

Re.S.Artes

Le Regard de la Science sur les Arts et le patrimoine culturel

DATATION PAR CARBONE 14 EN ARCHÉOLOGIE : PRINCIPE, MÉTHODOLOGIE, CORRECTIONS

Le cas particulier des « effets réservoir »

Principe de la méthode – quelques rappels

Le carbone 14 (^{14}C) ou radiocarbone est un isotope radioactif du carbone (^{12}C) dont la période de désintégration radioactive, ou demi-vie, est égale à 5730 ± 40 ans. Il est créé dans la haute atmosphère sous l'effet des rayonnements cosmiques et du vent solaire, à partir des atomes d'azote 14 (^{14}N).

Au cours de son existence, un organisme vivant assimile le carbone atmosphérique via différents processus (respiration, alimentation). Ces échanges constants avec la biosphère induisent une proportion invariable de carbone 14 par rapport au carbone total au sein de cet organisme, similaire à celle existant dans l'atmosphère de l'époque où il a vécu.

A partir de l'instant où il meurt, les échanges avec la biosphère cessant, la quantité de radiocarbone qu'il contient décroît au cours du temps selon une loi exponentielle connue ($N(t) = N(0) \cdot e^{-\lambda t}$ où $N(t)$ et $N(0)$ représentent respectivement les nombres d'atomes de carbone 14 au moment de la mesure et à la mort de l'organisme, et λ est la demi-vie de cet élément. Cette loi explicite le fait que tous les 5730 ans, la quantité de carbone 14 résiduel est réduite de moitié.

Dater une matière organique ancienne consiste donc à évaluer la quantité de carbone 14 résiduel. Cette mesure, reportée à la teneur en carbone total, permet donc de déterminer de manière absolue (sans la comparer à d'autres mesures) le temps séparant la mort de l'organisme du moment de l'analyse.

Ce principe, mis en évidence dans les années 1940 aux Etats-Unis, a valu à son promoteur, Willard F. Libby, le prix Nobel de chimie en 1960, et a fait l'objet de nombreuses publications ([1-3] par exemple).

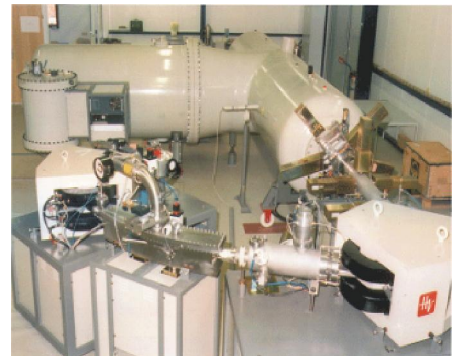
De la théorie à la pratique...

Les modes de mesure : AMS et LSC

Il existe aujourd'hui deux manières de mesurer la quantité résiduelle de carbone 14 contenue dans un échantillon.

La mesure par spectrométrie de masse couplée à un accélérateur de particules (AMS)

Elle permet de séparer les différents isotopes du carbone et de procéder à leur comptage spécifique, après une préparation adéquate de l'échantillon (graphitisation). Cette procédure offre un contrôle des effets d'éventuelles pollutions, par une correction du fractionnement isotopique ($\delta^{13}\text{C}$) basée sur la comparaison des rapports de concentration $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ et $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$.



De plus, l'AMS autorise la datation de fragments carbonés de petite taille, individualisés (un charbon de bois = une date), ce qui permet, entre autre, de mettre en évidence des perturbations post-dépositionnelles.

Pour l'analyse des matériaux d'origine végétale (bois, charbons), une quantité de matière minimale de 20 mg suffit. Pour les ossements, quelques centaines de milligrammes sont nécessaires.

La mesure par scintillation (comptage classique - LSC)

Cette méthode consiste à mesurer directement les désintégrations des atomes de carbone 14, par unité de temps. On utilise pour cela des détecteurs à scintillation qui réagissent aux particules émises lors de ce processus. Il s'agit d'un comptage dit « classique », dans la mesure où pendant de nombreuses années, c'était la seule technique disponible.



Cependant, aujourd'hui, elle implique des contraintes dans l'échantillonnage qui la rendent moins employée que la spectrométrie de masse.

Ainsi, pour des analyses par comptage classique, les quantités de matière requises sont jusqu'à 1000 fois plus importantes que pour l'AMS (plusieurs dizaines de grammes pour les matières végétales).

Cette méthode est donc envisagée quand le matériel à dater est disponible en grande quantité et qu'il est chronologiquement homogène (gros morceaux de bois ou de charbon de bois, par exemple).

Enfin, signalons que quel que soit le mode de mesure, la quantité de carbone 14 résiduel doit être suffisante pour être au-dessus des limites de détection de ces méthodes.

Aussi, aujourd'hui, il n'est pas possible d'accéder à des âges supérieurs à 50 000 ans (correspondant à peu près à 10 périodes de désintégration du carbone 14). Au-delà, les teneurs en carbone 14 sont trop faibles pour être mesurées.

Les ajustements des mesures : calibration et effets réservoir

La calibration de l'âge

La transformation de la teneur en carbone 14 résiduel en âge présuppose que la production de cet élément dans l'atmosphère a été constante au cours du temps.

Hors, les variations de l'activité solaire, celles du champ magnétique terrestre, ou encore plus récemment l'activité humaine, ont produit des concentrations variables de ^{14}C atmosphérique au cours du temps. Il est donc nécessaire de tenir compte de ces variations.

Cela se fait au travers d'une courbe construite à partir de l'intercomparaison de résultats obtenus par carbone 14 et par des méthodes de datation indépendantes appliquées sur les mêmes matériaux (la dendrochronologie par exemple).

C'est la transformation de l'âge brut (exprimé en BP, Before Present) par cette courbe de calibration qui donne la date calibrée ou calendaire, exprimée en années BC (av. J.C.) ou AD (ap. J.C.). Cette procédure fait l'objet d'ajustements et de recherches permanentes pour l'affiner [4-6].

Seules les dates calibrées (BC / AD) ont une valeur scientifique, même si des raisonnements sur des chronologies relatives peuvent être conduits à partir des âges bruts.

Les effets perturbateurs

En plus des effets pris en compte au travers de la courbe de calibration, il existe d'autres causes qui peuvent perturber le rapport direct entre le taux de carbone 14 dans l'atmosphère et celui qui se retrouve dans l'organisme vivant.

Le plus important concerne l'effet réservoir marin, qui correspond au phénomène suivant.

Le temps nécessaire au passage du Carbone 14 atmosphérique dans le milieu marin entraîne une diminution de la teneur de ce radioélément dans l'eau de mer par rapport à celle mesurée au même moment dans l'air. En conséquence, les carbonates dissous, à partir desquels les coquillages fabriquent leur coquille, apparaissent appauvris en C14.

Cette différence induit un vieillissement apparent de plusieurs centaines d'années des âges mesurés pour ces fruits de mer et leurs consommateurs au regard de ceux obtenus sur des organismes terrestres contemporains [7] : on parle "d'effet réservoir", $R(t)$. De plus, il est nécessaire de tenir compte au cas par cas d'effets locaux propres à la morphologie des côtes, aux courants marins, à la profondeur du milieu de vie de l'organisme à dater, etc. Ces paramètres s'ajoutent à l'effet réservoir et sont notés Delta R (dR).

La datation des organismes marins et de leurs consommateurs doit donc nécessairement intégrer une correction de temps tenant compte des variations locales et temporelles de la concentration en carbone 14 en contexte maritime [8-9]. Des efforts considérables ont ainsi été réalisés pour tenter d'en estimer l'ampleur (*CHRONO Marine Reservoir Database*, ou encore *Marine09* [6,10-11]), et des données nouvelles sont apportées progressivement.

Cet effet trouve des déclinaisons dès que l'organisme à dater (ou consommé) provient d'un milieu aquatique, puisqu'il occasionne une dynamique d'introduction du carbone 14 différente de celle ayant cours dans l'atmosphère. Il peut également se trouver en présence de carbonates dissous issus de substrats calcaires géologiques ne contenant plus de carbone 14 (on peut alors parler d'effet « hard water », [12]).

Cela induit que la mesure de l'âge C14 d'un ossement provenant d'un individu ayant consommé des denrées d'origine aquatique est susceptible d'être affectée par un effet réservoir, qu'une analyse critique des résultats doit permettre de détecter, et donc de corriger de manière appropriée. Cela est possible, en particulier, par l'étude des $\delta^{13}\text{C}$ (un organisme marin a un $\delta^{13}\text{C}$ plus important qu'un organisme terrestre) [12].

Analyse critique des résultats : ne pas se limiter à des résultats bruts

Pour une optimisation de la démarche de datation physique

L'obtention d'un quorum de dates pertinentes sur un site nécessite la mise en place d'une méthodologie rigoureuse impliquant différents acteurs : les archéologues et les chronologistes. Ainsi, préalablement aux analyses et si la problématique chronologique le requiert, une réflexion commune sur l'adéquation des prélèvements avec les questions posées peut être importante. Il s'agira de tenir compte, en particulier, de la nature des matières organiques analysables et de leurs conditions d'enfouissement.





Puis, une fois les datations obtenues, de nouvelles discussions s'engagent entre les chronologistes et les archéologues. Cette étape, indispensable avant toute conclusion, consiste, en particulier, à comparer les résultats et à les discuter à la lumière des hypothèses de terrain et/ou des interprétations préexistantes.

Cependant, cette réflexion commune ne peut être concluante que si, en amont, les données ont été analysées et exploitées correctement, en accord avec l'état de l'art de la méthode et en tenant compte en particulier des effets perturbateurs, comme les effets réservoir.

De la nécessité d'exiger des rapports d'étude complets et critiqués

Aussi, dans la mesure du possible, dans une exigence de qualité et afin d'apporter tous les éléments contradictoires à une analyse critique des données obtenues, les rapports d'étude C14 délivrés doivent comporter une documentation complète sur le contexte stratigraphique des prélèvements ainsi qu'une discussion sur la fiabilité des mesures et le degré de concordance des résultats obtenus.

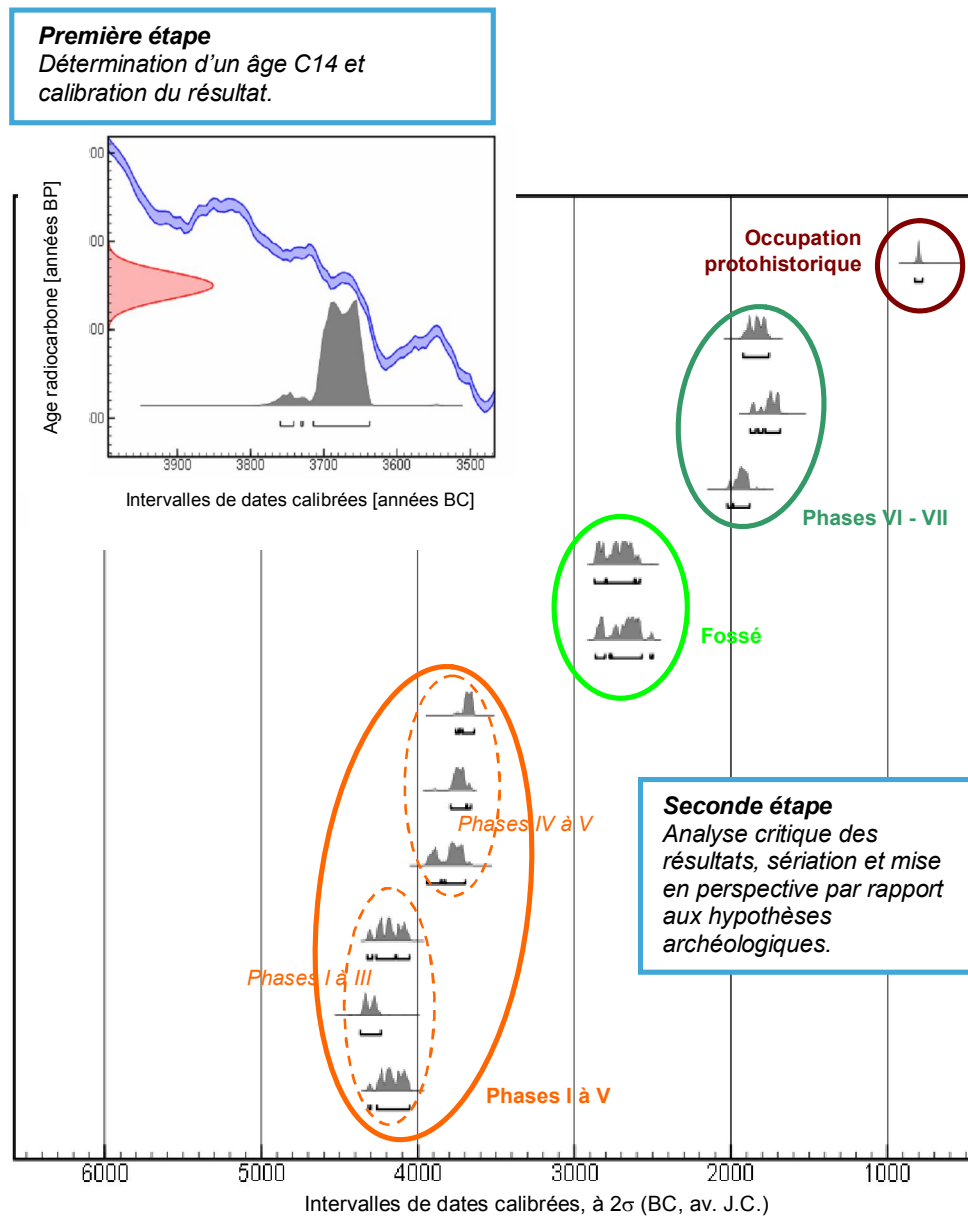
Un rapport exploitable à des fins de publication présente les informations suivantes :

-  le référencement archéologique complet de l'échantillon à dater et son positionnement dans la stratigraphie, en particulier dans le cas où il appartient à une série ;
-  la valeur de la correction du fractionnement isotopique ($\delta^{13}\text{C}$), commentée ;
-  le résultat brut, accompagné d'un commentaire sur la fiabilité de la mesure ;
-  la calibration du résultat brut, en précisant la procédure utilisée et en donnant la transposition graphique de l'âge sur les courbes de calibration ;

- tous les intervalles chronologiques probables (à 1 et 2σ) à l'issue de la calibration, commentés (en particulier dans le cas où l'âge brut de l'échantillon entre dans un plateau d'âges C14).
- l'analyse et la prise en compte des effets réservoir dans le cas de la datation de coquillages ou de tout autre organisme présentant les caractéristiques d'une composante d'alimentation d'origine marine.

Ainsi, dans le cadre de séries, les dates sont comparées entre elles, replacées dans leur contexte stratigraphique et archéologique et discutées à la lumière des études de terrain.

Une telle démarche repose sur une collaboration étroite entre les différents acteurs du programme archéologique de manière à obtenir un rapport chronologique synthétique, complet et pertinent, utilisable à des fins de publication.



Exemple du traitement d'une série de datations acquises par Carbone 14.
Dans ce cas, l'obtention et l'analyse critique de cet ensemble de dates C14 ont permis d'affiner la chronologie d'occupation du site en replaçant dans le temps les différentes phases identifiées sur le terrain.



Bibliographie

- [1] Libby W.F., 1955, *Radiocarbon dating*. 2nd Ed, University of Chicago Press, Chicago.
- [2] Stuiver M. and Polach H.A., 1977, "Reporting of ¹⁴C data" *Radiocarbon* 19, 3, 355-363.
- [3] Taylor R.E., 1987, *Radiocarbon dating: an archaeological perspective*, Academic Press, London, chap. 6.
- [4] Bronk Ramsey C., 2013, "OxCal v4.2.3 *Radiocarbon*, in press.
- [5] Stuiver M. *et al.*, 1998, « CALIB rev 4.3 (Data set 2) », *Radiocarbon*, vol. 40, p. 1041-1083.
- [6] Reimer P. *et al.*, 2013, "IntCal13 and Marine13 radiocarbon age calibration curves, 0-50,000 years cal BP" *Radiocarbon*, 55, 4, 1869-1887.
- [7] Bronk Ramsey, C. 2008. Radiocarbon dating: revolutions in understanding. *Archaeometry* 50 (2), 249-275.
- [8] Bard, E., Arnold, M., Fairbanks, R. G., Hamelin, B. 1993. Th230 – U234 and C14 ages obtained by mass spectrometry on corals. *Radiocarbon* 35, 191-199.
- [9] Stuiver, M., Braziunas, T. F. 1993. Modelling atmospheric C14 influences and C14 ages of marine samples back to 10,000 BC. *Radiocarbon* 35, 137-189.
- [10] Hughen, K. A., Baillie, M. G. L., Bard, E., Beck, J. W., Bertrand, C. J. H., Blackwell, P. G., Buck, C. E., Burr, S. G., Cutler, K. B., Damon, P. E., Edwards, R. L., Fairbanks, R. G., Friedrich, M., Guilderson, T. P., Kromer, B., McCormac, G., Manning, S., Bronk Ramsey, C., Reimer, P. J., Reimer, R. W., Remmele, S., Southon, J. R., Stuiver, M., Talamo, S., Taylor, F. W., Van Der Plicht, J., Weyhenmeyer, C. E. 2004. Marine04 Marine Radiocarbon Age Calibration, 0-26 cal kyr BP. *Radiocarbon* 46 (3), 1059-1086.
- [11] Stuiver, M., Reimer, P. J., Braziunas, T. F. 1998. High-precision radiocarbon age calibration for terrestrial and marine samples. *Radiocarbon* 40, 1127-1151.
- [12] Vartanian E., Soler L, Roque C., Dupont C., Save S., 2013, "Chronologie par C14 et accès aux ressources alimentaires en milieu littoral : détermination des effets réservoir - Le cas des coquillages du site des Quatre Chevaliers à Périgny (Charente-Maritime)", *Ancient maritime communities and the relationship between people and environment along the European Atlantic coasts / Anciens peuplements littoraux et relations homme / milieu sur les côtes de l'Europe atlantique*, BAR International Series 2570, Edited by M-Y Daire, C. Dupont, A. Baudry, C. Billard, J-M Large, L. Lespez, E. Normand and C. Scarre, p. 553-559.

