

Un objet daté de 15 000 ans par le ^{14}C est en réalité vieux de 18 000 ans

LA DATATION AU CARBONE 14

EDOUARD BARD

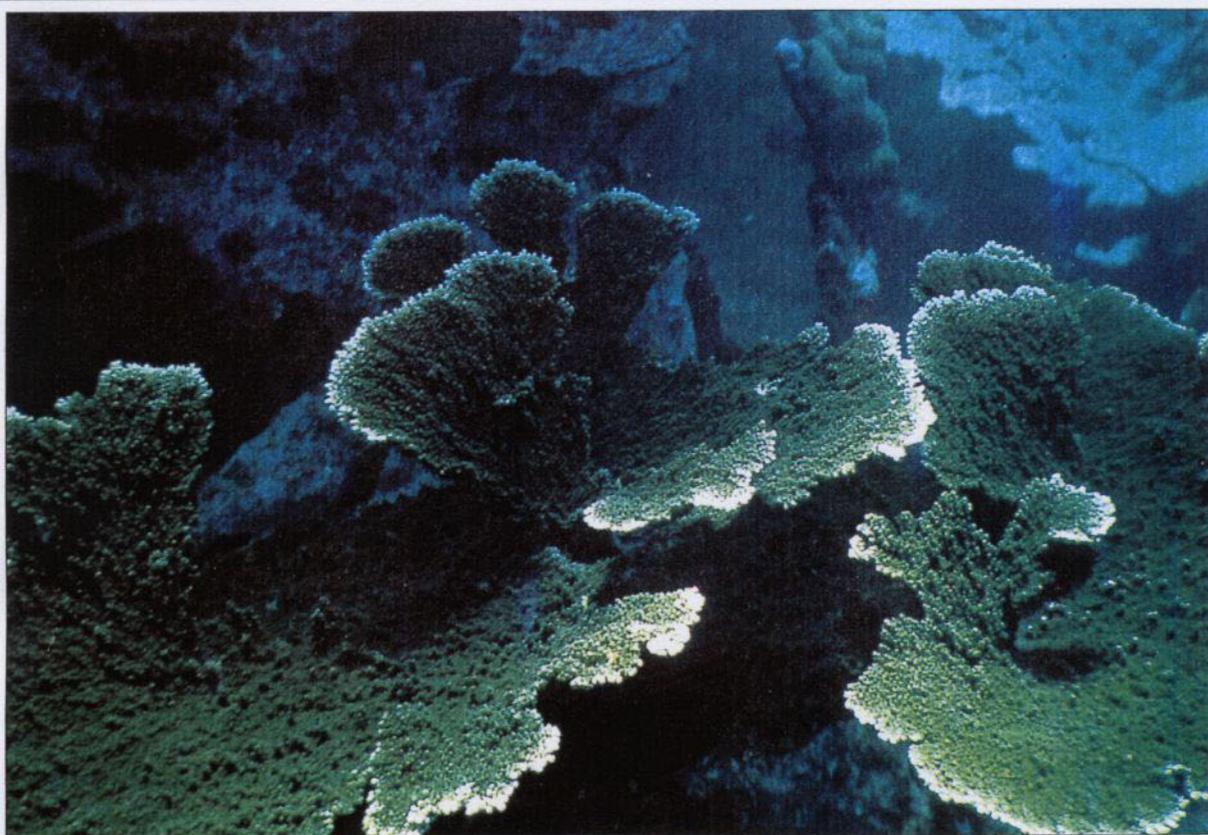
FAIT PEAU NEUVE

Au début des années 1990, l'analyse de coraux fossiles bouleverse les datations au carbone 14. Elle montre qu'au-delà de 10 000 ans cette méthode sous-estime largement l'âge des objets étudiés et que cette erreur s'accroît avec les milliers d'années. Les techniques de spectrométrie de masse les plus en pointe sont alors mises à contribution pour déterminer ce biais : aujourd'hui, ces études conduisent à un nouvel accord.

EDOUARD BARD est professeur à l'université d'Aix-Marseille et à l'Institut universitaire de France ; éditeur scientifique associé aux revues américaine *Radiocarbon* et européenne *Quaternary Geochronology (Quaternary Science Reviews)*.

Les colonies de corail du genre *Acropora* peuvent se conserver des dizaines de milliers d'années sous forme fossile : grâce à ces archives, il est possible de corriger les erreurs de la datation au ^{14}C pour des périodes aussi reculées.

(CLICHÉ SIMEONIDIS/BROS)



Aussi surprenant que cela puisse paraître, les âges déterminés par la méthode ^{14}C évoluent au cours du temps ! La célèbre technique de datation absolue* présente en effet un biais qu'il faut corriger. En 1986, date de la mise au point du premier logiciel fiable de conversion des âges ^{14}C en âges vrais dits calendaires, il a été décidé que cet outil, reconnu comme la norme officielle, serait réactualisé tous les cinq à dix ans, suivant l'importance des avancées scientifiques.

La version initiale ne couvrait en fait qu'une petite partie de la gamme des âges pouvant être datés par le radiocarbone, quelque 9 000 ans sur les 45 000 ans qu'embrasse la méthode. La toute dernière mise à jour qui date du début de l'année marque une étape remarquable, puisque c'est un pan d'environ 20 000 ans qui vient d'être ajouté⁽¹⁾.

Pour comprendre cette évolution, revenons sur l'histoire de cette technique. A la fin des années 1940, le professeur

Willard Libby et son équipe de l'université de Chicago pensent avoir trouvé une méthode de datation : fondée sur la décroissance radioactive du carbone 14, elle serait généralisable aux objets vieux de quelques siècles à quelques dizaines de millénaires. Pour tester l'approche, ils l'appliquent à des échantillons d'âges connus⁽²⁾. Les objets de la longue civilisation égyptienne, datés historiquement et bien échelonnés dans le temps, se prêtent particulièrement bien à l'exercice. La

*Les **DATATIONS ABSOLUES** sont obtenues par la mesure de radioactivité résiduelle de certains isotopes contenus à l'état de traces dans les échantillons étudiés.

... démonstration de Libby est éclatante et lui vaudra le prix Nobel de chimie en 1960. Dans son sillage, de nombreux laboratoires américains et européens ont alors développé des systèmes de comptage du radiocarbone. Et, grâce aux progrès technologiques, les âges radiocarbone se sont faits de plus en plus précis.

Décalage inattendu. Mais, revers de la médaille, une plus grande précision révèle aussi une erreur systématique entre les âges ^{14}C et les âges vrais ! Le physicien néerlandais Hessel De Vries est le premier à découvrir ce biais en comparant les âges d'arbres fossiles déterminés par ^{14}C à ceux obtenus par comptage des cernes annuels*. Publiés en 1958, ces travaux sont à l'origine d'une longue controverse⁽¹⁾. Willard Libby réfute ces résultats qui discréditent sa méthode : il fait peser le doute sur la précision des nouvelles techniques et sur la validité des âges

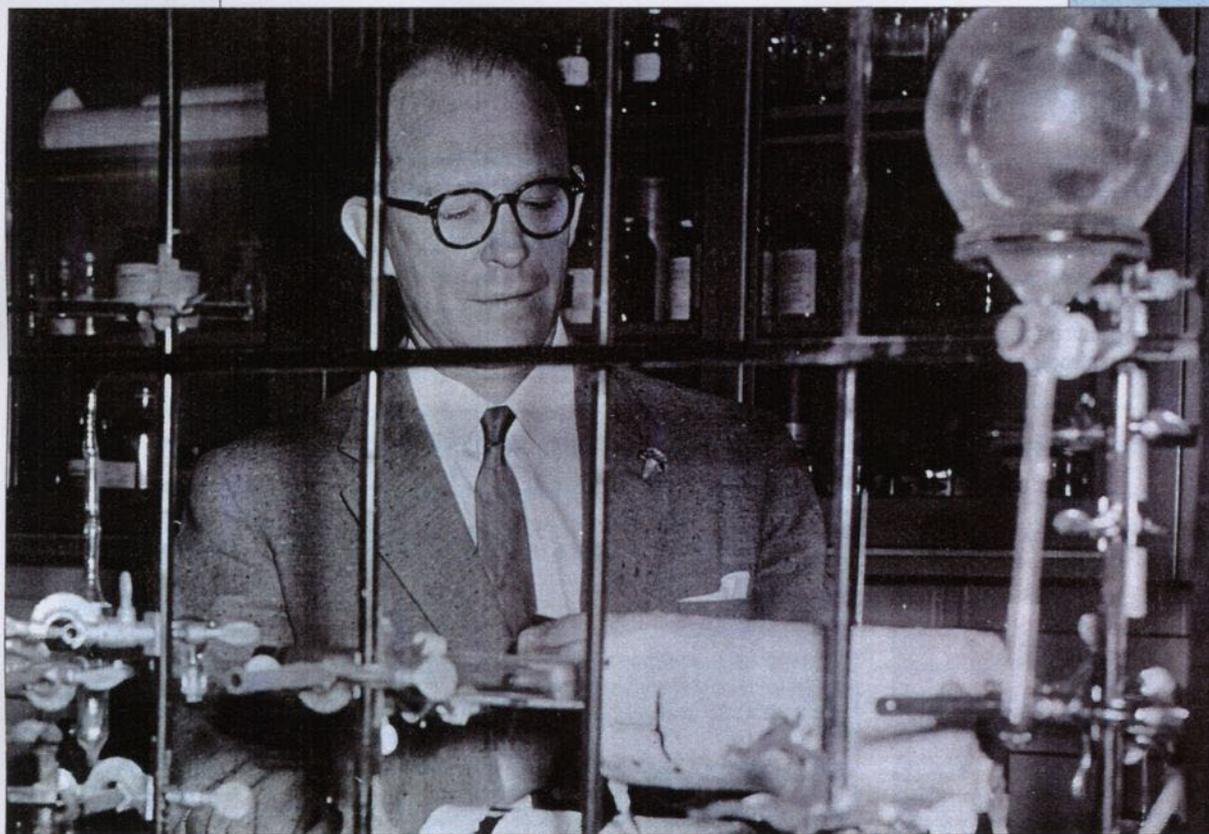
donné raison à Hessel De Vries. Ils ont également dévoilé la faille de la méthode. Elle est liée à une particularité du ^{14}C connue des premiers spécialistes mais dont ils avaient sous-estimé les conséquences. Contrairement aux autres radiochronomètres (uranium-thorium, potassium-argon, rubidium-strontium...) il n'est pas possible de mesurer conjointement la décroissance radioactive de l'isotope radioactif « père » (le ^{14}C) et l'augmentation de la teneur en isotope « fils » produit lors de cette désintégration, l'azote 14 (^{14}N) (voir l'encadré ci-contre). En effet, on ne peut pas distinguer ce dernier de l'azote commun contenu dans l'objet à dater et présent en grande quantité dans l'atmosphère. Pour obtenir un âge correct, il faut donc connaître *a priori* la teneur en ^{14}C de l'objet au moment de sa formation (plus exactement son rapport isotopique $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$, le carbone commun étant com-

LE DESTIN DU ^{14}C

L'isotope de masse 14 du carbone est un cosmonucléide c'est-à-dire un isotope formé par l'interaction des rayonnements cosmiques avec les éléments terrestres. Quand ils ne sont pas déviés par les champs magnétiques, les protons de grande énergie, qui forment l'essentiel du rayonnement primaire provoquent des réactions nucléaires violentes qui font éclater des noyaux des composants atmosphériques. Ils créent ainsi des rayonnements secondaires, parmi lesquels, de nombreux neutrons. Ce sont ces neutrons qui, entrant en collision avec des atomes d'azote ^{14}N , donnent naissance à l'isotope ^{14}C . Le taux maximal de formation du ^{14}C se produit à des altitudes de l'ordre de 15 à 20 km (basse stratosphère). Les atomes de ^{14}C sont alors rapidement oxydés pour former des molécules de CO_2 qui se dispersent ensuite dans l'atmosphère. Les atomes de ^{14}C sont radioactifs avec une période de désintégration de 5 730

ans et retournent à l'état d'atomes de ^{14}N stables. La radioactivité bêta naturelle du CO_2 atmosphérique est actuellement d'environ 14 désintégrations par minute et par gramme de carbone, c'est-à-dire que le rapport isotopique $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ est de l'ordre de 10^{-12} .

*En comptant les CERNES ANNUELS d'un tronc d'arbre fossile, on détermine son âge à l'année près. Cette technique s'appelle la DENDROCHRONOLOGIE.



C'est à la fin des années 1940 que le professeur Willard Libby et son équipe de l'Université de Chicago mettent au point la méthode de datation au carbone 14. Cette découverte lui vaudra le Prix Nobel de chimie en 1960.

(CLICHÉ KEYSTONE)

calendaires, il remet par exemple en cause la fiabilité des cernes d'arbres comme marqueurs annuels. Il faut préciser que le débat porte alors sur des âges pour lesquels l'erreur systématique avoisine les 100 à 200 ans, une erreur à peine plus grande que les incertitudes statistiques des techniques de l'époque...

Au cours des dernières décennies, la précision des analyses a augmenté, la période couverte par la dendrochronologie* s'est allongée et les résultats ont

posé à 99 % de carbone stable de masse atomique 12). La plupart des échantillons ont extrait leur carbone de l'atmosphère, soit directement comme les plantes par la photosynthèse, soit indirectement comme les animaux via la chaîne alimentaire. Or Willard Libby avait négligé que le rapport $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ dans l'atmosphère varie au cours du temps. Dater exactement par le radiocarbone demande donc de connaître l'évolution du rapport $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ dans l'atmosphère. Le moyen le plus exact

d'évaluer ces fluctuations est de recalculer un âge ^{14}C en le comparant à un âge calendaire d'un même objet, déterminé par une autre technique.

Correction officielle. Grâce aux cernes d'arbres, on a ainsi démontré que pour le début de la période Holocène, il y a quelque 9 000 ans, l'âge radiocarbone sous-estime l'âge calendaire d'environ mille ans. En 1986, la première synthèse majeure paraît et avec cette publication le premier logiciel fiable de calibration officiel

(1) M. Stuiver et al., *Radiocarbon*, 40 (3), 1041, 1998.

(2) J.R. Arnold et W.F. Libby, *Science*, 110, 678, 1949.

(3) H. De Vries, *Proc. Koninkl. Ned. Akad. Wetenschap.*, 94, 1958.



La publication des âges des coraux ayant jeté un pavé dans la mare des spécialistes du carbone 14, ceux-ci se sont réunis pour confronter méthodes et résultats. A l'époque, en 1990, force fut de constater l'énorme disparité des datations et chacun reparti réviser sa copie. CLICHÉ OTAN

(CALIB) voit le jour. Fondé sur les données de dendrochronologie, il ne permet cependant pas d'aller au-delà de 9 000 ans BP*. En effet de 70 000 ans à 9 000 BP, les troncs d'arbres fossiles étaient rares, les continents de latitudes tempérées étant en grande partie recouverts par des calottes glaciaires, des steppes ou des toundras.

La piste des coraux. Il faut attendre l'année 1990 pour que s'ouvre une nouvelle perspective. A cette date, avec des collègues américains et français de l'université de Columbia à New York, nous avons découvert que l'on pouvait étendre la calibration jusqu'à 30 000 ans BP en datant les coraux des récifs tropicaux⁽⁴⁾.

C'est en 1997 que l'on décide d'intégrer toutes les nouvelles données pour étendre les corrections des âges ¹⁴C jusqu'à 40 000 ans BP

C'est une toute nouvelle technique utilisant un autre radiochronomètre (uranium-thorium, U-Th) plus précis et plus juste que le radiocarbone qui nous a permis de déterminer des âges calendaires à comparer aux âges ¹⁴C pour des temps aussi reculés (voir l'encadré « Les nouveaux outils »). Publiées par la revue *Nature*, les datations des coraux de La Barbade ont été accueillies avec scepticisme : non seulement elles semblaient contredire d'autres données récentes, mais elles indiquaient surtout que plus on remonte dans le temps, plus le fossé se creuse entre les âges ¹⁴C et calendaires. De plus, la nouveauté de la technique inspirait de nombreuses réserves. Pour convaincre la communauté des spécialistes, il a fallu que plusieurs équipes américaines et européennes confirment ces

*BP signifie Before Present, le présent étant par convention internationale l'année 1950.

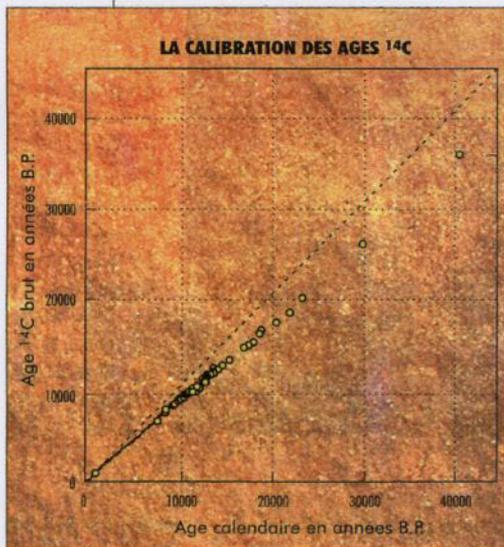


Figure 1. Si la méthode radiocarbone était parfaitement exacte, les âges calendaires mesurés sur les coraux (cercles) et les anneaux d'arbres (ligne) devraient se situer sur la droite en pointillés. La calibration consiste à corriger l'erreur d'environ 17% entre les âges ¹⁴C bruts et les âges calendaires.

LES NOUVEAUX OUTILS

Jusqu'à ces dernières années, pour déterminer les âges radiocarbone et uranium-thorium, on mesurait respectivement les radioactivités bêta et alpha des échantillons. Aujourd'hui, on compte directement les atomes radioactifs ! C'est la spectrométrie de masse par accélérateur tandem (SMA) qui permet de reconnaître les atomes de ¹⁴C accélérés à des énergies de l'ordre de la dizaine de MeV et de les compter individuellement dans un détecteur à ionisation. Il s'agit d'une véritable révolution, car on peut désormais analyser des échantillons de très petite taille : actuellement la datation est effectuée avec environ un milligramme de carbone soit mille fois moins qu'avec la méthode classique. Dans un échantillon de 1 mg de carbone moderne, on observe environ $2,4 \cdot 10^{-4}$ désintégrations de ¹⁴C naturel chaque seconde. Pour réaliser un comptage radioactif avec une erreur statistique de 1%, il aurait fallu mesurer 10 000 désintégrations c'est-à-dire réaliser une analyse de plus d'une année ! Or, détecter 10 000 atomes de ¹⁴C dans un échantillon de cette taille demande seulement une dizaine de minutes avec la SMA. Cette révolution technologique a ouvert

de nouveaux horizons en sciences de la Terre. Les datations de microfossiles planctoniques et les âges ¹⁴C mesurés à partir de certaines molécules spécifiques contenues dans les fossiles, certains acides aminés du collagène de l'os en particulier, en sont des exemples. Quant au radiochronomètre uranium-thorium, fondé sur la décroissance radioactive des isotopes ²³⁰Th et ²³⁴U de périodes 75 400 et 244 500 ans, il a aussi connu une amélioration spectaculaire depuis dix ans grâce à l'analyse directe en spectrométrie de masse par thermoionisation : les erreurs de l'ordre de 2 000 ans sur des âges de 10 000 ans BP et de 10 000 ans sur 100 000 ans BP se sont respectivement réduites à 50 et 1 000 ans. C'est grâce à cette technique que l'on a daté les coraux. Ces derniers intègrent en effet des traces d'uranium (environ 3 ppm) dans leur squelette à partir de l'eau de mer au moment de leur formation. Le chronomètre est alors remis à zéro. En mesurant la quantité de ²³⁰Th produite par désintégration des atomes de ²³⁴U, on peut alors déterminer le temps écoulé depuis la formation du carbonate. Ces résultats ont conduit à la révision de la calibration des âges ¹⁴C.

...
*Des sédiments lacustres et marins ainsi que certains glaciers peuvent se déposer suffisamment régulièrement pour que les couches saisonnières, les **LAMINES ANNUELLES**, soient préservées et puissent être comptées.

résultats, soit par la même technique U-Th appliquée à des coraux du Pacifique, soit par comptage de lamines annuelles* conservées dans des sédiments et dans les glaces du Groenland.

Nouvelle calibration. Ce pas franchi, la technique U-Th a été utilisée pour reconstituer les fluctuations du biais systématique du ^{14}C jusqu'à environ 40 000 ans BP. C'est à partir de ces nouveaux résultats combinés aux données de dendrochronologie que la dernière courbe de calibration a été construite (fig. 1). Dans l'état actuel de nos connaissances, la divergence entre âges ^{14}C bruts (c'est-à-dire sans correction du rapport $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ initial) et âges vrais atteint 2 000 ans vers 11 000 ans BP, 3 000 ans vers 16 000 ans BP et 5 000 ans vers 30 000 ans BP. Elle est donc en gros de 17 %, et le logiciel, CALIB4, diffusé depuis le début de l'année permet à tout utilisateur de réaliser la conversion précise. Néanmoins, les datations antérieures ne sont pas toujours remises à jour et la calibration n'est pas toujours faite : les confusions sont donc assez fréquentes. L'exemple le plus frappant concerne l'échelle classique des cultures préhistoriques de l'Europe occidentale donnée en âges bruts et rarement convertie en âges vrais (fig. 2). Parmi les grottes ornées les plus célèbres, les grottes de Niaux, d'Altamira, de Cosquer et de Chauvet ont été récemment datées grâce au ^{14}C en spectrométrie de masse par accélérateur^(5,6,7). Cette technique ne nécessitant que très



peu de carbone (voir l'encadré « Les nouveaux outils ») ce sont directement les charbons utilisés dans les peintures qui ont pu faire l'objet des mesures : les datations ^{14}C sont donc particulièrement fiables. Les âges ^{14}C bruts des peintures magdaléniennes des grottes de Niaux et d'Altamira sont respectivement de 12 900 et

Le rhinocéros de la Grotte Chauvet (Ardèche) est une belle illustration de l'importance de la calibration : daté d'environ 31 000 ans ^{14}C bruts, il est en fait vieux de 36 000 ans BP.

(CLICHÉ MINISTÈRE DE LA CULTURE ET DE LA COMMUNICATION. DIRECTION RÉGIONALE DES AFFAIRES CULTURELLES DE RHÔNE-ALPES. SCE RÉG DE L'ARCHÉOLOGIE)

- (4) E. Bard et al., *Nature*, 345, 405, 1990.
(5) H. Valladas et al., *Nature*, 357, 68, 1992.
(6) J. Clottes et al., *Bulletin de la Société préhistorique française*, 89 (8), 230, 1992.
(7) J. Clottes et al., *Comptes rendus à l'Académie des sciences*, 320, 1133, 1995.

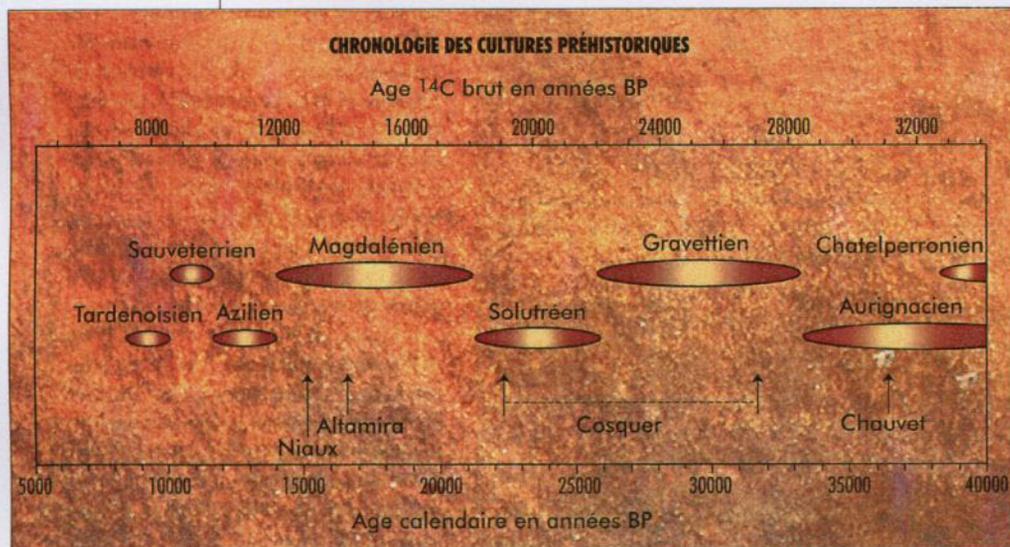


Figure 2. Souvent passé sous silence, le défaut de la datation au ^{14}C crée des confusions en particulier quand on évoque les cultures préhistoriques⁽¹²⁾. Cette chronologie simplifiée permet de rétablir les âges vrais de ces cultures.

14 000 ans BP ce qui équivaut à des âges calendaires de 15 100 et de 16 400 ans BP. Quant aux plus anciennes peintures préhistoriques découvertes à ce jour, les magnifiques rhinocéros laineux de la grotte Chauvet, elles sont datées de plus de 31 000 ans ^{14}C BP c'est-à-dire environ 36 000 années calendaires. Précisons qu'il

reste encore des zones d'ombre dans la calibration actuelle, surtout avant 25 000 ans BP, période pour laquelle les données se font rares.

Les fluctuations de la composition du carbone, source des erreurs de datation, sont essentiellement d'origine magnétique

Mais au-delà de la calibration elle-même, ces travaux nous ont éclairé sur les fluctuations du rapport $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ et sur les phénomènes physiques qui en sont responsables. Les derniers résultats que nous avons obtenus sur les coraux des îles de La Barbade, de Mururoa, de Tahiti et de Nouvelle-Guinée révèlent qu'entre 30 000 et 20 000 ans BP ce rapport dépassait le rapport actuel de 40 à 50 % et qu'il a diminué entre 18 000 et 3 000 ans BP (fig. 3). De plus, pour des âges inférieurs à 9 000 ans BP, des études détaillées de cernes d'arbres montrent qu'à cette longue tendance se superposent des oscillations de l'ordre de quelques siècles.

Activité solaire. Ces variations rapides sont liées à des fluctuations magnétiques du Soleil qui modulent l'arrivée sur Terre des protons du rayonnement cosmique. A l'origine des réactions nucléaires qui donnent naissance aux cosmonucléides comme le ^{14}C ou le béryllium 10 (^{10}Be), ces protons déterminent en effet le taux de production de ces isotopes. Nous l'avons

vérifié en comparant les variations du ^{14}C mesurées dans les cernes d'arbres vieux de mille ans à celles du ^{10}Be analysées dans la glace du pôle Sud (voir encadré ci-dessous)⁽⁸⁾. Au cours de cette période, non seulement les deux séries temporelles sont en phase mais elles montrent également qu'aux teneurs élevées correspondent des minima d'activité solaire connus par

ailleurs des astronomes grâce au comptage des taches solaires et aux observations directes d'aurores boréales. Etendue aux sept derniers mille ans, cette analyse a révélé que le Soleil passe approximativement le tiers de son temps en périodes de « tranquillité » équivalentes au Minimum d'activité de Maunder, épisode célèbre qui correspond à une quasi-absence des taches solaires à la fin du XVII^e siècle⁽⁹⁾.

Influence terrestre. Quant à la lente diminution depuis 30 000 ans, elle semble se produire essentiellement aux basses latitudes et relativement peu dans les zones polaires : c'est un indice en faveur du rôle probable du champ magnétique dipolaire de la Terre dont la composante horizontale est maximale au niveau de l'équateur. L'hypothèse est la suivante : plus le champ magnétique est fort, plus il fait écran au rayonnement cosmique, réduisant ainsi les interactions à l'origine du ^{14}C . Or, grâce notamment aux travaux de Jean-Pierre Valet à l'institut de Physique du Globe de Paris, on sait que l'intensité du champ géomagnétique a globalement doublé entre 30 000 et 10 000 ans BP⁽¹⁰⁾. Et quand on calcule les effets théoriques de cette augmentation en termes de production de cosmonucléides, on constate qu'elle peut effectivement expliquer l'essentiel de la longue diminution (voir encadré ci-contre)^(4,11). L'essentiel seulement, car entre 20 000 et 30 000 ans BP, il semblerait que les rapports $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ mesurés sur les coraux soient légèrement plus élevés que les estimations fondées sur le paléomagnétisme⁽¹¹⁾. Ces différences sont-elles dues à un mauvaise connaissance du cycle du carbone de l'époque ? On ne peut écarter cette éventualité, car l'intervalle de temps coïncide avec la dernière période glaciaire et les échanges de carbone entre les divers réservoirs étaient différents de ceux que l'on connaît aujourd'hui. Les variations de ce cycle pourraient ainsi expliquer les petites divergences de plusieurs siècles⁽¹¹⁾.

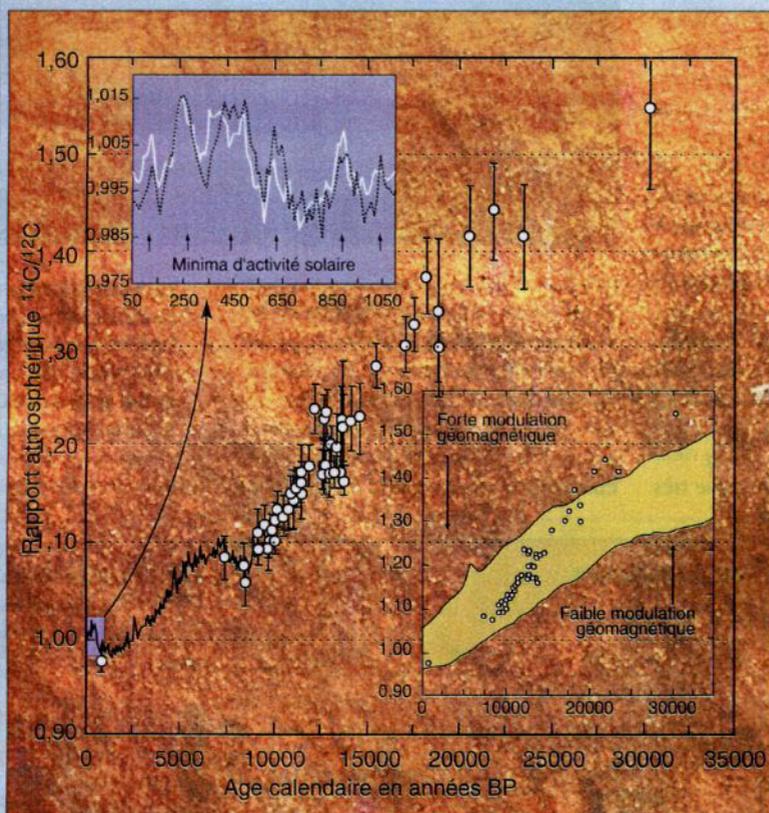
Comme on le voit, la calibration du radiocarbone nécessaire à la bonne utilisation de ce chronomètre est encore assez incomplète. Ce serait néanmoins une très mauvaise raison pour ne pas l'appliquer car seuls les âges calendaires permettent de déterminer les vraies durées des événements du passé. **E.B. ■**

Pour en savoir plus :

- E. Roth, B. Poty, *Méthodes de datation par les phénomènes nucléaires naturels*, Masson, 631 p., 1985.
- G. Faure, *Principles of Isotope Geology*, J. Wiley & Sons Pub., 589 p., 1986.
- R. Bradley, *Palaoclimatology*, Academic Press, 611 p., 1999.
- M. Williams et al., *Quaternary Environments*, Arnold Pub. & Oxford Univ. Press, 329 p., 1998.

L'HISTOIRE DU CARBONE 14 DANS L'ATMOSPHÈRE

L'évolution au cours du temps du rapport $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ atmosphérique, reconstruite à partir des mesures d'âges sur les coraux (cercles) et les anneaux d'arbres (ligne), est donnée ici par rapport à la valeur actuelle (1.5 sur l'axe des ordonnées indique un rapport plus élevé de 50%). Ce sont ces fluctuations lentes ou rapides qui sont à l'origine du décalage entre les âges ^{14}C bruts et les âges vrais.



Ces variations sont essentiellement liées à deux phénomènes physiques. Les plus rapides (quelques centaines d'années) sont dues aux variations de l'activité solaire. Dans l'encart en haut à gauche, un détail de la courbe (en noir) pris entre 50 à 1100 ans BP est comparé au rapport $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ calculé à partir des fluctuations des teneurs en ^{10}Be mesurées dans la glace du pôle Sud (en blanc). Il faut préciser que si ces deux cosmonucléides sont produits de la même manière, leur comportement dans l'atmosphère est différent. Pour les comparer, il est donc nécessaire de convertir les fluctuations du ^{10}Be en fluctuations équivalentes de ^{14}C . La superposition des deux courbes révèle une forte corrélation qui confirme l'origine solaire des oscillations. De plus à chaque pic de $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ correspond un minimum d'activité magnétique du Soleil. Il est ainsi possible d'identifier six périodes de minimum dont seules les trois dernières étaient connues des astrophysiciens. Quant à la tendance à long terme, elle s'explique par l'évolution de l'intensité du champ magnétique terrestre. Si l'intensité augmente, la protection magnétique à la surface de la Terre le fait aussi et les interactions cosmiques qui produisent le ^{14}C diminuent. Dans l'encart en bas à droite, l'intervalle (en vert) représente le $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ calculé à partir de données paléomagnétiques. Les mesures (cercles) suivent relativement bien cette tendance générale jusqu'à 20 000 BP.

(8) E. Bard et al., *Earth and Planetary Science Letters*, 150, 453, 1997.
 (9) J. Eddy, *Science*, 192, 1189, 1976.
 (10) Y. Guyodo et J.P. Valet, *Earth and Planetary Science Letters*, 143, 23, 1996.
 (11) E. Bard, *Geochimica Cosmochimica Acta* 62, 2025, 1998.
 H. de Lumley, « Les civilisations des derniers peuples chasseurs de l'Europe 34 000-8 000. », dans *Art et civilisations des chasseurs de la préhistoire 34 000-8 000 av. J.C.* éd. musée de l'Homme et le Muséum national d'histoire naturelle. Paris, 1984 ; P. Mellars, « The upper palaeolithic revolution », in *The Oxford Illustrated Prehistory of Europe*, ed. B. Cunliffe, Oxford Univ. Press, 42-78, 1994 ; F Djindjian. « Datations ^{14}C du paléolithique supérieur européen : bilan et perspectives. » Actes du 3^e Congrès international ^{14}C et archéologie, Lyon 1998, ed. J. Evin, sous presse.