

Nouvelles méthodologies utilisées dans le domaine des datations en préhistoire

(New methodologies used in the field of dating in prehistory)

Falguères, Christophe
Muséum National d'Histoire Naturelle
Laboratoire de Préhistoire
UMR 6569 du CNRS
Institut de Paléontologie Humaine
1, rue René Panhard
F-75013 Paris

Les méthodes de datation fondées sur la radioactivité naturelle contribuent à l'élaboration d'un cadre chronostratigraphique dans lequel l'histoire de l'évolution humaine peut s'inclure. De nouvelles technologies telles que la spectrométrie de masse et la sonde laser ont permis de dater avec une grande précision certains événements importants qui jalonnent l'histoire de l'Homme. D'autres méthodes telles que la spectrométrie gamma non destructive ou la résonance paramagnétique électronique (RPE) permettent de dater des événements qui ne pouvaient pas être datés auparavant. Après une brève présentation des principales méthodes de datation, quelques exemples illustrant l'impact de ces nouvelles technologies sur la chronologie seront exposés.

Mots Clés: Préhistoire. Chronologie. Méthodes de datation. Spectrométrie de masse. Laser. Précision. Justesse.

Erradioaktibitate naturalean oinarrituriko datazio metodoak lagungarri gertatzen dira giza eboluzioaren historia sar daitekeen marko kronoestratigrafiko bat ezartzen. Zenbait teknologia berri, hala nola masa espektrometriak eta laser zundak, Gizakiaren historia mugarrizten duten gertakari garrantzitsu batzuk datatzea ahalbidetu dute. Beste zenbait metodok, hala nola espektrometria gamma ez suntsitzaileak edo erresonantzia paramagnetiko elektronikoak, lehen ezin zehaztuzkoak ziren kasuak datatzea bideratzen dute. Datazio metodo nagusiak labur aurkeztu ondoren, zenbait adibide azaltzen dira teknologia berri horiek kronologiaren gainean duten eragina erakutsiz.

Giltza-Hitzak: Historiaurrea. Kronologia. Datazio metodoak. Masa espektrometria. Laser. Doitasuna. Zehaztasuna.

Los métodos de datación fundados en la radioactividad natural contribuyen a la elaboración de un marco cronoestratigráfico en el que puede incluirse la historia de la evolución humana. Nuevas tecnologías como la espectrometría de masa y la sonda laser han permitido datar con gran precisión algunos acontecimientos importantes que jalonan la historia del Hombre. Otros métodos como la espectrometría gamma no destructiva o la resonancia paramagnética electrónica (RPE) permiten datar casos que no podía datarse antes. Después de una breve presentación de los principales métodos de datación, se expondrán algunos ejemplos ilustrando el impacto de estas nuevas tecnologías sobre la cronología.

Palabras Clave: Prehistoria. Cronología. Métodos de datación. Espectrometría de masa. Laser. Precisión. Exactitud.

INTRODUCTION

Depuis une dizaine d'années, la géochronologie est devenue une discipline à part entière dans l'étude du Quaternaire. Les méthodes de datation fondées sur la radioactivité naturelle sont utilisées à l'élaboration d'un cadre chronostratigraphique qui apporte des points de repère très importants dans la compréhension de l'histoire de l'évolution de l'homme. Les données géochronologiques sont intégrées et comparées à celles des autres disciplines, et leur utilisation est de plus en plus fréquente et systématique.

D'un point de vue historique, le point de départ se situe il y a un peu plus d'un siècle avec la découverte des rayons X par Roentgen et avec la mise en évidence expérimentale du rayonnement de l'uranium par Becquerel. Ces deux découvertes sont à la base de l'établissement des caractéristiques physiques et chimiques de l'activité et des modes de désintégration d'un bon nombre d'isotopes radioactifs naturels utilisés pour la datation des roches notamment. Par la suite, le développement des technologies nucléaires a rendu fiable la mesure de la radioactivité. C'est ainsi que l'âge de la Terre a été déter-

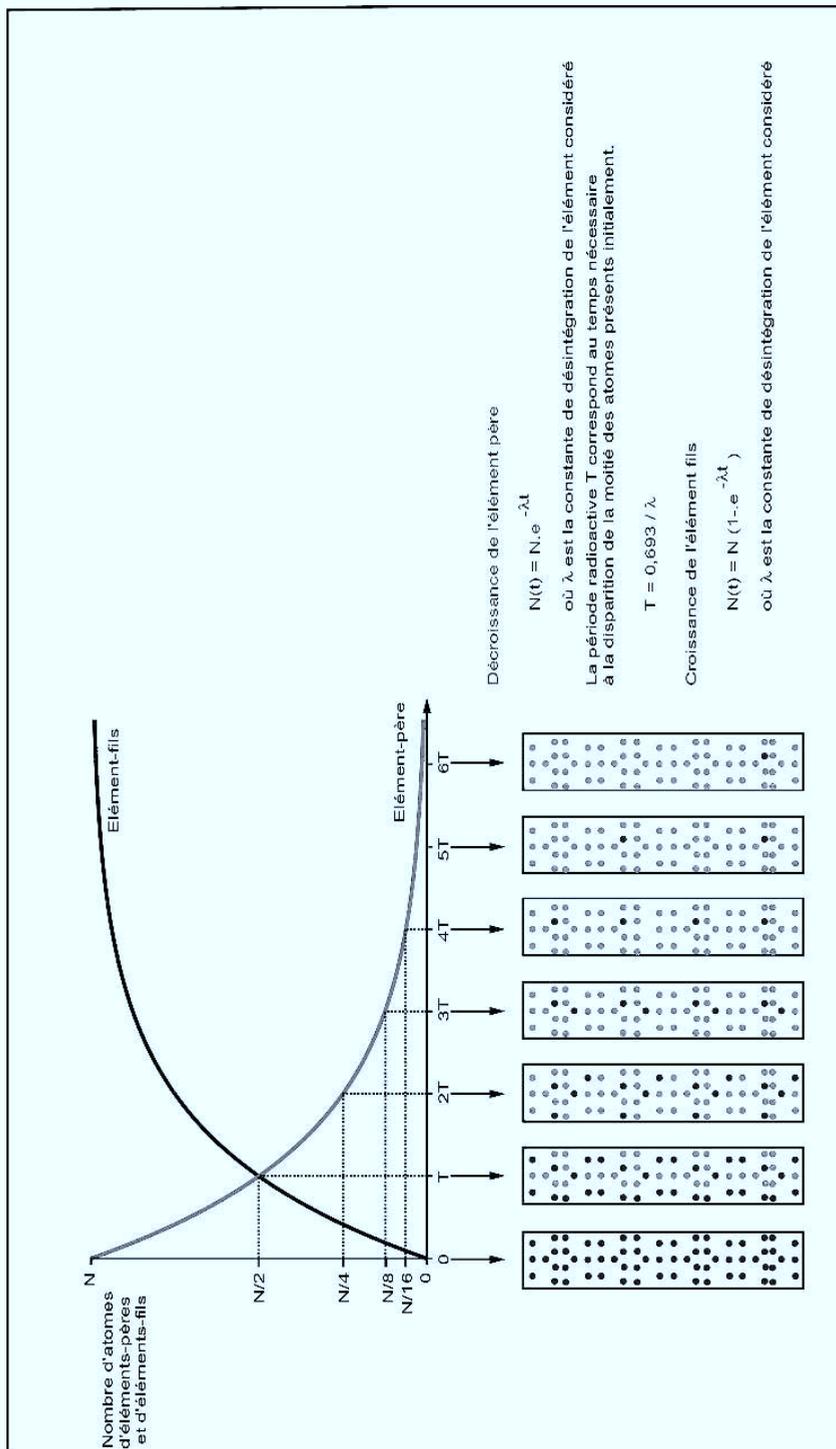


Figure 1: Phénomène de décroissance radioactive exponentielle

miné avec une bonne précision, entre 4.49 et 4.55 milliards d'années. Certains isotopes radioactifs ont des périodes de l'ordre du millier, de la dizaine de milliers, ou de la centaine de milliers d'années et sont utilisés pour dater des événements beaucoup plus récents qui ont jalonné la période du Quaternaire. Ainsi plusieurs méthodes radiochronologiques qui se caractérisent par un domaine d'application spécifique sont utilisées afin d'établir un cadre chronologique de l'évolution de l'Homme. Deux familles peuvent être distinguées. La première regroupe les méthodes qui utilisent la courbe de décroissance de radioactivité pour mesurer le temps. C'est le cas du radiocarbone, des séries de l'uranium et des méthodes à l'argon.

Le deuxième groupe comprend les méthodes qui utilisent l'accumulation de défauts et traces dus aux effets de radiations naturelles. Ce sont les méthodes fondées sur la luminescence, la résonance paramagnétique électronique et les traces de fission.

Ce travail s'efforce de faire un bilan des innovations, tant dans le domaine des techniques que dans celui des méthodologies, utilisées par les méthodes de datation fondées sur la radioactivité naturelle en préhistoire. Quelques exemples présentés donnent un aperçu de l'apport de ces méthodes pour la période du Quaternaire.

LES MÉTHODES

1. Méthodes fondées sur les déséquilibres radioactifs

Elles reposent sur le principe selon lequel les éléments radioactifs se désintègrent en fonction de leur période qui est caractéristique de chaque élément, $T_{1/2}$, telle que

$$N = N_0 e^{-\lambda t} \quad (2)$$

où N_0 et N sont respectivement le nombre d'atomes radioactifs présents au temps $t = 0$ (temps initial) et au temps t (actuel) et où λ est une constante de désintégration : $\lambda = 0.693 / T_{1/2}$

La quantité de radioactivité devient extrêmement petite au bout de plusieurs périodes du radioélément. Cette décroissance radioactive est exponentielle (Figure 1).

Parmi ces méthodes, la plus ancienne et la plus célèbre est la **méthode du radiocarbone**. Elle est proposée par Libby en 1946 lorsque ce dernier démontre que le ^{14}C existe dans la nature en très faible quantité. Cet isotope radioactif est produit par la réaction nucléaire entre l'azote (^{14}C) et les neutrons des rayonnements cosmiques qui pénètrent dans la haute atmosphère.

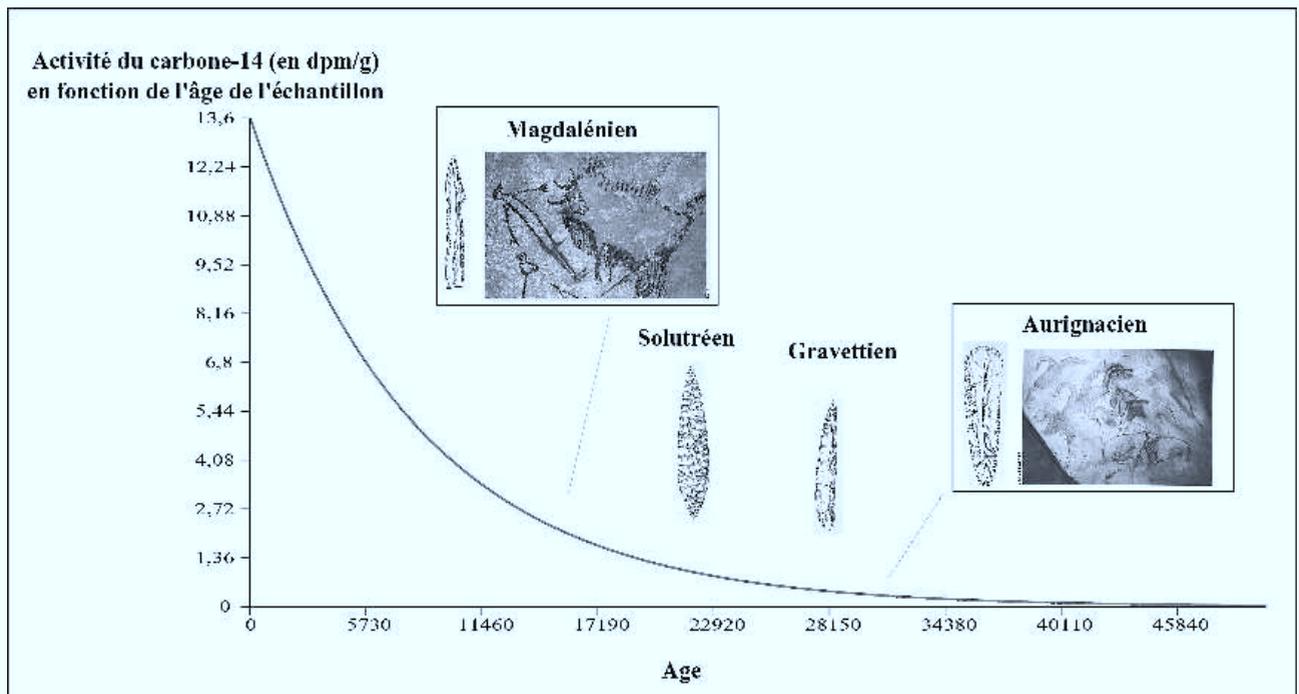
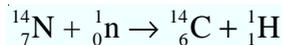


Figure 2: Courbe de décroissance du ^{14}C en fonction de sa période (5.730 ans)

Le ^{14}C ainsi formé va s'oxyder, comme le carbone non radioactif, au contact de l'ozone atmosphérique et donner le ^{14}C du gaz carbonique (CO_2). Les végétaux et les animaux assimilent directement ou indirectement le gaz carbonique de l'at-

mosphère qui contient du ^{14}C en infime quantité. Ce n'est qu'à la mort de l'organisme que ces échanges vont cesser. Le ^{14}C qui a été absorbé tout au long de la vie, va commencer à décroître avec une demi-vie (ou période) de 5.568 ans en

émettant un rayonnement bêta (électron). Le comptage de ces rayonnements est utilisé pour déterminer l'âge de l'échantillon. La figure 2 indique qu'il est possible de dater des échantillons dont l'âge s'échelonne de quelques centaines d'années jusqu'à 35.000 ans environ.

LA MÉTHODE DE DATATION À L'ARGON (K-Ar et ³⁹Ar/⁴⁰Ar)

Le potassium radioactif (⁴⁰K) possède une période très longue (1.25 milliard d'années). Il ne représente qu'une infime partie du potassium stable (⁴¹K et ³⁹K). Il se désintègre en ⁴⁰Ca en émettant un rayonnement bêta ou en ⁴⁰Ar en capturant un électron. Dans une roche, l'argon radiogénique (⁴⁰Ar) va se former à partir du ⁴⁰K et s'accumuler de façon linéaire au fur et à mesure que le temps passe. Le dosage de ces deux éléments par spectrométrie de masse permet la détermination de l'âge de la roche à condition que celle-ci ne contienne pas d'argon au moment de sa formation. L'argon radiogénique ne doit pas s'échapper de l'échantillon considéré. Plus une roche est jeune et plus grandes sont les possibilités de contamination et la difficulté de mesure de l'argon radiogénique. Ainsi, des roches plus jeunes que 100 kans sont très difficiles à dater de façon satisfaisante. Des travaux récents ont cependant montré qu'il est possible de dater des formations riches en potassium jusqu'à 10 000 ans avec une excellente précision (Féraud, 2001).

Il faut effectuer une correction pour soustraire l'argon atmosphérique (⁴⁰Ar) qui peut être incorporé par la roche. Cette méthode s'applique à des minéraux riches en potassium tels que les feldspaths, les micas, les amphiboles que l'on trouve essentiellement dans les roches volcaniques (Deino et al., 1998).

LES MÉTHODES FONDÉES SUR LES DÉSÉQUILIBRES DANS LES FAMILLES DE L'URANIUM

Elles représentent un potentiel important pour la datation des sites paléontologiques et préhistoriques. L'une des causes de rupture de l'équilibre radioactif dans les familles de l'uranium est liée aux différences de solubilité de l'uranium et du thorium (le protactinium possède les mêmes caractéristiques géochimiques que le thorium). L'uranium est soluble dans les eaux naturelles à partir desquelles se forment les carbonates marins (coraux) et continentaux (stalagmites, planchers stalagmitiques, travertins...). En revanche, le thorium insoluble n'existe pas initialement dans l'échantillon formé. Celui-ci se forme dans le carbonate par la désintégration de son parent. Il est ainsi possible d'obtenir un âge correspondant à la formation de l'échantillon en utilisant le rapport ²³⁰Th/²³⁴U (Figure 3). La méthode U-Th permet de dater des carbonates et des ossements et dents fossiles dont l'âge est compris entre 10 kans et 350 kans environ (Ivanovich and Harmon, 1992).

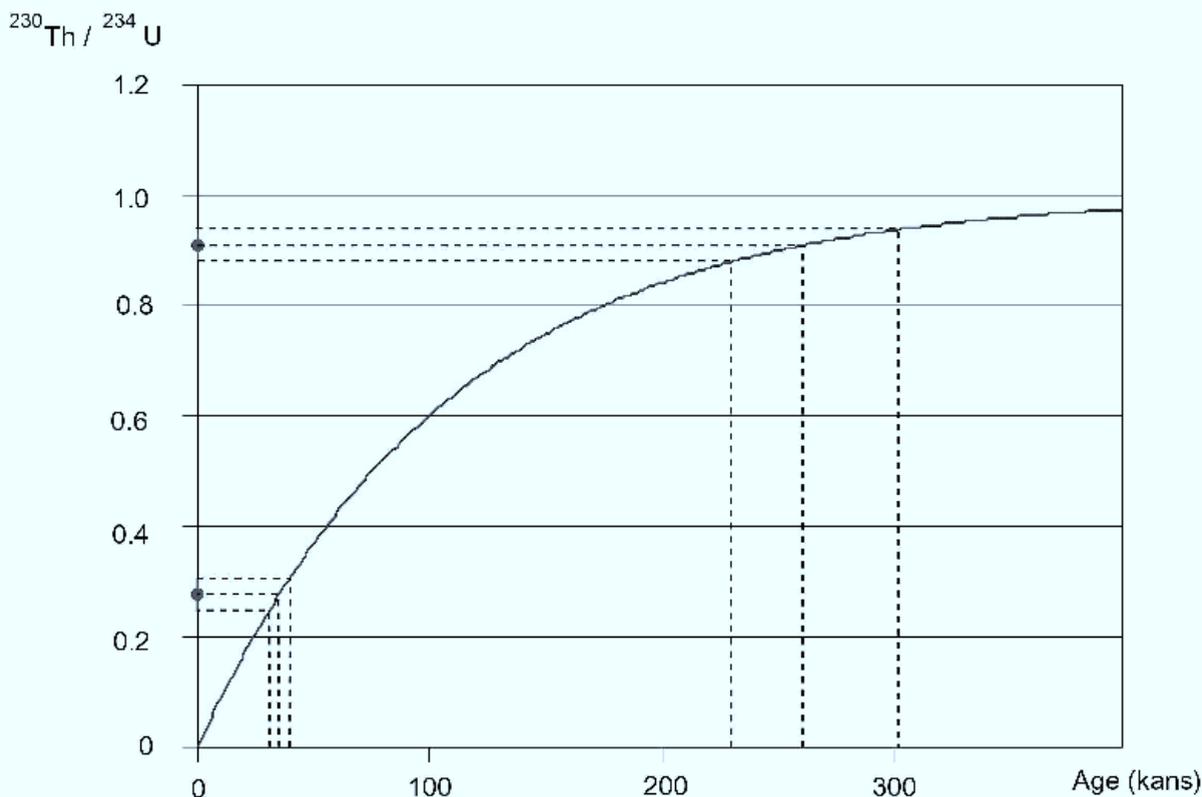


Figure 3: Courbe de croissance du rapport ²³⁰Th/²³⁴U en fonction du temps, le rapport ²³⁴U/²³⁸U étant supposé égal à 1.

2. Les méthodes de datation par effet de radiation sont également très utilisées dans le domaine de la Préhistoire. Dans les sols, la radioactivité naturelle est due essentiellement à l'uranium, au thorium et à leurs descendants et au potassium. Ces éléments radioactifs émettent des rayonnements alpha, bêta et gamma qui produisent des défauts électroniques ou atomiques dans les cristaux. Le principe de datation de ces méthodes est fondé sur l'accumulation de ces défauts et traces dans les solides.

LA MÉTHODE DES TRACES DE FISSION (TF)

Cette méthode est fondée sur le fait que l'uranium se fissionne spontanément en deux noyaux-fils, libère une énergie importante qui entraîne le recul de ces noyaux selon des directions opposées. Il en résulte dans un minéral ou un verre la formation d'un défaut initial appelé trace dont le nombre est proportionnel au temps depuis lequel ces traces sont enregistrées, ainsi qu'à la teneur en uranium. Pour effectuer une datation par TF, il faut que le temps écoulé depuis la formation du minéral soit assez long afin de pouvoir compter un nombre suffisant de traces.

Les principales applications de cette méthode sont géologiques (datation d'effluents volcaniques, mise en évidence d'une phase tectonique), (Wagner, 1996). Dans le domaine de la préhistoire, les traces de fission ont contribué à dater les sites à hominidés d'Afrique de l'Est qui sont très anciens.

Cette méthode est souvent associée dans la littérature à celle du potassium-argon car elle s'applique aux mêmes types d'échantillons. Elles ont en effet été appliquées conjointement sur le tuf KBS et lui ont assigné un âge compris entre 1.8 et 1.9 Ma. Ces datations sont d'autant plus importantes que le tuf KBS, composé de couches volcano-détritiques, constitue un niveau repère remarquable dans la série de Koobi-Fora très riche en restes d'hominidés.

LUMINESCENCE ET RÉSONANCE PARAMAGNÉTIQUE ÉLECTRONIQUE

La thermoluminescence (TL) et la résonance paramagnétique électronique (RPE) reposent sur le même principe qui consiste en une accumulation au cours du temps, d'électrons célibataires piégés dans un minéral. Les éléments radioactifs qui sont présents dans les argiles et les sols émettent un flux faible mais constant de radiations nucléaires dues à la désintégration de l'uranium, du thorium et leurs descendants, et du potassium. Ces radiations représentées par des particules alpha, bêta et des rayonnements gamma et cosmiques passent à travers le minéral et perdent une partie de leur énergie en créant une ionisation. Les électrons qui ne sont pas immédiatement recombinés sont transférés à un état d'énergie plus élevé et piégés dans les défauts et impuretés du réseau cristallin du minéral (Figure 4). Le nombre d'électrons piégés dans un centre donné est proportionnel au temps et à l'intensité de la radiation.

Datation par résonance de spin électronique

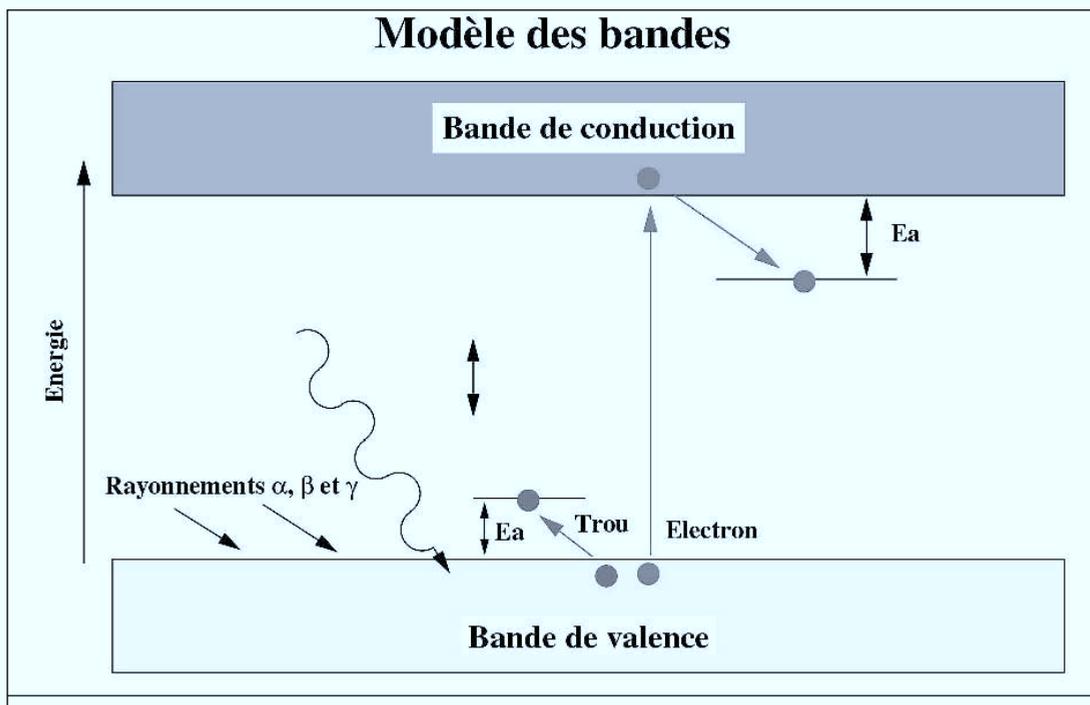


Figure 4: Processus de piégeage des électrons par radiation induite selon le modèle des bandes. E_a correspond à l'énergie d'activation ou à la profondeur du piège.

La TL a plusieurs applications en préhistoire. La principale concerne la datation de silex chauffés qui sont abondants dans les sites du Pléistocène supérieur. La datation par TL de silex chauffés de deux sites du Moyen Orient (Qafzeh et Skhul) a montré que les premiers hommes modernes, “ Proto-Cromagnons ”, étaient présents dans cette région il y a au moins 90.000 ans, montrant ainsi qu’ils ne trouvaient pas leurs origines dans les Néandertaliens (Valladas et al., 1988 ; Mercier et al., 1993). La TL est également utilisée pour dater des poteries et céramiques trouvées dans des sites du Néolithique jusqu’au Moyen-Age. En géologie, plusieurs types de minéraux volcaniques peuvent être datés par TL. C’est le cas des quartz et des feldspaths brûlés dont la datation permet de retracer la chronologie des événements volcaniques. Récemment, une nouvelle technique de luminescence appelée *Luminescence Stimulée Optiquement (OSL)* a été appliquée à la datation de sédiments (Roberts, 1997). Cette méthode diffère de la TL car le signal de datation est stimulé par la lumière au lieu d’une chauffe de l’échantillon.

La RPE est appliquée à plusieurs types de supports qui peuvent fournir un âge sur toute la période du Quaternaire en théorie (Ikeya, 1993). Les premières études ont été réalisées par Ikeya sur une stalactite de calcite provenant de la grotte d’Akiyoshi, Japon (1975). Les planchers stalagmitiques quand ils sont en relation stratigraphique avec le remplissage archéologique d’un site, peuvent fournir des points de repère chronologiques intéressants (Falguères et Bahain, 2001). Les carbonates marins tels que les coraux et les coquilles de mollusques fossiles peuvent faire l’objet d’études par RPE (Bahain et al., 1994). Les échantillons qui contiennent de l’hydroxyapatite (ossements et dents fossiles) peuvent également être datés par RPE. L’émail est un tissu bien minéralisé. Plusieurs tentatives de datation se sont révélées intéressantes sur ce type de support (Falguères et al., 1997; Rink, 1997). Actuellement, quelques laboratoires utilisent une méthode qui consiste à combiner les données obtenues par RPE et U-Th et qui permet de mieux appréhender la façon dont l’uranium est incorporé par ces échantillons (Grün et al., 1988). Enfin, il est possible de dater par RPE des quartz extraits de sédiments chauffés par une émission de lave volcanique (Yokoyama et al., 1986) ou par un foyer aménagé par l’Homme préhistorique (Monnier et al., 1994), et des quartz fluviaux ou littoraux “blanchis” par la lumière solaire (Laurent et al., 1994).

INNOVATIONS ET APPLICATIONS

Deux grandes innovations appliquées au domaine de la géochronologie ont permis d’améliorer considérablement les âges obtenus. Il s’agit de la spectrométrie de masse et du rayonnement laser.

La spectrométrie de masse est une méthode de détection ultra-sensible qui permet la mesure de radionuclides de longue période, avec une gran-

de précision et qui utilise des quantités d’échantillons de l’ordre de quelques milligrammes. La grande différence avec les méthodes qui mesurent des désintégrations radioactives, dites classiques, réside dans le fait que cette technique compte un nombre d’atomes, infiniment grand. Les atomes après être ionisés et accélérés, sont séparés par leur masse. Cette technique est utilisée pour compter le ^{14}C et les atomes de l’uranium (^{234}U , ^{235}U), du thorium (^{230}Th) et du protactinium (^{231}Pa).

Le laser est utilisé principalement par deux méthodes de datation qui sont l’OSL et le rapport Ar/Ar. L’OSL date des dépôts et sédiments par la mesure de pièges très sensibles à la lumière qui sont activés et vidés par l’utilisation de diodes ou de rayonnement laser, alors que la remise à zéro de certains signaux de TL nécessite des heures de blanchiment sans pouvoir complètement vider les pièges. Dans le cas de la méthode Ar/Ar, l’association d’un laser et d’un spectromètre de masse permet l’analyse de minéraux individuels et assure une meilleure fiabilité aux résultats obtenus. Il est possible d’établir une carte de répartition des âges dans un cristal. Par exemple, établir la différence entre un feldspath provenant d’une lave volcanique ayant 500 ans et un feldspath de même nature mais arraché à la roche encaissante granitique beaucoup plus ancienne est désormais rendu possible par cette méthode.

La spectrométrie gamma non destructive, même si elle ne constitue pas une nouveauté en soi, permet de dater directement des restes humains fossiles très précieux et reste à ce titre une méthode unique qui commence à être utilisée par plusieurs laboratoires.

Les méthodes RPE et U-Th combinées sur de l’émail de dents de grands herbivores permettent de dater directement des couches archéologiques contemporaines des périodes d’occupation des hommes préhistoriques. Des âges modélisés qui prennent en compte le facteur d’incorporation de l’uranium par les différents tissus constituant la dent sont ainsi obtenus (Grün et al., 1988).

Du point de vue des applications, deux domaines peuvent être considérés:

1. Le paléoenvironnement

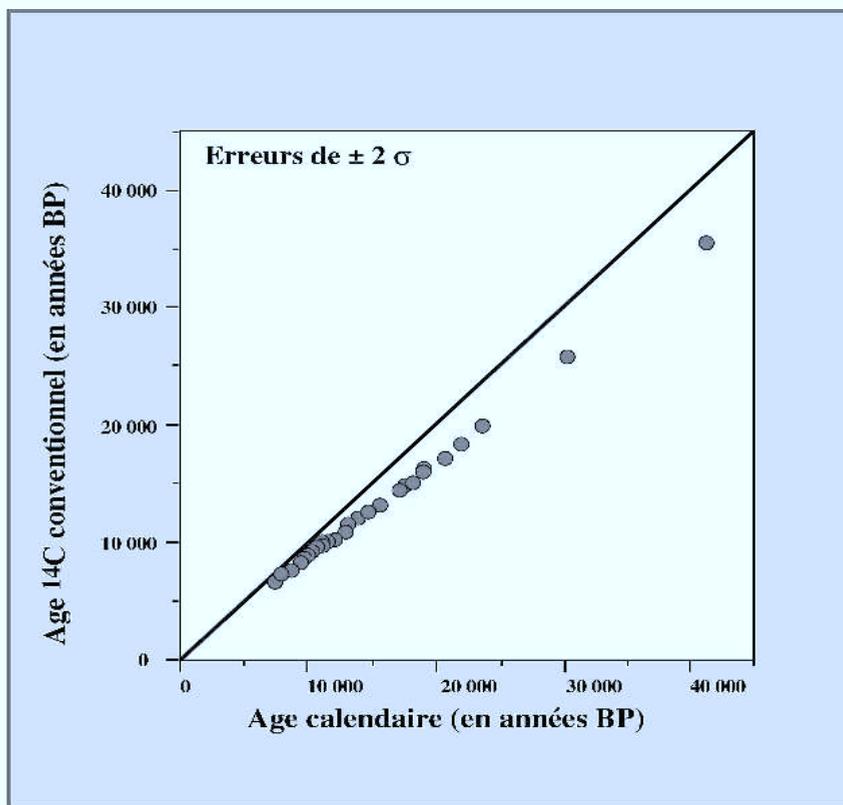
Le comportement géochimique spécifique du carbone et son rôle spécial dans la biosphère confère à ce radioisotope une place de choix dans les études paléoenvironnementales. L’utilisation d’un spectromètre de masse couplé à un accélérateur de particules (AMS) a permis l’élaboration de courbes d’étalonnage en utilisant le carbone (^{14}C) que l’on retrouve dans les archives telles que les cernes d’arbres, les coraux, les varves.

L’étalonnage des âges ^{14}C est effectué en utilisant la dendrochronologie. L’étude des cernes d’ar-

bres donne des âges réels qui sont comparés aux âges ^{14}C obtenus sur les mêmes échantillons. Le plus long enregistrement dendrochronologique couvre 9.940 ans, et une période de 11.400 ans a pu être couverte par le recoupement de plusieurs chronologies (chênes d'Allemagne et pins Britlescone du Nevada) (Kromer and Becker, 1991). Pour des âges compris entre 10.000 et 30.000 ans, une intercomparaison avec la méthode U-Th (TIMS, Thermal Ionization Mass Spectrometry) a été effectuée sur des coraux (Bard et al., 1990). Cette technique permet d'obtenir une grande précision sur les âges, de l'ordre de 1 à 2% d'erreur pour un échantillon de 100 kans. Cette étude a également montré que les âges ^{14}C sont systématiquement plus jeunes que les âges U-Th (Figure 5). De même, les âges ^{14}C (AMS) sont systématiquement

plus jeunes que les données de la dendrochronologie. Cet écart qui atteint presque 3.000 ans lors du dernier maximum glaciaire, a été expliqué récemment par le fait que la production de ^{14}C , contrôlée par le champ magnétique, n'a pas été constante au cours du temps contrairement à ce qui était admis jusqu'à présent. Les causes principales de cette variation sont attribuées à l'activité solaire et à l'intensité du champ magnétique terrestre (Mazaud et al., 1991).

D'autres éléments tels que le ^{10}Be , ^{36}Cl , ^{26}Al et ^{41}Ca ont fait l'objet d'analyses à haute résolution par AMS notamment dans les glaces du Groenland et ont livré de précieuses informations concernant l'activité solaire et les processus de transport atmosphérique (GRIP, 1993).



Dérive des âges ^{14}C par rapport aux âges calendaires

Figure 5: Dérive des âges ^{14}C par rapport aux âges calendaires.

2. La préhistoire

De nombreux cadres chronologiques ont été élaborés par les méthodes de datation citées précédemment.

A) INDONÉSIE

Deux types de résultats radiométriques ont récemment modifié les idées admises jusqu'à présent concernant l'apparition et la disparition des pithécantropes de Java, Indonésie. Les premiers

résultats sont liés à l'âge des premiers hominidés connus à Java. Swisher et al. (1994) ont obtenu des âges $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ de 1.81 ± 0.04 Ma et de 1.66 ± 0.04 Ma pour des formations volcaniques qui seraient associées respectivement aux restes de l'enfant de Modjokerto et aux spécimens de méganthropes S27 et S31 trouvés dans le dôme de Sangiran. Ces âges suggèrent que les premiers hommes de Java seraient contemporains des plus anciens spécimens d'*Homo erectus* de la région de Koobi Fora (Kenya) et qu'ils auraient par conséquent quitté l'Afrique beaucoup plus tôt que ce qui était supposé avant ces datations. Les autres

résultats concernent les formes les plus évoluées d'*Homo erectus* de Java et en particulier les hommes de Ngandong et de Sambungmacan. Des datations par RPE et U-Th de deux dents de bovidés provenant d'un sondage effectué dans le dépôt de la terrasse fluviatile à Ngandong, tout près de la zone fouillée par Oppenoorth dans les années trente et plusieurs dents provenant des collections de muséum ont fait l'objet d'analyses. Des âges compris entre 27.000 et 53.000 ans suggèrent que ces *Homo erectus* ont vécu au moins 200.000 ans après leurs homologues asiatiques et peut être 1 Ma après les africains (Swisher et al., 1996). Ces données ont été confirmées par des datations par spectrométrie gamma non destructive sur les crânes de Ngandong 1, Ngandong 7 et Sambungmacan 1 (Yokoyama et al., sous presse).

B) AFRIQUE

La datation directe par spectrométrie gamma non destructive de restes humains est d'une grande importance car elle permet de s'affranchir d'éventuels problèmes d'ordre stratigraphique. Cette méthode a été appliquée pour la première fois en préhistoire sur le crâne de l'Homme de Tautavel, Arago XXI (Yokoyama et Nguyen, 1981). Récemment, un crâne (KNMER 3884) et un fémur (KNMER 999) humains, provenant de la formation du Guomde au nord-est du lac Turkana, ont été datés par cette méthode non destructive (Brauer et al., 1997). Des analyses comparatives montrent que le fémur a des traits communs avec les premiers hommes modernes de Qafzeh et Skhul, Israël (Trinkaus, 1993). Les résultats obtenus par les rapports U-Th et U-Pa suggèrent que ces restes humains sont plus vieux que 180.000 ans (limite de la méthode U-Pa) et vraisemblablement que le crâne a environ 270.000 ans et le fémur 300.000 ans. Ces datations tendent à prouver que les *Homo sapiens* archaïques les plus récents mais aussi les hommes anatomiquement modernes existaient à une période beaucoup plus ancienne que ce qui était supposé jusqu'à présent.

De même, une dent de l'Homme de Florisbad, Afrique du Sud, a été datée directement par RPE (Grün et al., 1996) ce qui techniquement constitue une nouveauté puisque les mesures ont été effectuées sur un fragment d'émail sans destruction. Un âge de 259.000 ± 35.000 ans a été obtenu et confirme une grande ancienneté d'*Homo sapiens* en Afrique et la nécessité de réviser son cadre chronologique.

C) EUROPE

Le développement de la spectrométrie de masse couplée à un accélérateur (AMS) devait en premier lieu permettre la datation d'échantillons plus anciens que 50 ans en raison des très petites quantités qui peuvent être détectées en théo-

rie. C'est ainsi que d'infimes parties d'échantillons ont pu être analysées et que des supports aussi précieux que les peintures rupestres des grottes d'Altamira en Espagne, Lascaux, Cosquer et Chauvet en France (Valladas et al., 2001a ; 2001b) ont été datées avec une grande précision. Aujourd'hui, la pollution des échantillons par du carbone moderne provenant de l'énorme augmentation du taux de CO₂ depuis 50 ans, est prise en compte dans le calcul des âges.

Les récentes découvertes à Atapuerca, Gran Dolina en Espagne (Bermudez de Castro et al., 1997) et à Campo Grande di Ceprano en Italie (Ascenzi et al., 1996) ont montré que la présence de l'homme en Europe occidentale date d'environ un million d'années. En 1999, l'exhumation de deux crânes humains très anciens sur le site de Dmanissi (Géorgie) suggère que les premiers hommes se sont installés aux portes de l'Europe il y a plus de 1.5 MA (Gabunia et al., 2000). Cependant, la majorité des sites les plus anciens ne sont pas encore bien datés. L'utilisation des méthodes radiométriques telles que la RPE et les séries de l'uranium sont les seules qui peuvent être utilisées sur les sites à hominidés (souvent en grottes) quand ils ne sont pas associés à des événements volcaniques. Elles apportent une contribution importante à l'établissement d'un cadre chronologique pour le Pléistocène moyen (de 800 à 100 ka environ) dans lequel tout le travail interdisciplinaire effectué sur les sites étudiés est inclus. Le site de Gran Dolina a ainsi fait l'objet d'analyses combinées par RPE et U-Th sur des dents de grands herbivores provenant de la couche dans laquelle les restes d'*Homo antecessor* ont été exhumés (TD6). Les résultats obtenus (Figure 6) plus les données paléomagnétiques indiquent un âge compris entre 780.000 et 857.000 ans pour la couche TD6 (Falguères et al., 1999) ce qui place l'apparition de l'homme en Europe occidentale dès la fin du Pléistocène inférieur.

CONCLUSION

Les nouvelles technologies et méthodologies utilisées en géochronologie pour le Quaternaire ont permis de réaliser des progrès dans deux domaines:

- La précision des mesures par la possibilité d'analyser des échantillons 100 à 1000 fois plus petits (en masse) ce qui ouvre des perspectives pour la datation d'objets très précieux ou qui augmente la résolution de façon significative au niveau des prélèvements.

- La nature des échantillons sur lesquels de nombreuses études ont été développées récemment ce qui autorise la datation de supports variés qui permettent de couvrir des périodes qu'il n'était pas possible de dater il y a dix ans.

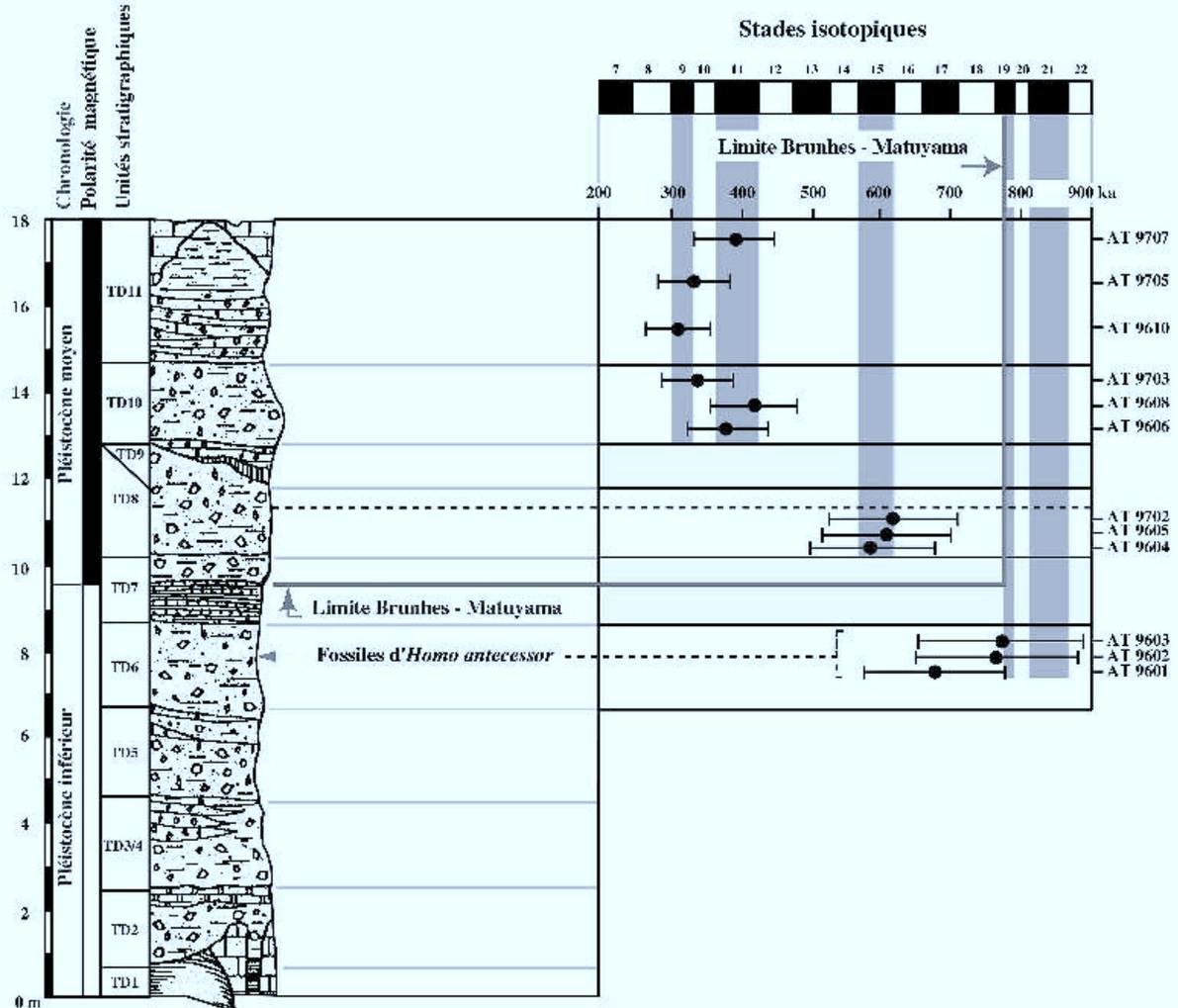


Figure 6: Ages RPE / U-Th combinés avec des erreurs de $\pm 15\%$, obtenus sur dents fossiles de TD6 à TD11 par rapport aux stades isotopiques de l'oxygène. Les régions ombrées correspondent aux couches archéologiquement stériles (TD7 et TD9).

RÉFÉRENCES CITÉES

- ASCENZI A., BIDDITTO I., CASSOLI P.F., SEGRE A.G. & SEGRE-NALDINI E. (1996). A calvarium of late Homo erectus from Ceprano, Italy. *Journal of Human Evolution*, **31**, 409-423.
- BAHAIN J.J., YOKOYAMA Y., FALGUÈRES C., & LAURENT M. (1994). Choix du signal à utiliser lors de la datation par résonance paramagnétique électronique (RPE) de calcites stalagmitiques quaternaires. *C.R.Acad. Sci. Paris*, **318**, 375-379.
- BARD E., HAMELIN B., FAIRBANKS R.G., ZINDLER A., MATHIEU G. & ARNOLD M. (1990). U/Th and ^{14}C ages of corals from Barbados and their use for calibrating the ^{14}C time scale beyond 9.000 years BP. *Nuclear Instruments and methods in Physics Research*, **B52**, 461-468.
- BERMÚDEZ DE CASTRO J.M., ARSUAGA J.L., CARBONELL E., ROSAS A., MARTÍNEZ I. & MOSQUERA M. (1997). A hominid from the Lower Pleistocene of Atapuerca, Spain : possible ancestor to Neandertals and Modern Humans. *Science*, **276**, 1392-1395.
- BRÄUER G., YOKOYAMA Y., FALGUÈRES C. & MBUA E. (1997). Modern human origins backdated. *Nature*, **386**, 337-338.
- DEINO A.L., RENNE P.R. & SWISHER C.C. (1998). $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ dating in Paleoanthropology and archaeology. *Evol. Anthropol.*, **6**, 63-75.
- FALGUÈRES C. & BAHAIN J.J. (2001) La datation par résonance paramagnétique électronique (RPE). *Géopré*, seconde édition, sous presse.
- FALGUÈRES C., BAHAIN J.J., & SALEKI H., (1997). U-series and ESR dating of teeth from Acheulian and Mousterian levels at la Micoque (Dordogne, France). *Journal of Archaeological Science*, **24**, 537-545.
- FALGUÈRES C., BAHAIN J.J., YOKOYAMA Y., ARSUAGA J.L., BERMÚDEZ DE CASTRO J.M., CARBONELL E., BISCHOFF J.L., & DOLO J.M. (1999). Earliest Humans in Europe : the age of Atapuerca fossils, Spain. *Journal of Human Evolution*, **37**, 343-352.
- FÉRAUD G. (2001). Datation des sites archéologiques par la méthode $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$. In : Actes des XXIe Ren-

- contres Internationales d'Archéologie et d'Histoire d'Antibes, Editions APDCA, Antibes, 15-31.
- GABUNIA L., VEKUA A., LORDKIPANIDZE D., SWISHER C.C., FERRING R., JUSTUS, A., NIORADZE M., TVALCHRELIDZE M., ANTON S.C., BOSINSKI G., JÖRIS O., LUMLEY M.A. DE, MAJSURADZE G. & MOUSKHELISHVILI A. (2000). Earliest Pleistocene Hominid cranial remains from Dmanisi, Republic of Georgia : Taxonomy, geological setting, and age. *Science*, **288**, 1019-1025.
- GRIP Members (1993). Climate instability during the last interglacial period recorded in the GRIP ice core. *Nature*, **364**, 203-207.
- GRÜN R., BRINK J.S., SPOONER N.A., TAYLOR L., STRINGER C.B., FRANCISCUS R.G. & MURRAY A.S. (1996). Direct dating of Florisbad Hominid. *Nature*, **382**, 500-501.
- GRÜN R., SCHWARCZ H.P. & CHADAM J.M. (1988). ESR dating of tooth enamel. Coupled correction for U-uptake and U-series disequilibrium. *Nuclear Tracks*, **14**, 237-241.
- IKEYA M., 1975. Dating a stalactite by electron paramagnetic resonance. *Nature*, **255**, 48-50.
- IKEYA M., 1993. *New applications of Electron Spin Resonance: Dating, dosimetry and microscopy*. World Scientific, Singapore.
- IVANOVICH M. & HARMON R.S. (1992). *Uranium-series Disequilibrium: Applications to Earth, Marine and Environmental Sciences*. 2nd Edition. Oxford, Clarendon Press.
- KROMER B. & BECKER B. (1992). Tree-ring ¹⁴C calibration at 10.000 BP. In : The last deglaciation : absolute and radiocarbon chronologies. Edité par E. Bard et W. Broecker. *NATO ASI series*, 3-13.
- LAURENT M., FALGUÈRES C., BAHAIN J.J., & YOKOYAMA Y. (1994). Géochronologie du système de terrasses fluviales quaternaires du bassin de la Somme par datation RPE sur quartz, déséquilibres des familles de l'uranium et magnétostratigraphie. *C.R.Acad. Sci. Paris*, **318**, 521-526.
- LIBBY W.F. (1946). Atmospheric helium three and radiocarbon from cosmic radiation. *Physical Review*, **69**, 671-672.
- MAZAUD A., LAJ, C., BARD E., ARNOLD M. & TRIC E. (1991). Geomagnetic field control of ¹⁴C production over the last 80 ky: implication for the radiocarbon time-scale. *Geoph. Res. Letter.*, **18**, 1885-1888.
- MERCIER N., VALLADAS H., BAR-YOSEF O., VANDERMEERSCH B., STRINGER C. & JORON J.L. (1993). Thermoluminescence date for the Mousterian burial site of Es-Skhul, Mt Carmel. *Journal of archaeological Science*, **20**, 169-174.
- MONNIER J.L, HALLEGOUET B., HINGUANT S., LAURENT M., AUGUSTE P, BAHAIN J.J., FALGUÈRES C., GEBHARDT A., MARGUERIE D., MOLINES N., MORZADÉC H., & YOKOYAMA Y. (1994). A new regional group of the Lower palaeolithic in Brittany (France), recently dated by electron spin resonance. *C.R.Acad. Sci. Paris*, **319**, 155-160.
- ROBERTS R.G. (1997). Luminescence dating in archaeology from origins to optical. *Radiation Measurements*, **27**, n°5-6, 819-892.
- SWISHER C.C., CURTIS G.H., JACOB T., GETTY A.G., SUPRIJO A. & WIDIASMORO (1994). Age of the earliest known hominids in Java, Indonesia. *Science*, **263**, 1118-1121.
- SWISHER C.C., RINK W.J., ANTON S.C., SCHWARCZ H.P., CURTIS G.H., SUPRIJO A., & WIDIASMORO (1996). Latest *Homo erectus* of Java : Potential contemporaneity with *Homo sapiens* in Southeast Asia. *Science*, **274**, 1870-1874.
- TRINKAUS E. (1993). A note on the KNM-ER 999 hominid femur. *Journal of Human Evolution*, **24**, 493-504.
- VALLADAS H., CLOTTES J., GENESTE J.M., ARNOLD M., CACHIER H. & TISNERAT N. (2001a). Evolution of prehistoric cave art. *Nature*, **413**, 479.
- VALLADAS H., REYSS J.L., JORON J.L., VALLADAS G., BAR-YOSEF O., & VANDERMEERSCH B. (1987). Thermoluminescence dating of Mousterian 'Proto-Cro-Magnon' remains from Israel and the origin of modern man. *Nature*, **331**, 614-616.
- VALLADAS H., TISNERAT N., CACHIER H., ARNOLD M. ET AL. (2001b). Direct dating of prehistoric paintings by AMS. *Radiocarbon*, **43**, sous presse.
- WAGNER G.A. (1996). Fission-Track dating in Paleoanthropology. *Evol. Anthropol.*, **5**, 166-171.
- YOKOYAMA Y., FALGUÈRES C. & QUAEGBEUR J.P. (1986). ESR dating of sediment baked by lavafloes: comparison of palaeodoses for Al and Ti centers. In: *ESR dating and dosimetry*, Ionics, Tokyo, 197-204.
- YOKOYAMA Y. & NGUYEN H.V. (1981). Datation directe de l'Homme de Tautavel par la spectrométrie gamma non destructive du crâne humain fossile Arago XXI. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences Paris*, **292**, 741-744.
- YOKOYAMA Y., SÉMAH F., FALGUÈRES C. & JACOB T. Latest *Homo erectus* of Java : direct dating of Solo and Sungmakan hominid skulls and their possible contemporaneity with *Homo sapiens* in Southeast Asia and Australasia. soumis à *Journal of Human Evolution*.