

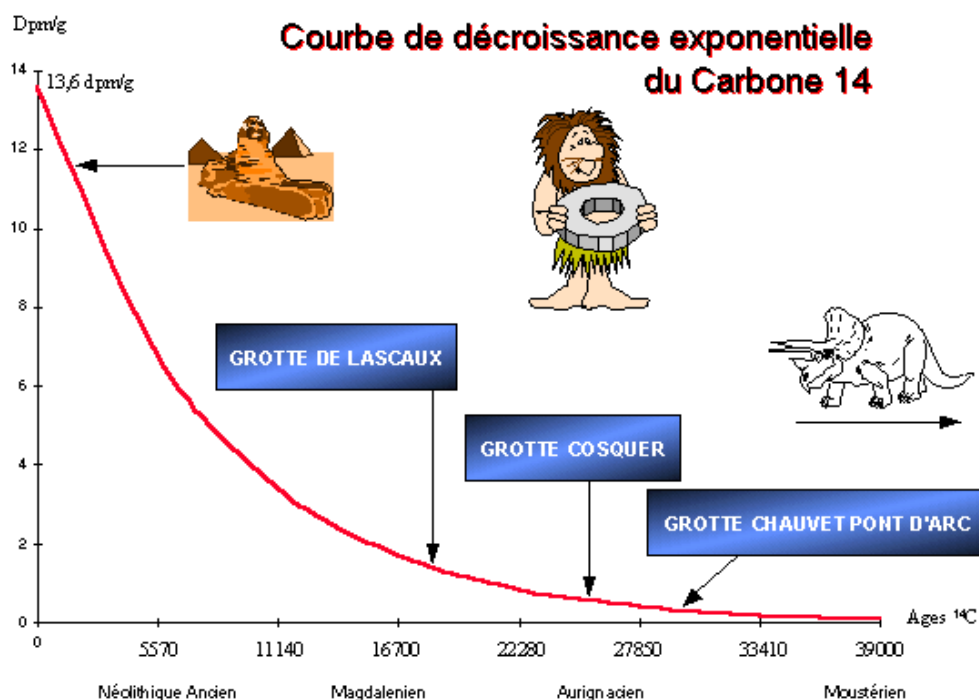
La datation par le carbone 14

Jean BLIAUX, Gilbert BRUHL

1. GÉNÉRALITÉS

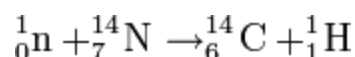
La datation par le carbone 14, dite également datation par le radiocarbone ou datation par comptage du carbone 14 résiduel, est une méthode de datation radiométrique basée sur la mesure de l'activité radiologique du carbone 14 (^{14}C) contenu dans de la matière organique dont on souhaite connaître l'âge absolu, à savoir le temps écoulé depuis la mort de ce support organique.

Le domaine d'utilisation de cette méthode correspond à des âges absolus de quelques centaines d'années jusqu'à, et au plus, 40.000 ans¹. L'application de cette méthode à des événements anciens, tout particulièrement lorsque leur âge dépasse 6.000 ans (préhistoriques), a permis de les dater beaucoup plus précisément qu'auparavant. Elle a ainsi apporté un progrès significatif en archéologie et en paléanthropologie.



2. ORIGINE DU CARBONE 14

Certains protons cosmiques, en provenance des galaxies, sont déviés par le champ magnétique terrestre. Ils donnent, par choc sur des molécules d'oxygène ou d'azote de l'air, des neutrons. Le carbone 14 est issu de la réaction entre les neutrons et l'azote. Cette réaction de formation du carbone 14, établie par Willard Franck Libby en 1946, est la suivante :

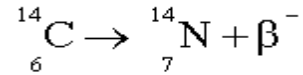


¹ La valeur de 40.000 ans est usuellement adoptée. Cependant d'autres auteurs considèrent qu'il est possible de faire des ajustements jusqu'à 50.000 ans. **Au delà de 50.000 ans les échantillons ne peuvent être datés au carbone 14 car le rapport $^{14}\text{C}/\text{C}$ total est alors trop faible pour être mesuré par les techniques actuelles.**

3. PROPRIÉTÉS DU CARBONE 14

Le carbone 14 est l'un des isotopes du carbone, son abondance est de $1,2 \cdot 10^{-12}$. Les deux autres isotopes, stables, sont le carbone 12 (98,89 %) et le carbone 13 (1,108 %).

Le carbone 14 est un émetteur radioactif β , il se désintègre selon la réaction suivante :



La **période radioactive** (ou demi-vie) du carbone 14 est de 5.730 ± 40 ans et a été mesurée en 1962. Des mesures préalables avaient donné **5.568** ans et furent utilisées depuis 1951. Après accord international, c'est cette ancienne valeur qui a été néanmoins conservée pour le calcul des âges.

La proportion de carbone 14 n'est pas strictement constante dans l'atmosphère dans laquelle il est produit (par action des neutrons du rayonnement cosmique sur l'azote) mais les fluctuations de ce pourcentage au cours du temps sont assez bien connues - du moins pour les 40.000 dernières années - et introduites dans la correction et la calibration des datations radiocarbone.

4. PRINCIPE DE LA DATATION

Les végétaux et animaux vivants assimilent le gaz carbonique de l'atmosphère : ce dernier contient une faible quantité de ${}^{14}\text{C}$ supposée constante dans le temps, et que l'on retrouve en proportion identique dans tout organisme vivant.

Cet organisme vivant assimile le carbone sans distinction isotopique, la proportion de ${}^{14}\text{C}$ par rapport au carbone total (${}^{12}\text{C}$, ${}^{13}\text{C}$ et ${}^{14}\text{C}$) étant la même que celle existant dans l'atmosphère du moment².

La datation au ${}^{14}\text{C}$ se fonde ainsi sur la présence de radiocarbone en infime proportion (de l'ordre de 10^{-12} pour le rapport ${}^{14}\text{C}/\text{C}$ total). A partir de l'instant où meurt un organisme, les échanges avec l'extérieur cessant, la quantité de radiocarbone qu'il contient décroît au cours du temps selon une loi exponentielle connue (désintégration naturelle des atomes de carbone 14).

$$N(t) = N_{(0)} \cdot e^{-\lambda t}$$

Avec $N(t)$ = activité ${}^{14}\text{C}$, d'un os fossile, par exemple, aujourd'hui.

$N_{(0)}$ = activité ${}^{14}\text{C}$ du carbone moderne, donc celle du fossile à sa mort, puisque supposée constante dans le temps.

λ constante de désintégration égale à $0,693 / T$ (T = période), soit $1,210 \cdot 10^{-4} \text{ an}^{-1}$ ou $3,9 \times 10^{-12} \text{ s}^{-1}$.

La méthode la plus courante de datation consiste à déterminer la concentration de radiocarbone (c'est-à-dire le rapport ${}^{14}\text{C}/\text{C}$ total) d'un échantillon à l'instant t de mesure ; l'âge de l'échantillon est alors donné par la formule :

$$t - t_0 = \frac{1}{\lambda} \cdot \ln \frac{N_0}{N(t)}$$

On trouve alors pour l'âge t : $t = \ln [N_0 / N(t)] \times 8,265 \cdot 10^3$ ans.

5. LES INSTRUMENTS DE DATATION

Les 2 principales méthodes utilisées pour dater des échantillons organiques contenant du carbone 14 sont la **scintillation liquide** et la **spectrométrie de masse**.

² En fait la proportion de carbone 14 n'est pas strictement constante dans l'atmosphère dans laquelle il est produit (par action des neutrons du rayonnement cosmique sur l'azote) mais les fluctuations de ce pourcentage au cours du temps sont assez bien connues - du moins pour les 40.000 dernières années - et introduites dans la correction et la calibration des datations radiocarbone.

La **scintillation liquide** consiste à « compter » des produits de la désintégration du carbone 14. Ce dernier se désintègre naturellement et émet un neutron et un électron (désintégration β^-). La scintillation liquide consiste alors à placer un mélange scintillant qui va venir émettre un photon à une énergie bien précise qui pourra ensuite être détecté par un système électronique lorsque cette fameuse particule bêta la traversera.

La **spectrométrie de masse** consiste quant à elle à « compter » les atomes de carbone 12 (stable) et de carbone 14 (radioactif) directement grâce au fait que ces 2 isotopes ont des masses différentes. Cependant, comme la proportion de carbone 14 est extrêmement faible, le spectromètre de masse doit être couplé à un accélérateur de particules permettant alors de mettre en place des techniques de détection beaucoup plus fiables.

Aujourd'hui, la mesure directe du rapport $^{14}\text{C}/\text{C}$ total par la seconde méthode est privilégiée car elle permet de dater des **échantillons beaucoup plus petits** (moins d'un milligramme contre plusieurs grammes de carbone auparavant) et **en un minimum de temps** (en moins d'une heure contre plusieurs jours ou semaines).



En pratique, le carbone extrait de l'échantillon est d'abord transformé en graphite, puis en ions qui sont accélérés par la tension générée par un spectromètre de masse couplé à un accélérateur de particules. Les différents isotopes du carbone sont alors séparés ce qui permet de compter les ions de carbone 14.

Signalons que les **échantillons vieux de plus de 50.000 ans ne peuvent être datés** au carbone 14 car le rapport $^{14}\text{C}/\text{C}$ total est alors trop faible pour être mesuré par les techniques actuelles.

Spectromètre de masse ^{14}C

6. TECHNIQUES DE MESURE

Les techniques utilisées au début consistaient à convertir l'échantillon en CO_2 , puis à élaborer un composé gazeux qui était introduit dans un détecteur (compteur proportionnel ou scintillateur liquide). Les quantités nécessaires pour une datation variaient suivant la teneur en carbone (10 à 15 g pour des charbons de bois, des tissus, des graines, jusqu'à 1 kg pour des os ou des sédiments et jusqu'à 100 litres pour des eaux souterraines).

Le faible taux de comptage entraînait, à l'usage, des difficultés (erreur statistique et temps de comptage élevé) qu'il a fallu dominer : au Centre des Faibles Radioactivités de Gif-sur-Yvette, laboratoire commun CEA/CNRS, fut élaboré le **TANDETRON**, spectromètre de masse associé à un accélérateur tandem.

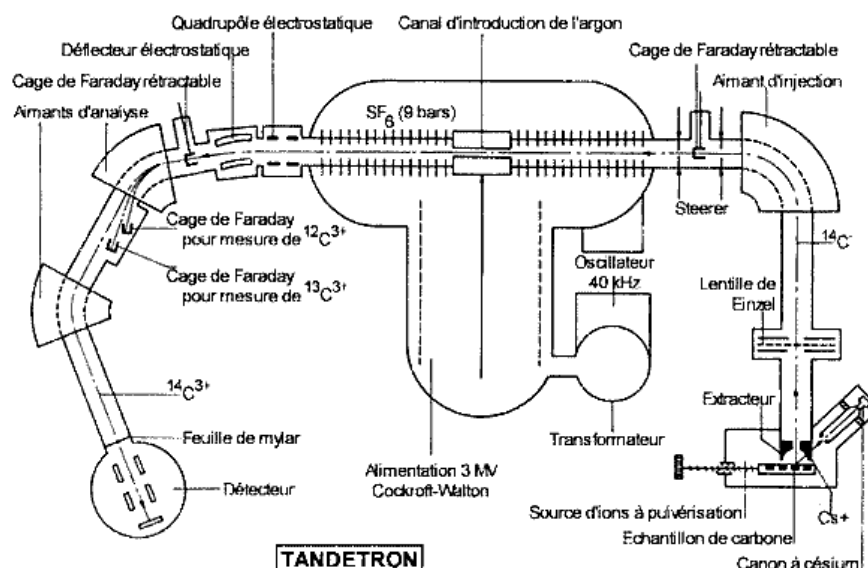


Figure 1 : Principe de fonctionnement de l'accélérateur TANDETRON

Cette technique supplante les précédentes dans deux domaines majeurs (datation d'échantillons plus vieux que 30.000 ans et datation d'échantillons ne contenant qu'une très faible quantité de carbone).

L'accélérateur tandem est un accélérateur constitué de deux parties symétriques séparées par une partie centrale remplie d'argon. En amont, par bombardement d'ions césium sur l'échantillon, on produit dans un premier spectromètre des ions négatifs de masse 14 ($^{12}\text{CH}_2$, ^{13}CH et ^{14}C). Ces ions sont accélérés dans la première partie de l'accélérateur et vont cogner sur les atomes d'argon dans la partie centrale, en donnant des ions C positifs et les fragments des ions 14 parasites, à savoir ^{12}C , ^{13}C , et H.

A la sortie de la deuxième partie du tandem, avec une accélération identique à la première, on trouve principalement des ions ^{14}C (et quelques ions parasites ^{12}C et ^{13}C ayant différents états de charge et différentes énergies, qui sont déviés grâce à un deuxième spectromètre en sortie). La comparaison finale des rapports $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ et $^{14}\text{C}/^{13}\text{C}$ permet le calcul des âges comme dans le premier cas.

Depuis les années 2004, la demande des laboratoires, opérant dans le domaine de l'environnement et du climat ainsi que celle de la communauté archéologique et muséographique, a été estimée à environ 4.500 mesures par an. Ce constat a abouti à la création, par le CNRS, le CEA, l'IRSN, l'IRD et le ministère de la Culture et de la communication, d'un laboratoire de mesure du carbone 14 centré autour de l'acquisition d'une machine de nouvelle génération, appelée ARTEMIS.



Spectromètre de masse par accélérateur ARTEMIS
Laboratoire de mesure du carbone 14 (LMC14), Saclay



Banc de préparation automatique pour les échantillons datés au carbone 14

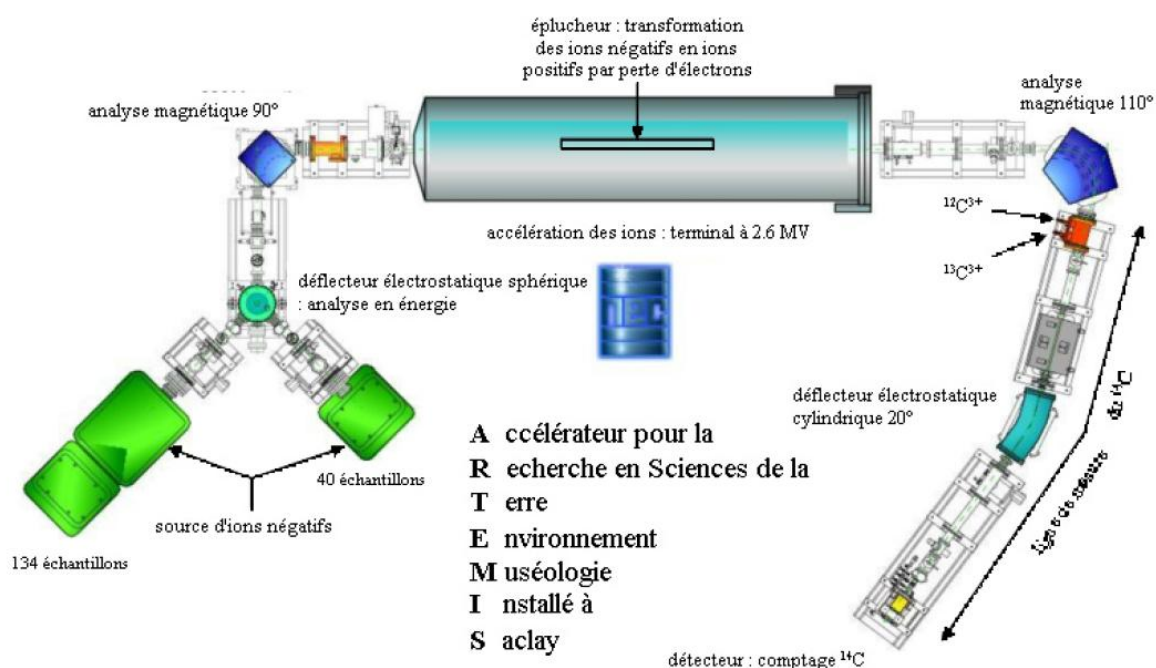


Figure 2 : Principe de fonctionnement de l'accélérateur ARTEMIS

Cet appareil, installé au CEA Saclay, fonctionne en automatique 24h / 24h et permet un débit d'analyses d'au moins 4.500 par an. Son principe de fonctionnement est identique au TANDETRON, mais avec des équipements modernisés.

7. FIABILITÉ DE LA MÉTHODE

Comme toute méthode scientifique expérimentale, la datation au carbone 14 peut subir des biais expérimentaux qu'il faut prendre en compte de manière à effectuer des datations précises.

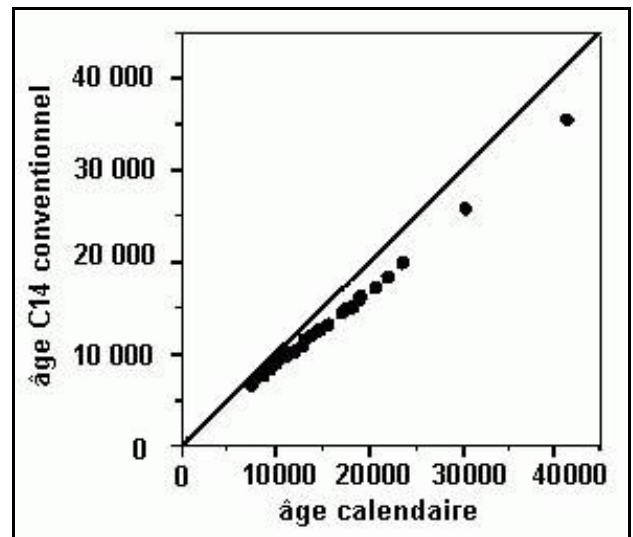
Depuis la **révolution industrielle**, l'homme a produit du carbone 12 en très grande quantité via son industrie (mais pas de carbone-14), ce qui a pour effet de modifier le rapport entre le carbone 12 et le carbone 14 dans notre atmosphère. A contrario, les premiers essais thermonucléaires dans l'atmosphère ont produit de très grandes quantités de carbone 14. L'homme a donc « dérégulé » le cycle du carbone et donc déséquilibré la proportion de carbone 14 durant le siècle dernier ce qui rend la datation au carbone 14 difficile pour le 20^{ème} siècle. Si on effectuait une datation au carbone 14 sur un arbre au bord d'une autoroute, on pourrait le dater vieux de 2.000 ans à cause de sa grande concentration en carbone 12 absorbé à cause des rejets des pots d'échappements des voitures.

De plus, des événements géologiques majeurs comme des **éruptions volcaniques** ou des grands feux de forêt ont pu dégager une très grande quantité de carbone 12 dans l'atmosphère dérégulant également la proportion de carbone 14 dans certaines régions à certaines époques.

Par conséquent, les conventions choisies par Libby n'étant pas satisfaisantes, et la quantité globale de carbone 14 total dans la biosphère n'étant pas constante dans le temps, il est devenu nécessaire de construire des **courbes de calibration** en confrontant les datations obtenues par carbone 14 et celles données par d'autres méthodes telles que la dendrochronologie.

Ainsi, on transforme via ces courbes, l'âge BP (Before Present) en **âge calibré ou calendaire** exprimé sous forme d'intervalles chronologiques associés à un pourcentage de probabilité.

Avec cet exemple, un fossile sera daté d'environ 5.050 ans avant J.C. (au lieu de 4.595 ans avant J.C.).



Dérive des dates obtenues par analyse de carbone 14 par rapport aux âges calendaires obtenus par la méthode uranium - thorium sur des coraux

8. LIMITES DE LA DATATION PAR LE CARBONE 14

La datation par le carbone 14 est une méthode très utilisée par les archéologues, mais son utilisation présente quelques limites :

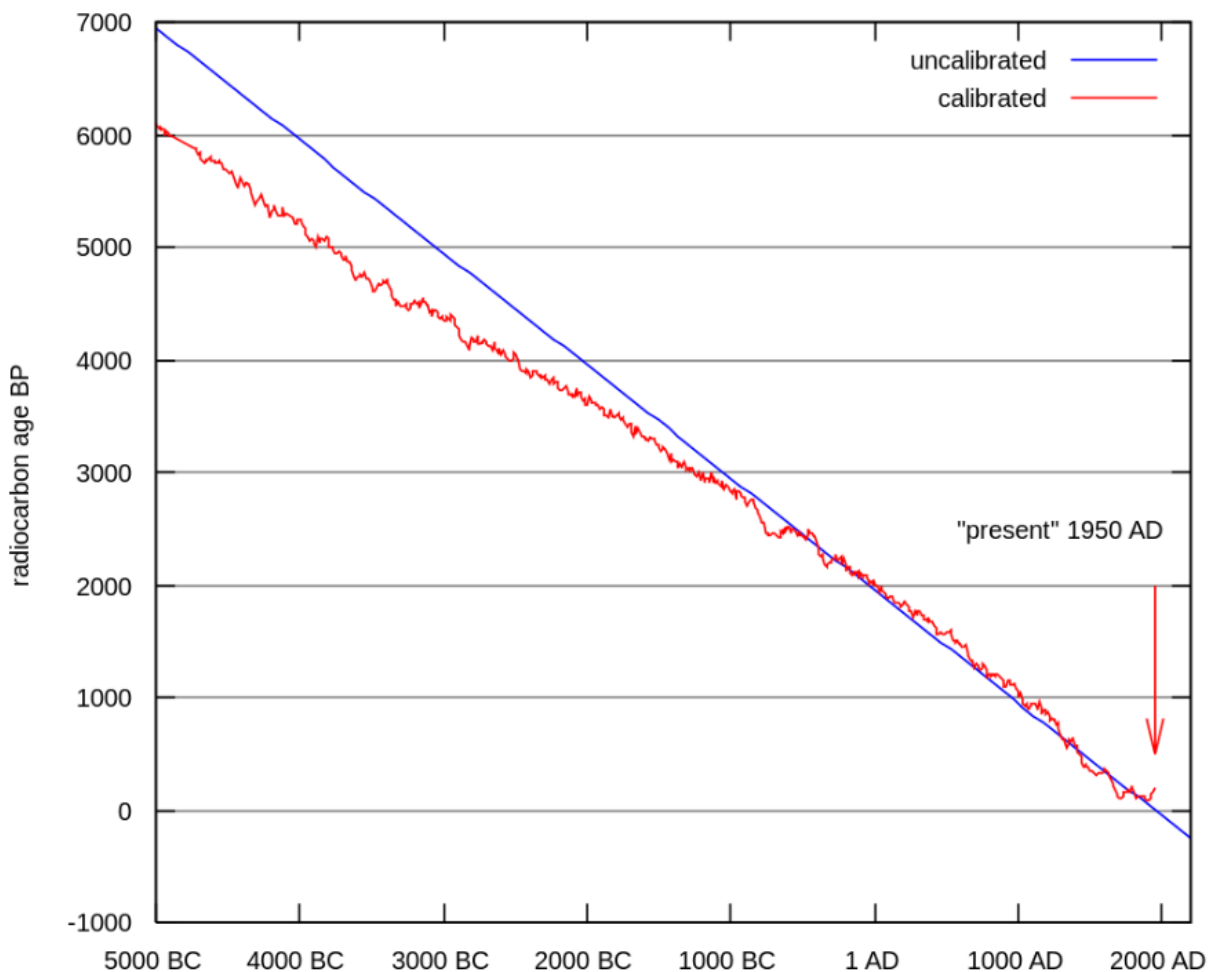
- L'élément que l'on veut dater doit avoir incorporé du carbone dans des proportions équivalentes à celles de l'atmosphère ; elle ne s'applique donc qu'aux matériaux organiques et pas du tout aux produits minéraux ;
- La méthode suppose que le rapport $^{14}\text{C}/\text{C}$ est resté constant dans l'atmosphère depuis la mort de l'élément à dater jusqu'à aujourd'hui : il a été démontré ci-dessus que ce n'était pas entièrement vrai ;
- La fermeture du système de l'élément à dater est aussi indispensable ; s'il incorpore de nouveaux atomes de carbone après sa mort, le rapport $^{14}\text{C}/\text{C}$ est bouleversé et le résultat ne sera pas suffisamment fiable ;
- La quantité de carbone radioactif diminue de moitié tous les 5.730 ans, valeur conventionnelle de la période de cet élément ; donc seuls des éléments datant de moins de 50.000 ans au maximum (soit environ huit périodes) présentant une quantité mesurable avec une précision assez bonne peuvent être datés. De plus, l'approximation croît en fonction de l'âge des matériaux et les résultats sont approximatifs au-delà de 35.000 ans ; pour des âges plus anciens, d'autres méthodes sont mises en œuvre comme la **datation au potassium-argon** ou la **datation par le couple rubidium-strontium**.

9. RÉSULTATS

Il a été décidé d'exprimer les âges ^{14}C mesurés, en âges BP (Before Present, l'année de référence étant 1950) et les valeurs corrigées en dates AD (Anno Domini, après JC) ou BC (Before Christ, avant JC).

Un âge ^{14}C après mesures se trouve converti non pas en une autre date, mais en un intervalle de dates ; cet intervalle est plus ou moins long selon l'incertitude sur l'âge mesuré (temps de comptage, niveau de comptage, etc.) C'est ainsi que les échantillons sur le suaire de Turin dont l'âge a été très controversé, ont été récemment remesurés et ont été recentrés dans la fourchette "1260 à 1390 AD".

De même, les différents motifs rupestres de la grotte Chauvet en Ardèche sont passés de 31.000 BC à 34.000 BC, ceux de la grotte de Lascaux de 17.000 à 19.000 BC. Les bisons noirs de Niaux (Ariège), plus jeunes, ont glissé de 10.000 à 11.000 BC.



10. NOUVELLES APPLICATIONS

Diverses applications de la méthode de datation au carbone 14 ont été mises en œuvre ces dernières années :

- **Datation d'objets ethnographiques ou artistiques**
- **Préhistoire et grottes ornées**
- **Architecture médiévale** (exemples récents de l'abbaye de Saint-Germain d'Auxerre, du prieuré Saint-Sauveur-de-Melun (Seine-et-Marne) ou de l'église Notre-Dame-sous-Terre sur le Mont-Saint-Michel).
- **Archéologie funéraire**
- **Le bois et les datations AMS**
- **Le paléo-environnement**
- **L'archéologie de la zone intertropicale humide**

11. SOURCES

- [1] Site www.laradioactivite.com : Datation au carbone-14
- [2] La datation radiométrique au carbone 14 – La science pour tous
- [3] Site www.culture.gouv.fr : Archéologie, patrimoine culturel et datation par le carbone 14
- [4] WIKIPÉDIA
- [5] Fiche CEA Saclay : « Artémis date les vestiges de la grotte CHAUVET »
- [6] Site www.siram-art.com : La datation des objets en bois, ivoire, os, tissus, ...
- [7] Henri BROCH, Université de Nice-Sophia Antipolis, « Carbone 14, Contamination et rajeunissement du Saint Suaire de Turin »
- [8] Site www.siram-art.com : La datation des objets en bois, ivoire, os, tissus, ...
- [9] Site <http://carbon14.univ-lyon1.fr> : La datation par le radiocarbone (C14)