes, lion des cavernes, marmotte). À partir des résultats attendus, une discussion sur les causes et rythmes de l'extinction de ces espèces pour les 50 000 dernières années sera engagée afin d'évaluer l'impact des changements climatiques et des paléomilieus naturels dans l'évolution humaine.

PUBLICATIONS (2020)

BARD E., HEATON T.J., TALAMO S., KROMER B., REIMER R.W. et REIMER P.J., « Extended dilation of the radiocarbon time scale between 40,000 and 48,000 y BP and the overlap between Neanderthals and Homo sapiens », *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 117, n° 35, 2020, p. 21005-21007, <https://doi.org/10.1073/pnas.2012307117>.

CAPANO M., MARTINELLI N., BAIONI M., TUNA T., BERNABEI M. et BARD E., « Is the dating of short tree-ring series still a challenge? New evidence from the pile dwelling of Lucone di Polpenazze (northern Italy) », *Journal of Archaeological Science*, vol. 121, 2020, p. 105190, <https://doi.org/10.1016/j.jas.2020.105190>.

CAPANO M., MIRAMONT C., SHINDO L., GUIBAL F., MARSCHAL C., KROMER B., TUNA T. et BARD E., « Onset of the Younger Dryas recorded with ¹⁴C at annual resolution in French subfossil trees », *Radiocarbon*, vol. 62, n° 4, 2020, p. 901-918, <https://doi.org/10.1017/RDC.2019.116>.

- FEWLESS H., TALAMO S., WACKER L., KROMER B., TUNA T., FAGAULT Y., BARD E., MCPHERRON S.P., ALDEIAS V., MARIA R., MARTISIUS N.L., PASKULIN L., REZEK Z., SINET-MATHIOT V., SIRAKOVA S., SMITH G.M., SPASOV R., WELKER F., SIRAKOV N., TSANOVA T. et HUBLIN J.-J., « A ^{14}C chronology for the Middle to Upper Palaeolithic transition at Bacho Kiro Cave, Bulgaria », *Nature Ecology & Evolution*, vol. 4, n° 6, 2020, p. 794-801, <https://doi.org/10.1038/s41559-020-1136-3>.
- HEATON T.J., KÖHLER P., BUTZIN M., BARD E., REIMER R.W., AUSTIN W.E.N., RAMSEY C.B., GROOTES P.M., HUGHEN K.A., KROMER B., REIMER P.J., ADKINS J., BURKE A., COOK M.S., OLSEN J. et SKINNER L.C., « Marine20—The marine radiocarbon age calibration curve (0-55,000 cal BP) », *Radiocarbon*, vol. 62, n° 4, 2020, p. 779-820, <https://doi.org/10.1017/RDC.2020.68>.
- HUBLIN J.-J., SIRAKOV N., ALDEIAS V., BAILEY S., BARD E., DELVIGNE V., ENDAROVA E., FAGAULT Y., FEWLESS H., HAJDINJAK M., KROMER B., KRUMOV I., MARREIROS J., MARTISIUS N.L., PASKULIN L., SINET-MATHIOT V., MEYER M., PÄÄBO S., POPOV V., REZEK Z., SIRAKOVA S., SKINNER M.M., SMITH G.M., SPASOV R., TALAMO S., TUNA T., WACKER L., WELKER F., WILCKE A., ZAHARIEV N., MCPHERRON S.P. et TSANOVA T., « Initial Upper Palaeolithic *Homo sapiens* from Bacho Kiro Cave, Bulgaria », *Nature*, vol. 581, n° 7808, 2020, p. 299-302, <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2259-z>.
- MARTIN C., MÉNOT G., THOUVENY N., PEYRON O., ANDRIEU-PONEL V., MONTADE V., DAVTIAN N., REILLE M. et BARD E., « Early Holocene Thermal Maximum recorded by branched tetraethers and pollen in Western Europe (Massif Central, France) », *Quaternary Science Reviews*, vol. 228, 2020, art. 106109, <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2019.106109>.
- MÉNOT G., PIVOT S., BOULOUBASSI I., DAVTIAN N., HENNEKAM R., BOSCH D., DUCASSOU E., BARD E., MIGEON S. et REVEL M., « Timing and stepwise transitions of the African Humid Period from geochemical proxies in the Nile deep-sea fan sediments », *Quaternary Science Reviews*, vol. 228, 2020, art. 106071, <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2019.106071>.
- MILESI V.P., DEBURE M., MARTY N.C.M., CAPANO M., JÉZÉQUEL D., STEEFEL C., ROUCHON V., ALBÉRIC P., BARD E., SARAZIN G., GUYOT F., VIRGONE A., GAUCHER É.C. et ADER M., « Early diagenesis of lacustrine carbonates in volcanic settings: The role of magmatic CO_2 (Lake Dziani Dzaha, Mayotte, Indian Ocean) », *ACS Earth and Space Chemistry*, vol. 4, n° 3, 2020, p. 363-378, <https://doi.org/10.1021/acsearthspacechem.9b00279>.
- REIMER P.J., AUSTIN W.E.N., BARD E., BAYLISS A., BLACKWELL P.G., RAMSEY C.B., BUTZIN M., CHENG H., EDWARDS R.L., FRIEDRICH M., GROOTES P.M., GUILDERSON T.P., HAJDAS I., HEATON T.J., HOGG A.G., HUGHEN K.A., KROMER B., MANNING S.W., MUSCHELER R., PALMER J.G., PEARSON C., PLICHT J. VAN DER, REIMER R.W., RICHARDS D.A., SCOTT E.M., SOUTHON J.R., TURNEY C.S.M., WACKER L., ADOLPHI F., BÜNTGEN U., CAPANO M., FAHRNI S.M., FOGTMANN-SCHULZ A., FRIEDRICH R., KÖHLER P., KUDSK S., MIYAKE F., OLSEN J., REINIG F., SAKAMOTO M., SOOKDEO A. et TALAMO S., « The IntCal20 Northern Hemisphere Radiocarbon Age Calibration Curve (0-55 cal kBP) », *Radiocarbon*, vol. 62, n° 4, 2020, p. 725-757, <https://doi.org/10.1017/RDC.2020.41>.
- RODRÍGUEZ-ZORRO P.A., LEDRU M.-P., BARD E., AQUINO-ALFONSO O., CAMEJO A., DANIAU A.-L., FAVIER C., GARCIA M., MINELI T.D., ROSTEK F., RICARDI-BRANCO F., SAWAKUCHI A.O., SIMON Q., TACHIKAWA K. et THOUVENY N., « Shut down of the South American summer monsoon during the penultimate glacial », *Scientific Reports*, vol. 10, n° 1, 2020, p. 1-11, <https://doi.org/10.1038/s41598-020-62888-x>.
- SIMON Q., LEDRU M.-P., SAWAKUCHI A.O., FAVIER C., MINELI T.D., GROHMANN C.H., GUEDES M., BARD E., THOUVENY N., GARCIA M., TACHIKAWA K. et RODRÍGUEZ-ZORRO P.A., « Chronostratigraphy of a 1.5 ± 0.1 Ma composite sedimentary record from Colônia basin (SE Brazil) : Bayesian modeling based on paleomagnetic, authigenic $^{10}\text{Be}/^{9}\text{Be}$, radiocarbon and luminescence dating », *Quaternary Geochronology*, vol. 58, 2020, art. 101081, <https://doi.org/10.1016/j.quageo.2020.101081>.

WACKER L., SCOTT E.M., BAYLISS A., BROWN D., BARD E., BOLLHALDER S., FRIEDRICH M., CAPANO M., CHERKINSKY A., CHIVALL D., CULLETON B.J., DEE M.W., FRIEDRICH R., HODGINS G.W.L., HOGG A., KENNETT D.J., KNOWLES T.D.J., KUITEMS M., LANGE T.E., MIYAKE F., NADEAU M.-J., NAKAMURA T., NAYSMITH J.P., OLSEN J., OMORI T., PETCHEY F., PHILIPPSSEN B., RAMSEY C.B., PRASAD G.V.R., SEILER M., SOUTHON J., STAFF R. et TUNA T., « Findings from an in-depth annual tree-ring radiocarbon intercomparison », *Radiocarbon*, vol. 62, n° 4, 2020, p. 873-882, <https://doi.org/10.1017/RDC.2020.49>.