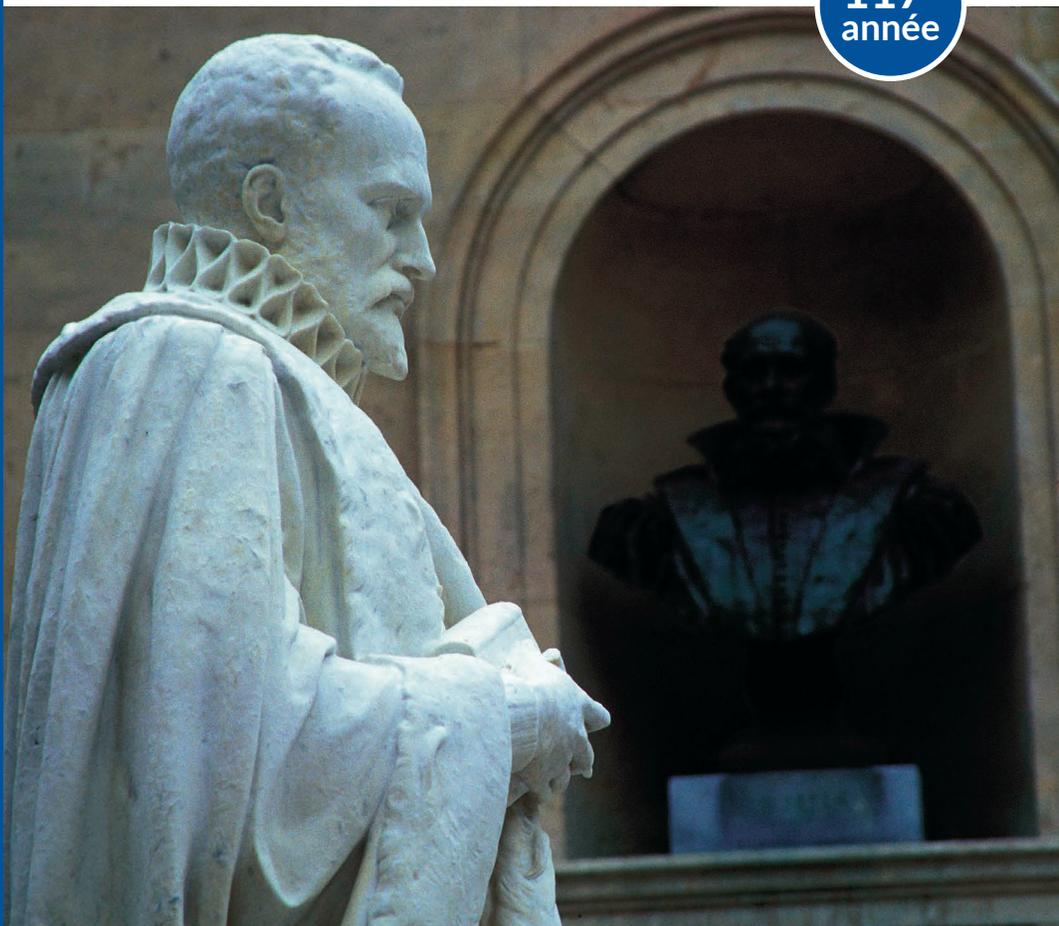


ANNUAIRE du **COLLÈGE DE FRANCE** 2016 - 2017

Résumé des cours et travaux

117^e
année



COLLÈGE
DE FRANCE
— 1530 —

ÉVOLUTION DU CLIMAT ET DE L'OCÉAN

Édouard BARD

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

Mots-clés : climat océan, évolution

ENSEIGNEMENT

Le cours n'a pas eu lieu.

RECHERCHE

Nous avons poursuivi les développements méthodologiques du nouveau laboratoire de ^{14}C afin de contribuer à nos projets scientifiques focalisés sur la détermination des sources en aérosols atmosphériques, ainsi que sur la datation de fossiles de différentes natures : cellulose du bois (Capano *et al.*, 2017), collagène des os (Fewlass *et al.*, 2017) et carbonates des organismes biologiques marins (Sepulcre *et al.*, 2017).

En parallèle, nous avons préparé et soumis un projet qui a été accepté dans le cadre de l'appel d'offres 2017 de l'ANR. Le projet CarboTRYDH (*High resolution study of radiocarbon in Tree-Ring sequences from the Younger Dryas event and early Holocene in the southern French Alps: A window into the past to document and understand rapid variations of the carbon cycle and of the solar activity*) a deux objectifs principaux :

- le premier consiste à mesurer à haute résolution la teneur en ^{14}C de bois subfossiles et à utiliser l'enregistrement du rapport atmosphérique $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ au cours de certains événements climatiques importants afin d'identifier les rôles respectifs des changements de production des isotopes cosmogéniques et des variations du cycle du carbone global ;
- le deuxième objectif est de contribuer à la calibration du géochronomètre radiocarbone en améliorant sa précision au cours de la dernière déglaciation.

Depuis les débuts de la spectrométrie de masse par accélérateur (SMA), la datation ^{14}C des squelettes carbonatés des foraminifères a été largement utilisée en

paléocéanographie pour établir des modèles d'âge des carottes de sédiments marins. Un autre objectif de ces mesures est l'estimation des temps de résidence du carbone dissous dans les masses d'eaux océaniques, en surface comme en profondeur.

La SMA classique nécessite une hydrolyse acide des échantillons de carbonate suivie d'une graphitisation des cibles solides. L'expérience montre qu'un traitement préalable par lixiviation ou « lessivage » acide (*leaching*) est essentiel pour éliminer les contaminations en carbonates secondaires, souvent plus jeunes que l'échantillon à dater. Ce prétraitement entraîne une perte d'environ un tiers de la masse de l'échantillon brut.

La datation des sédiments marins est donc limitée aux niveaux stratigraphiques à forte abondance de foraminifères fossiles afin de collecter suffisamment de carbone pour l'analyse (≈ 1 mg). Des progrès significatifs ont été réalisés pour réduire la taille des échantillons de graphite ($\approx 0,2$ mg), mais la méthode classique reste laborieuse et s'accompagne souvent de faibles courants ioniques ainsi que d'une plus forte contamination relative des échantillons.

La source d'ions à CO_2 gazeux est une alternative évidente pour éviter ces problèmes. Notre nouveau spectromètre AixMICADAS est équipé d'un système d'interface gaz couplé au système de traitement des carbonates. Ce système est conçu pour analyser des échantillons allant de $100 \mu\text{g}$ à $5 \mu\text{g}$ de C. Bien que la méthode soit prometteuse, elle n'a pas encore été largement appliquée à la datation des sédiments où les foraminifères sont rares.

Nous avons d'abord testé les performances de la source d'ions et de son système d'interface avec les différentes unités de production de CO_2 : l'analyseur élémentaire et l'unité automatisée d'hydrolyse des carbonates. Ces tests montrent que des échantillons compris entre 10 et $100 \mu\text{g}$ C peuvent produire des faisceaux d'ions ^{12}C - de l'ordre de 10 - $15 \mu\text{A}$ pendant des durées allant de 3 à 30 min en fonction de la masse de l'échantillon.

Le système d'hydrolyse automatisé nous a permis de développer une méthode de lixiviation séquentielle à l'acide chlorhydrique avec mesures du ^{14}C des fractions lessivées et de l'échantillon résiduel hydrolysé avec de l'acide phosphorique. Le principal avantage est que, pour un échantillon particulier, toutes les étapes de nettoyage et d'hydrolyse finale sont effectuées dans le même flacon ce qui limite les pertes et les contaminations.

Des matériaux carbonatés de référence et des échantillons de coraux ont été mesurés pour quantifier les effets « mémoire » et les niveaux des blancs, ainsi que pour déterminer justesse, précision et limite de la méthode.

Notre méthode d'hydrolyse en ligne a ensuite été appliquée à la datation de deux carottes de sédiments océaniques profonds. Des analyses répétées pour plusieurs espèces de foraminifères planctoniques et benthiques ont été réalisées, représentant un total de plus de 400 centaines de cibles de CO_2 gazeux.

Nos résultats montrent que la source à gaz conduit à un très faible bruit de fond. Des échantillons de foraminifères dépourvus de ^{14}C (« blancs » des niveaux stratigraphiques du MIS-5) donnent une valeur équivalente à un âge ^{14}C de plus de $50\,000$ ans BP en accord avec nos mesures de l'étalon AIEA-C1. Les analyses d'autres carbonates étalons d'âges variés (e.g. AIEA-C2) confirment la justesse et la précision des mesures réalisées avec la source d'ions à CO_2 .

En plus des échantillons gazeux, des cibles solides conventionnelles ont été préparées avec le CHS couplé au système de graphitisation automatisé AGE III lorsque les quantités de foraminifères étaient suffisantes. La comparaison entre les

mesures sur solide et gaz pour des foraminifères prélevés aux mêmes profondeurs montre une bonne concordance. Cependant, les mesures sur gaz sur différents échantillons de foraminifères aux mêmes profondeurs ont montré une dispersion parfois plus grande que celle attendue de la précision analytique. On sait que les sédiments marins sont constitués de matériaux divers d'origines biogéniques, détritiques et authigènes, qui peuvent avoir des âges différents et sont mélangés par des processus physiques et biologiques. La bioturbation pourrait en effet contribuer à la dispersion des âges observés, mais il reste à comprendre comment ce processus peut expliquer certains rajeunissements au sens du ^{14}C .

Nous avons présenté les résultats de ces développements analytiques à Ottawa en août 2017 dans le cadre de la 14th International Conference on Accelerator Mass Spectrometry (présentations par Thibaut Tuna *et al.*, Yoann Fagault *et al.* et Édouard Bard).

Pour les fossiles osseux les plus précieux de l'archéologie comme les restes humains, les ornements et outils en os, il est bien souvent impossible de procéder à la datation par SMA classique qui impliquerait la destruction d'environ 1-0,5 g de matériel. La source d'ions à CO_2 gazeux d'AixMICADAS offre une solution à ce problème pour dater des micro-quantités de collagène extrait d'ossements fossiles. Nous avons travaillé à ce développement en collaboration avec l'équipe de l'Institut Max-Planck de Leipzig dirigée par Jean-Jacques Hublin, dans le cadre de la thèse de Helen Fewlass.

Nous avons pu mesurer et comparer les âges ^{14}C sur cibles de graphite synthétisées à partir d'1 mg de C (\approx 2-3 mg de collagène osseux) avec les âges des mêmes échantillons convertis en CO_2 gazeux représentant environ 30 μg C ($<$ 0,1 mg de collagène osseux). Nos tests démontrent la performance du spectromètre AixMICADAS pour analyser des échantillons de 0,1 mg de collagène pour des âges ^{14}C allant jusqu'à 40 000 BP. La datation directe par SMA des fossiles osseux précieux est maintenant possible sur toute la gamme de la datation au radiocarbone (Fewlass *et al.*, 2017). Cette technique sera utilisée prochainement pour tenter de répondre à certaines questions chronologiques importantes en préhistoire humaine et environnementale.

PUBLICATIONS

BARD É., « De la nécessité d'une vision géologique du changement climatique », *Géologues*, vol. 192, 2017, p. 8-11.

CAPANO M., MIRAMONT C., GUIBAL F., KROMER B., TUNA T., FAGAULT Y. et BARD E., « Wood ^{14}C dating with AixMICADAS : Methods and application to tree-ring sequences from the younger dryas event in the southern French Alps », *Radiocarbon*, vol. 60, n° 1, 2017, p. 51-74, DOI : 10.1017/RDC.2017.83 [hal-01683046].

DUTTON A., RUBIN K., MCLEAN N., BOWRING J., BARD E., EDWARDS R.L., HENDERSON G.M., REID M.R., RICHARDS D.A., SIMS K.W.W., WALKER J.D. et YOKOYAMA Y., « Data reporting standards for publication of U-series data for geochronology and timescale assessment in the earth sciences », *Quaternary Geochronology*, vol. 39, 2017, p. 142-149, DOI : 10.1016/j.quageo.2017.03.001 [hal-01765590].

GUERRA L., PIOVANO E.L., CORDOBA F.E., TACHIKAWA K., ROSTEK F., GARCIA M., BARD E. et SYLVESTRE F., « Climate change evidences from the end of the Little Ice Age to the Current Warm Period registered by Melincué Lake (Northern Pampas, Argentina) », *Quaternary*

International, vol. 438, n° A, 2017, p. 160-174, DOI : 10.1016/j.quaint.2016.06.033 [hal-01691281].

JUNGCLAUS J.H., BARD E., BARONI M., BRACONNOT P., CAO J., CHINI L.P., EGOROVA T., EVANS M., GONZALEZ-ROUCO J.F., GOOSSE H., HURTT G.C., JOOS F., KAPLAN J.O., KHODRI M., GOLDEWIJK K.K., KRIVOVA N., LEGRANDE A.N., LORENZ S.J., LUTERBACHER J., MAN W.M., MAYCOCK A.C., MEINSHAUSEN M., MOBERG A., MUSCHELER R., NEHRBASS-AHLES C., OTTO-BLIESNER B.I., PHIPPS S.J., PONGRATZ J., ROZANOV E., SCHMIDT G.A., SCHMIDT H., SCHMUTZ W., SCHURER A., SHAPIRO A.I., SIGL M., SMERDON J.E., SOLANKI S.K., TIMMRECK C., TOOHEY M., USOSKIN I.G., WAGNER S., WU C.J., YEO K.L., ZANCHETTIN D., ZHANG Q. et ZORITA E., « The PMIP4 contribution to CMIP6-Part 3 : the last millennium, scientific objective, and experimental design for the PMIP4 past1000 simulations », *Geoscientific Model Development*, vol. 10, n° 11, 2017, p. 4005-4033, DOI : 10.5194/gmd-10-4005-2017 [hal-01757261].

SEPULCRE S., DURAND N. et BARD E., « Large 14C age offsets between the fine fraction and coexisting planktonic foraminifera in shallow Caribbean sediments », *Quaternary Geochronology*, vol. 38, 2017, p. 61-74, DOI : 10.1016/j.quageo.2016.12.002 [hal-01765458].