

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

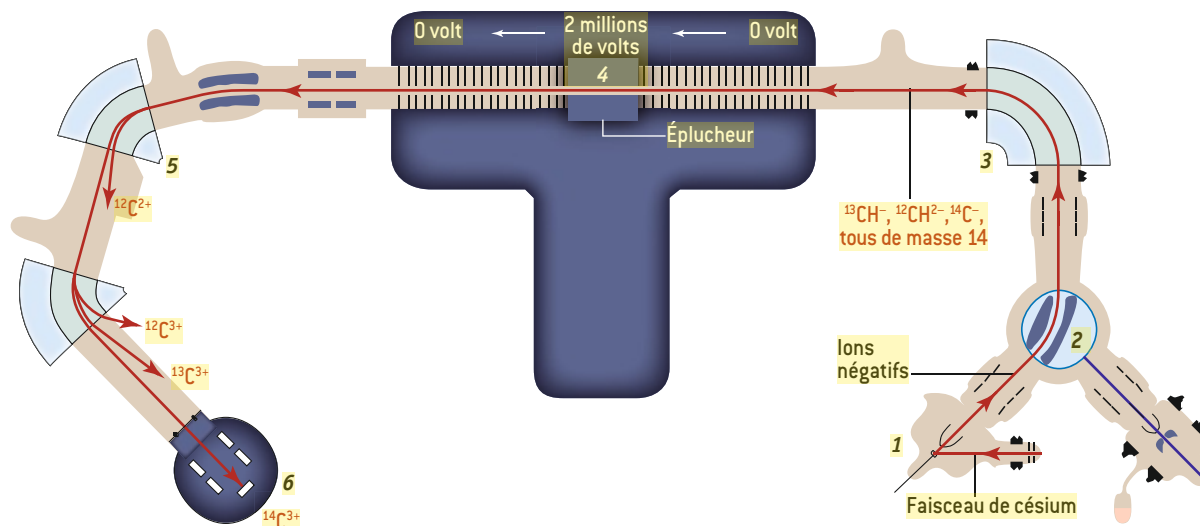
LE PRINCIPE DE LA SPECTROMÉTRIE DE MASSE PAR ACCÉLÉRATEUR

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.



Pour la Science