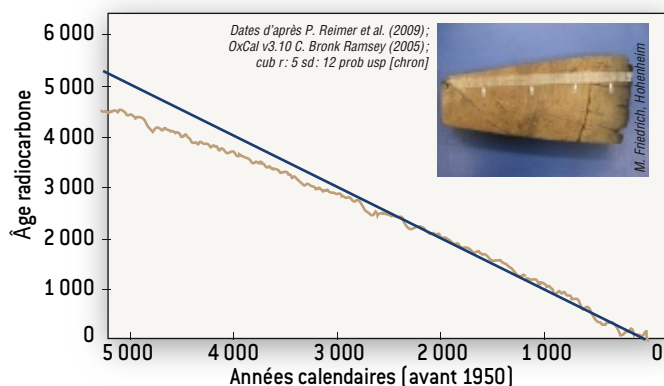
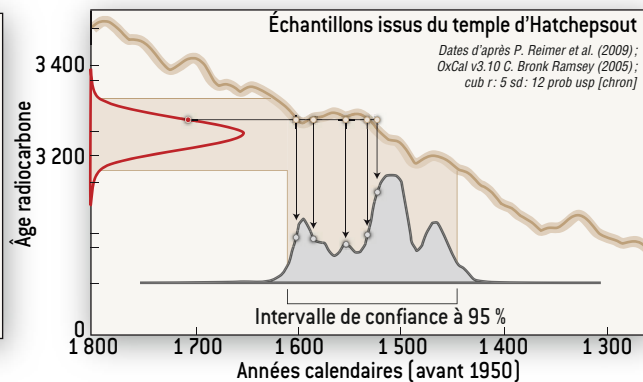




2. UNE PROPORTION CONSTANTE DE CARBONE 14 dans l'atmosphère implique un âge radiocarbone variant linéairement en fonction du temps réel (*droite bleue*). Cependant, les variations du champ magnétique terrestre modifient la production de carbone 14 dans l'atmosphère. Les physiciens se sont appuyés sur la datation par les cernes de croissance des arbres, qui permet par exemple de dater un objet en bois (*cartouche*), et d'autres méthodes pour élaborer la courbe de calibration « IntCal09 » (*en brun*), qui permet de corriger les âges calculés par la radiodation.



3. LES PETITES VARIATIONS DE LA COURBE DE CALIBRATION compliquent la datation. Les âges radiocarbone possibles d'un échantillon suivent une loi de probabilité décrite par une gaussienne (*en rouge*). Mais en tenant compte de la courbe de calibration et de ses irrégularités (*en marron*), on trouve que la loi de probabilité (*en gris*) que suivent les dates corrigées est plus étalée et comporte plusieurs sommets. L'intervalle de confiance qui contient l'âge de l'échantillon avec une probabilité de 95,4 pour cent couvre ainsi environ 165 ans.

textuelles sont absentes, on doit restituer les cultures à partir d'artefacts, par exemple lithiques. Après le Paléolithique, les principaux marqueurs temporels préhistoriques sont les tessons de poterie, puisque le style des céramiques s'est renouvelé à chaque remplacement d'une culture par une autre.

Ces datations typologiques ne sont toutefois que relatives, c'est-à-dire qu'elles ne se réfèrent pas à un point déterminé sur l'échelle temporelle. La toute première datation absolue, qui se réfère explicitement à une date de notre calendrier et non à un événement évoqué dans un texte, a été rendue possible par la méthode du radiocarbone mise au point vers 1945 par Willard Libby (1908-1980).

Ce physico-chimiste américain a découvert que les protons issus du rayonnement cosmique produisent des neutrons lorsqu'ils rencontrent les molécules de l'air stratosphérique. Ces neutrons entrent ensuite en collision avec les atomes d'azote de l'air et forment notamment des atomes de carbone 14, un isotope radioactif noté ^{14}C et souvent nommé radiocarbone.

Sur le plan chimique, le radiocarbone se comporte comme les isotopes bien plus fréquents que sont le carbone 12 (l'isotope dominant, ^{12}C) et le carbone 13 (^{13}C). Les réactions avec l'oxygène produisent ainsi des molécules de dioxyde de carbone intégrant cet isotope, $^{14}\text{CO}_2$. Le dioxyde de carbone étant assimilé par photosynthèse, le radiocarbone se retrouve dans la chaîne alimentaire, est intégré aux organismes vivants et retourne dans l'atmosphère *via* la respiration et la décomposition de

la matière organique. Outre ce cycle lié à la vie, un échange de radiocarbone se produit entre l'air et la surface océanique.

Libby supposa d'abord que le transport du carbone 14 dans la biosphère, sa production dans la haute atmosphère et sa désintégration radioactive spontanée concourent à ce que la proportion par rapport au carbone 12 du carbone 14 dans l'air et la biomasse se soit établie au cours du temps à une valeur stable.

Le carbone 14, une horloge naturelle

À la mort d'un organisme vivant, tous ses échanges de carbone avec l'extérieur prennent fin. À cet instant, une horloge naturelle – l'horloge au carbone 14 – se déclenche, car la proportion de carbone 14 dans l'organisme se met à décroître exponentiellement avec le temps selon un rythme connu, par radioactivité. Dans l'hypothèse où la concentration atmosphérique de carbone 14 n'a pas varié au cours du temps, il suffit alors de comparer la proportion de carbone 14 d'un échantillon avec la proportion atmosphérique pour déduire l'âge de l'échantillon, ou plus exactement le temps écoulé depuis que l'organisme correspondant est mort. Tel est le principe de la datation au radiocarbone.

Libby et son équipe ont réalisé leurs premières datations sur des échantillons égyptiens d'âges connus et certains. Cherchant à prouver que l'intensité du rayonnement cosmique était restée égale dans le temps, ils ont procédé en supposant une

concentration atmosphérique constante de carbone 14; ils voulaient par ailleurs établir le principe de l'horloge au carbone 14, c'est-à-dire qu'il existait bien de la matière organique où seule la désintégration par radioactivité, et non les conditions du stockage ou d'autres causes, fait varier la proportion de radiocarbone.

À cet effet, ils employèrent notamment un échantillon de bois provenant du bateau funéraire de Sésostri III, que les archéologues faisaient remonter à 1843 avant notre ère, à 50 ans près. Or la nouvelle méthode donna un âge de 3700 ± 400 ans, soit 1750 ans avant notre ère à 400 ans près. Ce résultat passait pour précis, mais nous savons aujourd'hui que les 800 ans d'incertitude résultent de sources d'erreurs alors inconnues.

En réalité, la proportion de carbone 14 dans l'atmosphère n'est pas constante dans le temps. C'est pourquoi les mesures réalisées après les premiers travaux de Libby sur des échantillons datant de l'Ancien Empire divergeaient de plusieurs centaines d'années des datations historiques. Vers 2500 avant notre ère, le champ magnétique terrestre s'est en effet affaibli, ce qui a laissé davantage de rayons cosmiques pénétrer dans l'atmosphère. La concentration atmosphérique en carbone 14 a augmenté alors, d'où un biais dans l'âge mesuré en laboratoire par la méthode de Libby.

Ce biais faillit discréditer auprès des historiens la méthode de datation inventée par Libby. De son côté, ce dernier mettait en cause les datations historiques... En outre, au début des années 1960, des écarts sont

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 : 5 568 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 $5\,700 \pm 30$ 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.

