

apparus entre les datations par le carbone 14 et les âges dendrochronologiques (fondés sur les cernes de croissance des arbres, voir l'encadré ci-dessous). L'idée que la proportion carbone 14/carbone 12 dans l'atmosphère était restée inchangée au cours du temps introduisait manifestement un biais systématique. En réalité, différents facteurs font varier la proportion de carbone 14. C'est pourquoi, depuis les années 1980, on corrige les résultats de la datation au radiocarbone par la dendrochronologie. Le principe est de déterminer la proportion de carbone 14 dans le carbone issu du matériau étudié, puis de trouver un échantillon de bois datable par dendrochronologie et ayant la même teneur en carbone 14.

Dans la pratique, on ne compare pas les contenus en carbone 14 eux-mêmes, mais on détermine un « âge radiocarbone non calibré » de l'échantillon à partir de la mesure de sa proportion de radiocarbone. Pour ce faire, on emploie par convention la valeur de la demi-vie du carbone 14 calculée par

Libby : 5568 ans (la demi-vie est la durée au bout de laquelle la moitié des noyaux radioactifs présents initialement se sont désintégrés). L'âge non calibré trouvé est ensuite transformé en une année calendaire grâce à une courbe intégrant toutes les corrections de la variation temporelle de la proportion de radiocarbone obtenues par dendrochronologie (voir la figure 2). L'avantage de cette façon de calibrer est que la valeur de la demi-vie du carbone 14, imprécise connue (elle est de 5700 ± 30 ans), n'y joue aucun rôle.

De nombreux biais

Nommée IntCal09, la courbe d'étalonnage utilisée depuis 2009 permet de calibrer des âges jusqu'à environ 50 000 ans. Elle intègre les données issues de la dendrochronologie, qui couvrent les 11 000 dernières années, puis celles provenant des registres à plus longue portée que représentent les concentrations en carbone 14 des coraux

et des carbonates contenus dans les sédiments marins.

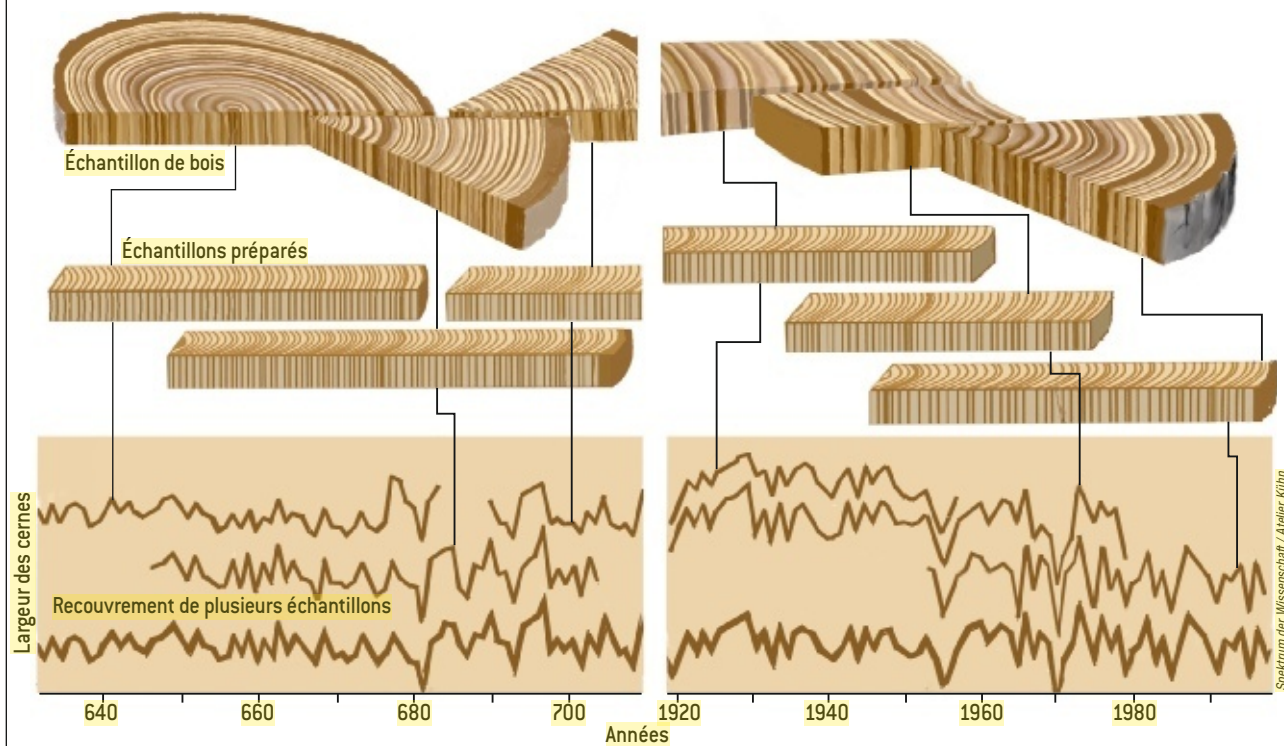
Le magnétisme terrestre n'est en effet pas le seul facteur qui agit sur la concentration atmosphérique de radiocarbone. Parce qu'ils sont de masses différentes, les trois isotopes du carbone ne sont pas ingérés de la même façon par tous les organismes vivants. Plus léger, le carbone 12 est davantage intégré aux plantes par la photosynthèse. C'est pourquoi les valeurs du rapport isotopique $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ varient dans la biosphère, d'où des différences d'âges de quelques centaines d'années entre échantillons de même âge réel...

Par chance, ce problème a une solution fiable. En effet, le carbone 13 est à peu près aussi désavantagé que le carbone 14 par la photosynthèse, de sorte que le rapport isotopique $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$, qu'aucune désintégration ne modifie (le carbone 13 est stable), est resté égal au cours des siècles. Au sein des échantillons issus de la biosphère, la comparaison des rapports

LA DENDROCHRONOLOGIE : L'HORLOGE DES CERNES DE CROISSANCE

Sous les latitudes tempérées, les arbres ne croissent que pendant la période végétative, qui dure du printemps à l'automne. De là viennent les cernes de croissance des arbres. Ils marquent chaque année, et rendent la détermination de l'âge des arbres possible par comptage des cernes depuis le plus ancien, c'est-à-dire le plus intérieur. L'épaisseur des cernes dépend des conditions locales. Ainsi, la plante crée plus de masse pendant les années humides et moins durant les années sèches, de sorte

qu'un motif particulier caractérise chaque série d'années. Ce sont ces motifs qu'exploitent les dendrochronologistes pour dater des événements que l'on peut associer à un échantillon de bois. En Europe, la dendrochronologie par les chênes et les hêtres remonte de 12 500 ans dans le temps, soit jusqu'à la fin de la dernière glaciation. Comme la dendrochronologie fixe la date d'un événement pouvant être associé à un échantillon de bois à une année près, c'est la plus précise des méthodes de datation.



isotopiques $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ et $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ élimine ainsi le biais photosynthétique.

À ce point, on pourrait croire avoir pris en compte tous les biais possibles. Il n'en est rien. Par exemple, le carbone 14 se révèle sous-représenté dans la couche superficielle des océans, par rapport à l'air. Ce phénomène est dû à la lenteur avec laquelle les eaux océaniques se mélangent à mesure que des courants ascendants amènent l'« eau ancienne » du fond en surface, ce qui a pour effet d'y diluer le carbone 14. L'âge radiocarbone des organismes se nourrissant de la mer dépasse pour cette raison de quelque 400 ans leur âge réel, ce qui est pris en compte dans la partie de la courbe d'étalonnage établie à partir d'échantillons marins.

Cet effet aquatique s'étend aux organismes terrestres. Ainsi, on constate qu'après calibration l'âge des échantillons provenant de l'hémisphère Sud, où les mers occupent une surface bien plus importante qu'au Nord, semble excéder l'âge réel de quelque 40 ans... Au Sud,

les échanges entre l'atmosphère et la surface océanique introduisent davantage de carbone 14 dans l'air.

Autre aspect : la courbe de calibration est entachée de petites fluctuations (voir les figures 2 et 3). Bien qu'elles ne soient pas encore comprises dans le détail, on pense que ces petites variations sont dues pour l'essentiel aux changements de l'activité solaire. Les méthodes de mesure d'aujourd'hui permettent en principe d'obtenir un âge précis à des dizaines d'années près, mais ces variations dégradent cette précision à quelques centaines d'années.

Statistiques de Bayes à la rescousse

Par ailleurs, les incertitudes statistiques limitent la précision des mesures physiques en répartissant les résultats sur un certain intervalle autour d'une valeur moyenne. En général, cette répartition suit une courbe en cloche que l'on nomme une gaussienne. Une datation de $X \pm 30$ ans signifie donc

que le sommet de cette courbe est en X tandis que ses points d'inflexion sont distants de 30 ans de chaque côté. Nommé déviation standard, l'intervalle allant d'un point d'inflexion à l'autre (± 30 ans) couvre 68,2 pour cent des résultats de mesure ; il en couvre 95,4 pour cent si on le double (± 60 ans). Ces pourcentages donnent en fait les probabilités que l'âge vrai se trouve à l'intérieur d'un intervalle dit « de confiance », dont la longueur est exprimée en multiples de la déviation standard. Si la relation entre les datations non calibrées et les âges vrais était linéaire, on obtiendrait après calibration une autre courbe de Gauss, mais les petites fluctuations (présomées) solaires compliquent la situation.

Illustrons cela par un exemple tiré de notre pratique. Nous avons daté certains pépins de raisins consommés lors de la construction du temple d'Hatshepsout (voir la figure 1). D'après les chronologies historiques, ce temple aurait été érigé vers 1470 avant notre ère. L'âge radiocarbone non calibré des pépins s'est révélé

LE PRINCIPE DE LA SPECTROMÉTRIE DE MASSE PAR ACCÉLÉRATEUR

L'âge radiocarbone se détermine à partir de la valeur du rapport $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$, que la valeur du rapport $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ contribue à corriger. On utilise pour mesurer ces rapports isotopiques la spectrométrie de masse. Toutefois, les spectromètres de masse usuels ne conviennent pas, car les ions de carbone 14 y sont noyés dans un flux d'ions d'azote 14, provenant de l'air, et d'autres ions de carbone moléculaire tels $^{13}\text{CH}^-$, $^{12}\text{CH}_2^-$,...

C'est pourquoi on emploie plutôt un spectromètre de masse par accélérateur. Après sa transformation chimique en graphite (1), l'échantillon y est pulvérisé par un faisceau de césium, qui en éjecte des ions négatifs. L'hydrogène étant partout, certains ions sont du carbone moléculaire, d'ailleurs susceptible de se former aussi plus loin. Le faisceau est ensuite pré-accélééré (2), puis défléchi par un premier aimant (3), qui permet de sélectionner tous les ions de masse 14 avant leur introduc-

tion dans un accélérateur électrostatique, où la tension électrique croît jusqu'à plusieurs millions de volts au centre, puis décroît jusqu'à zéro. La collision au centre de l'accélérateur des ions négatifs avec un dispositif nommé éplucheur contenant de l'argon gazeux sous faible pression (4) casse les ions $^{13}\text{CH}^-$, $^{12}\text{CH}_2^-$ et arrache aux atomes de carbone plusieurs électrons, de sorte qu'ils deviennent positifs (C^{2+} , C^{3+} , C^{4+} ,...). Tous les ions positifs ainsi produits sont alors accélérés dans la seconde partie du tandem par la tension électrique décroissante, puis triés par un deuxième aimant et par un aimant d'analyse final (5), qui permet de mesurer les flux de $^{12}\text{C}^{3+}$ et $^{13}\text{C}^{3+}$ et de compter le nombre de $^{14}\text{C}^{3+}$ par unité de temps (6).

Grâce aux spectromètres de masse par accélérateur, on parvient à mesurer des rapports isotopiques de l'ordre de 10^{-15} (10^{-9} pour les spectromètres usuels) à partir d'échantillons archéologiques minuscules.

