

# Des dates fiables

## pour les 50 000 dernières années

Édouard BARD, Guillemette MÉNOT-COMBES et Gilles DELAYGUE

Pour gagner en précision, la datation au carbone 14 est tributaire des variations du carbone 14 dans l'atmosphère. Les coraux et les sédiments fourniront bientôt une courbe de ces variations pour 50 000 ans.

**U**n chronomètre précis pour dater les dernières dizaines de milliers d'années est essentiel aux sciences de la Terre et à l'archéologie. Le chronomètre principal pour ces périodes récentes est le carbone 14, une méthode très utilisée pour dater des objets anciens jusqu'à environ 50 000 ans (toutes les dates de cet article ont pour référence l'année 1950 par convention internationale). Grâce à cette méthode radio-

chronologique (voir l'article de Carlo Laj dans ce numéro), l'archéologue date les sites d'occupation préhistorique et le géophysicien étudie la fréquence des éruptions volcaniques ou des tremblements de terre.

La paléoclimatologie illustre l'importance de la méthode au carbone 14 et plus particulièrement les besoins à la fois en précision et en justesse des datations. Les changements climatiques sont étudiés dans des archives paléoclimatiques variées et prélevées à différentes latitudes. L'exactitude des âges carbone 14, c'est-à-dire leur correspondance avec des âges vrais, non biaisés, devient cruciale lorsque les variations paléoclimatiques doivent être replacées par rapport à la chronologie absolue des fluctuations de l'insolation calculées par les astronomes.

Cependant, la datation au carbone 14 diffère des autres méthodes radiochronologiques classiques, telles les horloges uranium-thorium (voir l'encadré de la page 56), en ce qu'on ne peut pas mesurer conjointement la décroissance radioactive de l'isotope « père » (le carbone 14)

**1. LES VARVES** sont des dépôts annuels de sédiments qui se superposent. En les étudiant dès la fin du XIX<sup>e</sup> siècle, le Suédois Gerard de Geer a été le premier, en 1912, à proposer une durée fiable de la période postglaciaire, environ 8 700 ans.

et l'augmentation en isotope « fils », l'azote 14 produit lors de la désintégration bêta moins (l'émission d'un électron). L'azote 14 né de cette désintégration ne peut pas être distingué de l'azote « commun » qui compose 80 pour cent de l'atmosphère. Il est donc nécessaire de connaître parfaitement la quantité initiale de carbone 14, exprimée, en pratique, par rapport à la quantité de carbone 12 « commun », soit le rapport  $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$  de l'organisme au moment de sa mort, quand l'horloge se déclenche.

### Un effort international

Le carbone 14 des échantillons qui font l'objet de datation provient du gaz carbonique atmosphérique : les plantes photosynthétiques l'absorbent directement et le transmettent aux animaux via la chaîne alimentaire. La connaissance du rapport initial  $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$  d'un échantillon dépend donc de l'évolution au cours du temps de ce rapport dans l'atmosphère. Afin de déterminer des âges réels, aussi nommés « âges calendaires », il faut donc corriger ces fluctuations atmosphériques à l'aide d'une courbe de calibration. On établit cette dernière en comparant, dans des échantillons appropriés, les âges carbone 14 avec des âges vrais, obtenus indépendamment de la méthode au carbone 14. Cette courbe de calibra-





**2. LES RÉCIFS CORALLIENS** (en haut, le récif de Tahiti) enregistrent les variations climatiques. Les échantillons de coraux fossiles prélevés par forage, datés par le carbone 14 et par la méthode uranium-

thorium, permettent d'établir des courbes de calibration pour le carbone 14. Les quantités de béryllium 10 et de carbone 14 des échantillons sont mesurées par un accélérateur de particules (en bas).

tion est le sésame pour une datation précise, aussi les efforts pour élaborer la plus exacte possible sont-ils constants. La nouvelle courbe pour 2004 s'étend sur les derniers 26 000 ans. Cependant, de nouvelles archives, tels les coraux fossiles et les sédiments marins, sont aujourd'hui étudiées, et l'on pense atteindre d'ici deux ou trois ans une nouvelle courbe valable pour les 50 000 dernières années.

La nécessité d'une telle courbe de correction de la méthode au carbone 14 n'a pas été acceptée facilement par la communauté scientifique, et notamment par l'inventeur même de la

méthode, l'Américain Willard Libby, prix Nobel de chimie en 1960, qui s'est toujours battu contre l'idée d'un biais important. Toutefois, la démonstration d'une telle erreur systématique a été apportée dans les années 1960 par la comparaison d'âges carbone 14 avec ceux obtenus par d'autres techniques plus justes, mais applicables à seulement quelques archives spécifiques. Parmi ces méthodes, la dendrochronologie (voir l'article de David Houbrechts dans ce numéro) date des objets à l'année près par les cernes de croissance des arbres. D'autres archives, tels les glaces polaires et les sédiments lacustres et marins,

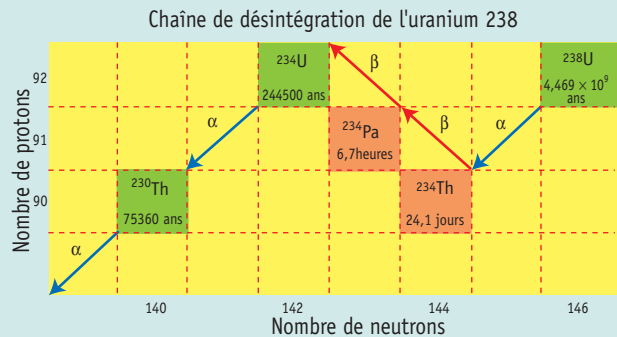
comportent également des couches annuelles, nommées varves. Dès 1912, soit bien avant l'utilisation du carbone 14, le Suédois Gerard de Geer (voir la figure 1) publia la première estimation fiable de la durée des temps écoulés depuis la dernière glaciation, environ 8 700 ans, en comptant les varves de sédiments déposés par l'eau de la calotte Scandinave à mesure que celle-ci fondait et se retirait progressivement vers le Nord.

Dans un premier temps, l'abondance d'arbres fossiles sur les derniers 11 500 ans a permis d'établir une courbe de calibration à haute résolution en datant les cernes d'arbres simultanément par

## L'HORLOGE URANIUM-THORIUM

La méthode radiochronologique uranium-thorium est fondée sur la décroissance radioactive d'isotopes intermédiaires, l'uranium 234 et thorium 230, de périodes respectives 244 500 et 75 360 ans, dans la chaîne de désintégration de l'uranium 238. Par exemple, dans les coraux, le chronomètre est remis à zéro lors de la formation du corail qui intègre dans son squelette des traces d'uranium (environ trois parties par million) à partir de l'eau de mer. En mesurant la quantité de thorium 230 produite par l'uranium 234, on détermine le temps écoulé depuis la formation du carbonate. Cette méthode, utilisée depuis les années 1950, était néanmoins limitée par les très faibles quantités d'uranium et de thorium, et par la faible précision de comptage en radioactivité alpha utilisée pour les déterminer : à 95 pour cent de confiance, les incertitudes sont de l'ordre de 2 000 ans pour des échantillons d'environ 10 000 ans et de 10 000 ans pour des prélèvements de 100 000 ans. Au cours des 15 dernières années, cette précision a été notablement améliorée grâce à l'analyse directe en spectrométrie de masse, permettant de mesurer de manière bien plus sensible et précise la composition de traces d'uranium et de thorium. Désormais, grâce à cette technique, on aborde de nouveaux problè-

mes scientifiques, telle la datation des échantillons très récents à quelques années près. Par ailleurs, ces améliorations ont marqué un renouveau de l'étude des coraux et des spéléothèmes, telles les stalactites. Aujourd'hui, à 95 pour cent de confiance, les incertitudes sont de l'ordre de 30 ans pour des échantillons d'environ 10 000 ans et de 1 000 ans pour des prélèvements de 100 000 ans.



**La datation uranium-thorium est fondée sur la mesure des rapports de deux isotopes, le thorium 230 et l'uranium 234. Ces deux isotopes sont des sous-produits de l'uranium 238.**

comptage et par carbone 14. Hélas, cette « dendrocalibration » ne peut être étendue plus avant en raison de la rareté des fossiles d'arbres datant de la dernière période glaciaire et au-delà. D'autres archives sont donc utilisées, parmi lesquelles des sédiments varvés et des coraux tropicaux vivant à faible profondeur (voir la figure 2), datés simultanément par la méthode uranium-thorium et par celle au carbone 14.

Reconstituer les variations atmosphériques du carbone 14, pour calibrer cette méthode de datation, représente un effort international qui se traduit par la parution régulière d'une courbe de calibration « officielle » marquant le consensus du moment. La dernière courbe, nommée INTCAL98, a été publiée en 1998 dans un numéro spécial de la revue américaine *Radiocarbon*. Cette courbe couvrait la période jusqu'à 24 000 ans calendaires. En raison de la nature des archives utilisées (des fossiles d'arbres, des sédiments varvés et des coraux), le nombre d'échantillons disponibles pour cette calibration décroît avec l'âge, augmentant l'incertitude. Des mises à jour de cette courbe de calibration sont proposées par le groupe de travail INTCAL et ratifiées par vote de la communauté scientifique lors de conférences internationales. La 18<sup>e</sup> de ces réunions a eu lieu en septembre 2003 à Wellington, en Nouvelle-Zélande. Les

quelque 300 géochimistes et géophysiciens réunis ont entériné la mise à jour de la courbe de calibration, INTCAL04, qui précise la courbe INTCAL98 grâce à un plus grand nombre de points, et la prolonge jusqu'à 26 000 ans.

Bien qu'aucun consensus n'ait été atteint pour des périodes plus reculées, différentes archives ont été proposées récemment pour prolonger la courbe de calibration entre 26 000 et 50 000 années calendaires.

### Horizon 50 000

Ainsi, à la réunion de Wellington, une enveloppe de calibration, c'est-à-dire une zone de calibration la plus probable, remontant à des âges plus anciens, a été présentée parallèlement à la courbe de calibration INTCAL04. Parmi ces enregistrements, citons les varves du lac Suigetsu, au Japon, les coraux de terrasses surélevées de Nouvelle-Guinée, les sédiments aragonitiques du lac fossile Lisan en Israël, les spéléothèmes (les concrétions calcaires) de grottes submergées aux Bahamas, ainsi que certains sédiments marins. Dans ces derniers, des événements climatiques datés par carbone 14 en utilisant des organismes marins, les foraminifères (voir la figure 3), sont corrélés avec leurs équivalents dans les carottes de glace prélevées au sommet du Groenland. Ces carottes sont datées

précisément par comptage des couches annuelles de glace (voir l'article de Jean Jouzel dans ce numéro). On utilise en particulier des excursions climatiques, c'est-à-dire de brusques refroidissements (des événements de Heinrich) ou réchauffements (événements de Dansgaard-Oeschger) de large amplitude, survenus lors de la dernière période glaciaire (entre - 80 000 et - 10 000 ans). Ces excursions n'excèdent pas quelques millénaires, mais les transitions durent généralement moins d'un siècle, constituant ainsi de bons repères chronologiques. Ces événements se traduisent, dans les glaces, par des variations rapides de la composition isotopique de l'oxygène, et dans les foraminifères, par des variations des types d'espèces et des constituants chimiques des sédiments marins.

Cependant, dater ces événements anciens reste délicat, car les quantités de carbone 14 restant dans ces vieux échantillons sont faibles, environ un pour cent de la teneur actuelle (c'est-à-dire un rapport  $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$  de l'ordre de  $10^{-14}$ !). De plus, les échantillons les plus anciens ont souvent subi une altération géochimique : par exemple, les coraux qui se sont développés avant que la mer ait atteint son niveau le plus bas, soit il y a plus de 21 000 ans calendaires, ont été émergés et altérés par le ruissellement et l'acidité des pluies. Ces phénomènes

modifient les datations par le carbone 14 et par l'horloge uranium-thorium, et empêchent leur utilisation pour la calibration du chronomètre carbone 14.

## Une carotte bien placée

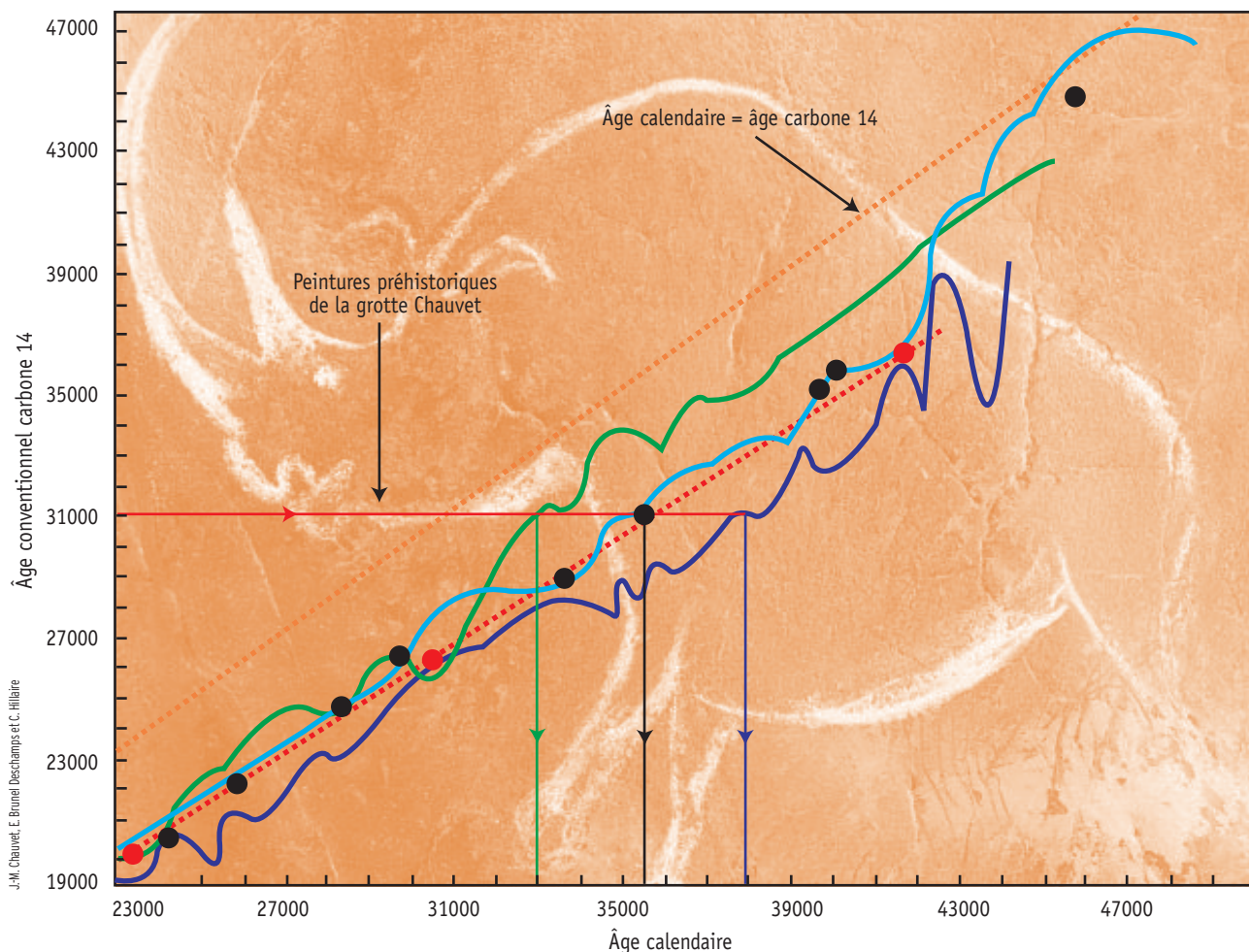
Encore très récemment, seules deux courbes de calibration étaient dotées d'une précision satisfaisante et d'une dispersion faible des données : celle issue des sédiments varvés du lac Suigetsu et celle des spéléothèmes des Bahamas. Cependant, ces courbes de calibration diffèrent notablement : l'une d'elles, au moins, est inexacte (voir la figure 4).

Des résultats très récents, fondés sur la stratigraphie de carottes sédimentai-

res marines, apportent un jour nouveau sur cette controverse. Lors de cette réunion de Wellington, l'équipe de Konrad Hughen, de l'Institut océanographique de Woods Hole, aux États-Unis, a présenté des résultats de carottes sédimentaires collectées dans le bassin tropical de Cariaco, sur la côte du Venezuela. Pendant cette même session, notre équipe a proposé une courbe de calibration obtenue à partir d'une carotte sédimentaire profonde collectée au large de la marge ibérique, c'est-à-dire au-delà du talus continental, par le navire océanographique français *Marion Dufresne* (voir la figure 5). Le site de prélèvement de cette carotte est idéalement localisé, car il est suffisamment proche du Groenland pour enregistrer les mêmes



**3. GLOBIGERINA BULLOÏDES** (vu ici au microscope électronique à balayage) est un foraminifère qui vit dans les eaux de surface. Cet organisme a été sélectionné pour les datations au carbone 14, en raison de son abondance relative par rapport aux autres espèces dans la carotte de sédiment profond prélevée sur la marge ibérique.



**4. LES ÂGES CARBONE 14** en fonction des âges calendaires au-delà de la période couverte par la courbe officielle INTCAL98. Les données proviennent des analyses des coraux de la Barbade, de Mururoa et de Nouvelle-Guinée (les points rouges); des varves du lac Suigetsu (la courbe verte); des spéléothèmes des Bahamas (la courbe en bleu foncé). De nouvelles données ont été obtenues par l'analyse de la carotte de la marge ibérique (les points noirs) et du bassin de Cariaco (la courbe en bleu clair). Pour ces deux derniers travaux, les âges calendaires sont issus de la corrélation avec une carotte de glace

du Groenland (GISP2). Ces courbes sont utilisées en archéologie pour convertir des âges carbone 14 en âges calendaires. Par exemple, l'âge des nombreuses peintures de la grotte Chauvet, en Ardèche, a été établi à partir d'une trentaine d'analyses sur des charbons : ce rhinocéros serait donc âgé d'environ 31 000 ans carbone 14 avant le présent (la ligne rouge horizontale). Selon la courbe de calibration choisie, l'âge vrai serait de 38 000 ans (la flèche bleu foncé) ou de 33 000 ans (la flèche verte). À partir des nouvelles données, cet âge serait de pratiquement 36 000 ans (la flèche noire).

événements climatiques : les variations de températures enregistrées dans ces sédiments marins correspondent bien à ceux des carottes de glace du Groenland. Néanmoins, le site est suffisamment éloigné pour échapper aux fortes variations du rapport  $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$  caractéristiques des eaux des mers nordiques. Entre 33 000 et 41 000 ans calendaires, période pour laquelle les courbes de calibration des sédiments du lac Suigetsu et aux spéléothèmes des Bahamas montrent un désaccord flagrant, de l'ordre de 5 000 années, les nouveaux résultats définissent une courbe de calibration qui passe entre ces deux courbes. Par ailleurs, l'accord entre les deux toutes nouvelles séries de données démontre la fiabilité de cette méthode stratigraphique pour calibrer les âges carbone 14.

L'exemple de la grotte Chauvet illustre les conséquences archéologiques de ces nouveaux résultats. Les peintures préhistoriques de cette grotte du Sud de la France (voir la figure 4) ont été datées, à plusieurs reprises, par la méthode au carbone 14, d'environ 31 000 ans carbone 14 (voir l'article d'Hélène Valladas dans ce numéro). Selon les résultats de la marge ibérique, confirmés par les données du bassin de Cariaco, l'âge calibré est d'environ 36 000 ans calendaires. Cette valeur se situe entre les âges corrigés à partir des enregistrements des Bahamas (38 000 ans calendaires) et du lac Suigetsu (33 000 ans calendaires), respectivement trop vieux et trop jeune de 2 000 et de 3 000 ans.

Cette nouvelle calibration carbone 14 a également des conséquences dans les domaines de la géochimie et de la géophysique. En effet, la différence entre les âges carbone 14 et les âges calendaires est due, nous l'avons vu, à des variations du rapport  $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$  dans l'atmosphère. La cause de ces variations est à chercher, soit dans la production du carbone 14 dans

l'atmosphère, soit dans les flux de carbone 14 entre les différents réservoirs de carbone, essentiellement l'atmosphère et l'océan.

Les données de la marge ibérique ainsi que celles des coraux indiquent que la teneur atmosphérique en carbone 14 a augmenté de 70 pour cent jusqu'à atteindre un maximum entre 39 000 et 41 000 ans calendaires. Une telle augmentation peut s'expliquer par la diminution régulière de l'intensité du champ magnétique terrestre, enregistrée par ailleurs dans les roches volcaniques et sédimentaires : une diminution de ce champ laisse pénétrer dans l'atmosphère davantage de rayons cosmiques responsables de la formation du carbone 14 (qui est un cosmnucléide de la même façon que le béryllium 10 et le chlore 36). Le maximum d'abondance du carbone 14, enregistré autour de 40 000 ans calendaires, pourrait correspondre donc à l'excursion magnétique de Laschamp, pendant laquelle le champ magnétique a brutalement chuté.

Ces variations sont également visibles dans d'autres enregistrements de la même carotte sédimentaire de la marge ibérique. En effet, d'après les travaux récents de nos collègues du CEREGE, Didier Bourlès, Julien Carcaillet et Nicolas Thouveny, l'excursion de Laschamp est bien mise en évidence entre 41 000 et 42 000 ans par la présence d'un minimum du champ magnétique en accord stratigraphique avec un pic de béryllium 10. Par ailleurs, en 1997, des maximum en béryllium 10 et en chlore 36 ont aussi été datés vers



**5. LE MARION DUFRESNE** (en bas) est un navire de recherches français équipé d'un carottier géant (en haut) utilisé pour forer de longues séquences sédimentaires continues et bien préservées. On détermine ensuite l'âge de ces sédiments afin d'établir une courbe de calibration pour la méthode de datation au carbone 14

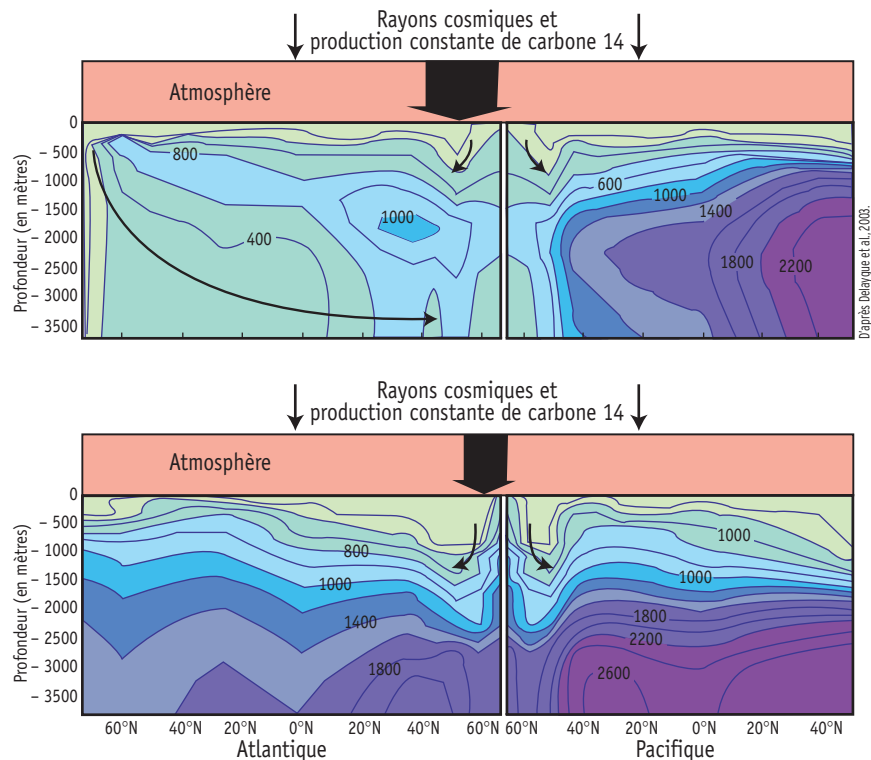


41 000 ans calendaires dans les carottes de glace provenant du sommet de la calotte groenlandaise.

## L'appel de l'océan

Toutefois, l'effet des variations de production ne se fait pas sentir de la même façon pour tous ces cosmonucléides. Le carbone 14 produit dans l'atmosphère est distribué dans les différents réservoirs contenant du carbone, essentiellement l'océan et la biosphère. Ces transferts entraînent un retard, de l'ordre du millier d'années, des variations de la concentration atmosphérique en carbone 14 par rapport à celle du taux de production de ce cosmonucléide. L'âge calendaire de ce maximum de production de carbone 14 (l'excursion de Laschamp) se situerait donc entre 40 000 et 42 000 ans calendaires, en accord avec l'âge du pic de béryllium 10. Par ailleurs, même quand la production de carbone 14 est constante, les échanges de carbone 14 entre les réservoirs varient et modifient alors la quantité de ce cosmonucléide dans l'atmosphère. On peut tenir compte de ces variations du carbone 14 grâce à un modèle mathématique décrivant le devenir du carbone 14 dans le cycle du carbone. En outre, grâce à un tel modèle, on peut tester différentes origines pour des variations connues du carbone 14 ou, à l'inverse, prédire une calibration de l'âge carbone 14 en faisant varier le champ magnétique terrestre ou les flux de carbone entre les réservoirs. Ainsi, on a découvert que des modifications de la circulation océanique influent aussi sur la quantité de carbone 14 atmosphérique, car l'océan est le plus important réservoir échangeant du carbone avec l'atmosphère. Depuis, des courbes de calibrations à haute résolution fondées sur des sédiments varvés ont montré l'existence de telles variations rapides du carbone 14 atmosphérique lors de la dernière déglaciation.

Dans l'océan (voir la figure 6), le carbone 14 atmosphérique diffuse lentement par rapport à sa période de décroissance radioactive, ainsi les eaux sont d'autant plus « vieilles », c'est-à-dire pauvres en carbone 14, qu'elles sont éloignées de la surface. La circulation des masses d'eau rajeunit donc l'océan



**6. L'ÂGE CARBONE 14** des eaux océaniques dépend de leur circulation. Le carbone 14, produit dans l'atmosphère par le rayonnement cosmique, est incorporé dans l'océan lentement par rapport à sa période de décroissance radioactive : les eaux profondes sont ainsi plus pauvres en carbone 14 que les eaux de surface et apparaissent donc plus vieilles. On représente l'âge carbone 14 des eaux (entre zéro, en vert, et - 2500 ans, en violet) en utilisant un modèle numérique de la circulation océanique. Par exemple, avec la circulation actuelle (en haut), la simulation révèle les âges carbone 14 des eaux, selon la latitude et la profondeur, dans les océans Atlantique (à gauche) et Pacifique (à droite). Cependant, à certaines époques, la circulation était ralentie : les modèles d'âge carbone 14 des eaux des deux océans (en bas) montrent que le transfert du carbone 14 vers les profondeurs de l'océan était alors réduit (les eaux profondes sont plus âgées). En conséquence, la teneur atmosphérique en carbone 14 était supérieure d'environ quatre pour cent à celle d'aujourd'hui. Une telle augmentation est responsable d'un rajeunissement d'environ 300 ans des âges carbone 14. Cette diminution du transfert dans l'océan est également responsable du vieillissement des eaux profondes.

en mélangeant l'eau de surface « jeune » avec des eaux plus profondes et plus vieilles. Or différents marqueurs géochimiques, telles la composition isotopique et chimique du carbonate des foraminifères, indiquent que cette circulation océanique a notablement ralenti à certaines périodes, réduisant ainsi les apports de carbone 14 dans l'océan profond. La quantité de carbone 14 a donc diminué dans les eaux profondes, mais augmenté dans l'atmosphère. Une telle augmentation du rapport  $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$  atmosphérique perturbe la méthode radiocarbone en rajeunissant les âges carbone 14 de cette époque.

L'étude des carottes sédimentaires n'en est qu'à ses débuts. En effet, plusieurs carottes de sédiments marins profonds ont été récemment collectées par le *Marion Dufresne* à proximité des premiers forages de la marge

ibérique et du bassin de Cariaco. Ces nouveaux enregistrements étofferont cette calibration préliminaire. De plus, la nouvelle carotte de glace, nommée *NorthGRIP*, récemment forée au Groenland, améliorera sans doute la précision de l'échelle de temps absolue sur laquelle est fondée cette méthode stratigraphique. Au final, une courbe de calibration complète remontant jusqu'à 50 000 années calendaires sera vraisemblablement présentée et ratifiée lors de la prochaine conférence radiocarbone, en 2006, à Oxford.

Édouard BARD est professeur au Collège de France et membre du groupe INTCAL. Il travaille avec Guillemette MÉNOT-COMBES et Gilles DELAYGUE au CEREGE, à Aix-en-Provence.

E. BARD, F. ROSTEK et G. MÉNOT-COMBES, A better radiocarbon clock, in *Science*, vol. 303, pp. 178-179, 2004.