



Quaternaire

Revue de l'Association française pour l'étude du Quaternaire

vol. 26/3 | 2015
Volume 26 Numéro 3

La datation ESR/U-Th de restes paléontologiques, un outil pour estimer le possible remaniement des niveaux archéologiques ?

ESR/U-series dating of fossil teeth: a useful tool to estimate the reworking state of the archaeological layers?

Jean-Jacques Bahain, Christophe Falguères, Qingfeng Shao, Olivier Tombret, Mathieu Duval et Jean-Michel Dolo



Édition électronique

URL : <http://journals.openedition.org/quaternaire/7387>

DOI : 10.4000/quaternaire.7387

ISSN : 1965-0795

Éditeur

Association française pour l'étude du quaternaire

Édition imprimée

Date de publication : 1 septembre 2015

Pagination : 213-225

ISSN : 1142-2904

Référence électronique

Jean-Jacques Bahain, Christophe Falguères, Qingfeng Shao, Olivier Tombret, Mathieu Duval et Jean-Michel Dolo, « La datation ESR/U-Th de restes paléontologiques, un outil pour estimer le possible remaniement des niveaux archéologiques ? », *Quaternaire* [En ligne], vol. 26/3 | 2015, mis en ligne le 01 septembre 2017, consulté le 30 avril 2019. URL : <http://journals.openedition.org/quaternaire/7387> ; DOI : 10.4000/quaternaire.7387

LA DATATION ESR/U-TH DE RESTES PALÉONTOLOGIQUES, UN OUTIL POUR ESTIMER LE POSSIBLE REMANIEMENT DES NIVEAUX ARCHÉOLOGIQUES ?



Jean-Jacques BAHAIN¹, Christophe FALGUÈRES¹, Qingfeng SHAO²,
Olivier TOMBRET¹, Mathieu DUVAL^{3,4} & Jean-Michel DOLO⁵

RÉSUMÉ

La datation par ESR/U-Th de restes paléontologiques est une méthode paléodosimétrique couramment utilisée pour dater des niveaux archéologiques du Pléistocène moyen et supérieur. Au-delà de l'apport purement géochronologique (c'est souvent l'une des rares méthodes utilisables sur des gisements hors contextes volcanique ou karstique) et malgré des incertitudes parfois importantes sur les âges obtenus (10-15 %, en raison du grand nombre de variables – plus de 25 – pouvant entrer dans le calcul d'un âge), la méthode peut généralement permettre, en appui des données stratigraphiques et paléoenvironnementales disponibles, d'attribuer les niveaux archéologiques étudiés à un stade isotopique marin (MIS) donné, voire à un sous-stade, si la dosimétrie environnementale de l'échantillon est raisonnablement bien décrite. Cependant, pour certains gisements, les résultats obtenus montrent une disparité d'âge qui dépasse largement les variations locales de dosimétrie observées dans la couche étudiée. Ceci pourrait alors indiquer un mélange de stocks paléontologiques d'âges différents ou que des dents, à l'histoire dosimétrique différente de celles correspondant réellement à l'occupation humaine que l'on cherche à dater, pourraient être présentes dans les niveaux correspondants.

Mots-clés: datation par résonance de spin électronique/uranium-thorium (ESR/U-Th), formations fluviales, email dentaire, cinétiques d'incorporation de l'uranium, reconstruction paléodosimétrique

ABSTRACT

ESR/U-SERIES DATING OF FOSSIL TEETH: A USEFUL TOOL TO ESTIMATE THE REWORKING STATE OF THE ARCHAEOLOGICAL LAYERS?

ESR/U-series dating of fossil teeth is a palaeodosimetric method commonly used for Middle and Late Pleistocene archaeological levels. Beyond the geochronological interest (it is often one of the few methods applicable on sites located in non-volcanic or carbonated areas) and despite the relatively important age uncertainties (usually 10-15 %, because of the high number of parameters – over 25 – considered in the age calculation process), ESR/U-series method can allow, in combination with the available stratigraphic and palaeoenvironmental data, the correlation of the studied archaeological levels to a specific marine isotopic (MIS), if the evolution of the dose rate with time since the sample burial is reasonably well described. However, for some sites the results display great age scatter ages that could simply not be explained by local variations of the dose rate for the studied level. It could indicate instead that the palaeontological record is made by several stocks of different ages or dosimetric histories mixed in the same archaeological level.

Keywords: ESR/U-series dating method, fluvial formations, dental enamel, U-uptake kinetics, palaeodosimetric reconstruction

1 - INTRODUCTION

Depuis sa première application en 1988 (Grün *et al.*, 1988), la méthode de datation combinant résonance de spin électronique et uranium-thorium (ESR/U-Th) a couramment été appliquée à des restes paléontologiques pour fournir des points de repère géochronologiques sur des niveaux archéologiques du Pléistocène moyen et

supérieur. Cette méthode est cependant assez complexe à mettre en œuvre et nécessite l'acquisition d'une vingtaine de données physico-chimiques pour chaque échantillon daté. L'âge obtenu est en conséquence généralement accompagné d'une incertitude de l'ordre de 10 à 15 %, c'est-à-dire relativement importante par rapport à celles associées aux âges obtenus par des méthodes radiométriques dérivant de mesures radio-isotopiques

¹ Département de Préhistoire du Muséum National d'Histoire Naturelle, UMR 7194 CNRS, 1, rue René Panhard, FR-75013 PARIS.

Courriels: bahain@mnhn.fr, falguere@mnhn.fr, otombret@mnhn.fr

² College of Geography Science, Nanjing Normal University, NANJING CN-210023. *Courriel:* qingfengshao@hotmail.com

³ Department of Geochronology, Centro Nacional de Investigación sobre la Evolución Humana (CENIEH), Paseo de Atapuerca, 3, ES-09002-BURGOS. *Courriel:* mathieu.duval@cenieh.es

⁴ Research School of Earth Sciences, The Australian National University, Mills Rd. Building 142, CANBERRA ACT AU-2601.

⁵ CEA, PBM, FR-91401 ORSAY cedex. *Courriel:* jean-michel.dolo@cea.fr

par spectrométrie de masse. Toutefois, c'est souvent l'une des rares méthodes de géochronologie utilisables sur des gisements pléistocènes situés hors contextes volcaniques ou karstiques. Elle permet en effet généralement, en appui des données stratigraphiques et paléo-environnementales disponibles, de corréliser les niveaux archéologiques étudiés à un stade isotopique marin (MIS) donné, en particulier lors de l'étude de niveaux géologiques homogènes d'un point de vue dosimétrique, comme par exemple les dépôts fluviaux sableux ou limoneux.

L'un des grands intérêts de la méthode ESR/U-Th est de permettre la détermination pour chaque tissu paléontologique d'un paramètre calculé à partir des données analytiques obtenues par ESR et U-Th et décrivant la cinétique de l'incorporation de l'uranium dans le tissu considéré. Cette démarche novatrice remplaçait alors celle utilisée auparavant en datation ESR qui consistait à postuler une cinétique d'incorporation particulière pour un échantillon donné : incorporation précoce (*Early Uptake model*, EU; Bischoff & Rosenbauer, 1981), linéaire (*Linear Uptake model*, LU; Ikeya, 1982), ou récente (*Recent Uptake model*, RU; Blackwell *et al.*, 1992). Ces cinétiques simples présentaient les désavantages de considérer une cinétique d'incorporation identique dans tous les tissus d'une même dent et de ne pas prendre en compte les éventuels déséquilibres isotopiques présents dans la série de l'uranium-238.

Après avoir décrit la méthode de datation ESR/U-Th, quelques exemples de résultats obtenus sur des gisements du Pléistocène moyen en contexte fluvial seront présentés. Pour certains des gisements évoqués, les résultats obtenus montrent une disparité d'âge qui ne semble pouvoir s'expliquer par les variations spatiales de dosimétrie observées dans la couche étudiée et quelques propositions d'explication seront avancées.

2 - LA DATATION ESR/U-TH, UNE MÉTHODE PALÉODOSIMÉTRIQUE COMPLEXE À METTRE EN ŒUVRE

La méthode de datation ESR/U-Th, comme les autres méthodes paléodosimétriques, utilise l'échantillon comme un dosimètre naturel ayant enregistré la dose totale de radiations qu'il a reçues au cours de son histoire géologique. Cette dose D_E , souvent appelée paléodose (en grays, Gy), peut être exprimée par la formule suivante:

$$D_E = \int_0^T d_a(t).dt \quad (1)$$

où T est l'âge de l'échantillon et $d_a(t)$, la dose de radiations reçues par l'échantillon en un an, également appelée dose annuelle (en $\mu\text{Gy}/\text{an}$).

L'incorporation post-mortem d'uranium dans les tissus paléontologiques fait que cette dose annuelle varie au cours du temps. Dans le cas de la datation d'email dentaire, elle peut s'exprimer en tenant compte de l'emplacement des radionucléides émettant les rayonne-

ments dans l'échantillon (email, mais aussi autres tissus dentaires) et dans son environnement :

$$d_a(t) = d_{\text{int}}(t) + d_{\text{ext1}}(t) + d_{\text{ext2}}(t) \quad (2)$$

où $d_{\text{int}}(t)$ correspond à la dose générée par les radionucléides présents dans l'email lui-même, $d_{\text{ext1}}(t)$ à celle produite par les radionucléides présents dans les autres tissus dentaires (dentine et cément) et osseux situés à proximité de l'email et $d_{\text{ext2}}(t)$ à la dose générée par les sédiments environnants et liée au contexte géologique et géographique de découverte. Les deux premières contributions dépendent donc des cinétiques d'incorporation de l'uranium dans les tissus paléontologiques lors de la fossilisation et leur détermination nécessite une analyse U-Th de chaque tissu. Pour les niveaux très riches en restes paléontologiques, la troisième contribution peut également être en partie régie par les cinétiques d'incorporation dans les ossements situés à proximité de l'échantillon analysé (voir le cas d'Isernia la Pineta, Shao *et al.*, 2011), mais ceci reste exceptionnel.

2.1 - PRÉPARATION DES ÉCHANTILLONS

Les dents fossiles présentées dans ce travail ont été analysées par ESR/U-Th selon le protocole expérimental décrit dans Bahain *et al.* (2002). Au laboratoire, les tissus dentaires ont tout d'abord été séparés mécaniquement, puis les lamelles d'email ont été nettoyées au moyen d'une fraise de dentiste afin d'éliminer toute contamination par de la dentine, du cément ou du sédiment. Ce nettoyage, effectué sur une épaisseur minimale de quelques dizaines de μm , permet d'éliminer la contribution des particules α « externes » à l'email, c'est-à-dire issues des autres tissus dentaires et du sédiment, mais seulement une partie de celle des particules β . Il faut donc en tenir compte dans la détermination des contributions β tant interne, c'est-à-dire liée aux radioéléments présents dans l'email, qu'externe, issue des radioéléments de la dentine, du cément et/ou du sédiment. Pour cela il convient de mesurer l'épaisseur initiale de la lamelle d'email, ainsi que les épaisseurs enlevées sur les faces externes et internes, afin de déterminer le plus précisément possible les doses réellement reçues par la portion d'email finalement utilisée pour la mesure ESR.

2.2 - DÉTERMINATION DE LA PALÉODOSE

L'email a ensuite été broyé mécaniquement, puis tamisé. La fraction 100-200 μm récupérée lors de ce tamisage a été séparée en dix aliquotes. Neuf de celles-ci ont été irradiées, c'est-à-dire artificiellement « vieilles », à des doses croissantes connues, au Laboratoire National Henri Becquerel du CEA (CEN Saclay) à l'aide d'une source gamma au ^{60}Co . Les intensités ESR de chaque aliquote irradiée et de l'aliquote naturelle témoin permettent d'établir la courbe de croissance en fonction des doses artificielles ajoutées (méthode de l'addition). L'extrapolation de la courbe ainsi obtenue à une intensité ESR nulle ($I=0$) fournit la valeur de la paléodose (fig. 1).

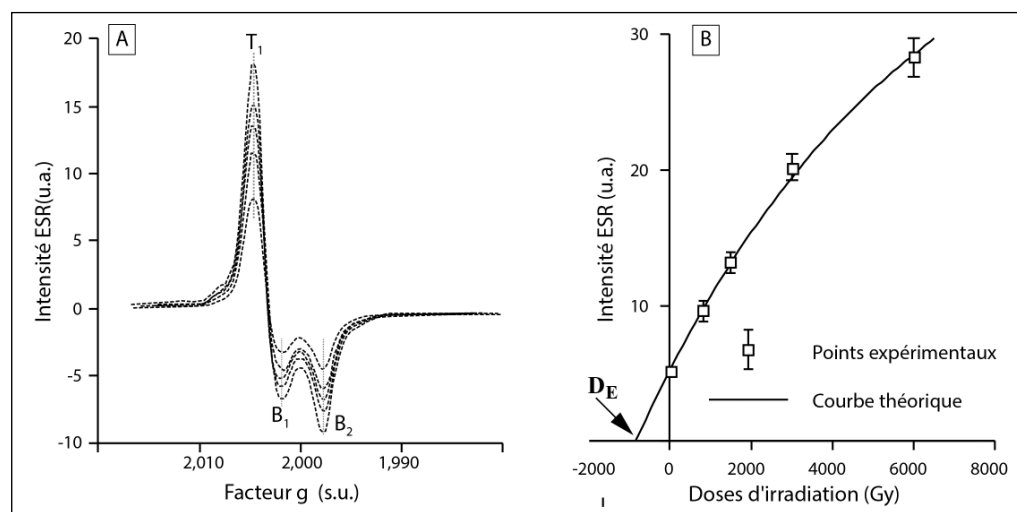


Fig. 1 : Évolution de l'intensité du signal ESR d'un échantillon d'émail dentaire en fonction de doses d'irradiation ajoutées croissantes (A) et courbe de croissance intensité ESR/dose ajoutée pour extrapolation de la paléodose D_E (B).

Fig. 1: Evolution of the ESR signal intensities of fossil tooth enamel with increasing irradiation doses (A) and fitting of the analytical growth curve to extrapolate the palaeodose D_E (B).

Comme l'irradiation utilisée lors du vieillissement artificiel de l'échantillon diffère d'une irradiation naturelle, qui implique différents types de rayonnements, le terme de dose équivalente (D_E) est souvent utilisé pour qualifier la valeur de dose extrapolée.

Dans ce travail, les mesures ESR ont été réalisées à température ambiante sur un spectromètre Bruker EMX en utilisant les conditions suivantes : puissance de micro-onde de 1 mW, amplitude de modulation de 0,1 mT, fenêtre de mesure de 10 mT, fréquence de modulation de 100 kHz, temps de conversion de 20 ms et constante de temps de 5 ms. Les intensités ESR correspondant à la différence entre les pics T1 et B2 (fig. 1), en accord avec Grün (2000), ont été mesurées au moins trois fois pour chaque dose sur différents jours.

Les doses équivalentes ont été déterminées à partir des points expérimentaux ainsi obtenus avec le logiciel Microcal OriginPro 8.5 par la méthode des moindres carrés en utilisant une pondération par l'inverse de l'intensité ESR au carré ($1/I^2$) (Grün & Brumby, 1994), le plus souvent au moyen d'une fonction de saturation exponentielle simple (Yokoyama *et al.*, 1985) ou, pour les valeurs supérieures à 1 000 Gy, par une fonction correspondant à la somme de deux fonctions exponentielles décrivant mieux les données expérimentales (Duval *et al.*, 2009).

2.3 - DÉTERMINATION DE LA DOSE ANNUELLE

Les activités des différents radionucléides présents dans les différents tissus dentaires (essentiellement ^{238}U , ^{234}U , ^{230}Th , ^{226}Ra et ^{222}Rn) ont été ensuite mesurées par spectrométrie gamma à haute résolution, puis ces tissus ont été analysés par spectrométrie alpha, ce qui permet d'obtenir les rapports $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ et $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$. Les analyses U-Th par spectrométrie alpha ont été effectuées au MNHN, en suivant le protocole analytique décrit par Bischoff *et al.* (1988). La double analyse a et g permet également d'estimer, en croisant les données, les éven-

tuelles fuites de radium et radon, éléments très mobiles dont les descendants sont d'importants émetteurs a, b et g (Bahain *et al.*, 1992).

Les activités des différents radionucléides contenus dans le sédiment entourant les dents ont également été mesurées par spectrométrie g à haute résolution, de façon à calculer leur contribution aux doses b et g reçues par ces dernières. De plus, lorsque cela était possible, des mesures de dosimétrie gamma ont été réalisées *in situ* par spectrométrie gamma portable (Mercier & Falguères, 2007) ou au moyen de dosimètres TL (Valladas, 1982) pour tenir compte de l'hétérogénéité de la séquence stratigraphique du site étudié. L'estimation de la dose cosmique générée par les rayonnements cosmiques reçue par les échantillons, qui dépend de la profondeur d'enfouissement de l'échantillon et de la position géographique du gisement considéré (Prescott & Hutton, 1994), a été faite à partir de la profondeur actuelle du niveau archéologique au sein de la formation considérée en tenant compte, si besoin, d'une évolution de la profondeur d'enfouissement de ce dernier.

Un certain nombre de paramètres indispensables doivent également être estimés pour faire les calculs : la teneur en eau des sédiments a été déterminée après séchage en étuve pendant une semaine à 40 °C ; les teneurs en eau des tissus dentaires ont été fixées à $3 \pm 1\%$ pour l'émail et $7 \pm 5\%$ pour la dentine et le ciment ; l'efficacité alpha (tenant compte de la moins grande efficacité des rayons α à créer le signal ESR) est de $0,13 \pm 0,02$ pour l'émail dentaire (Grün & Katzenberger-Apel, 1994) ; les facteurs de conversion en débit de dose de Adamiec et Aitken (1998) ont été utilisés ; l'atténuation des particules β dans les lamelles d'émail a été calculée à partir des simulations de Monte-Carlo de Brennan *et al.* (1997).

A partir des données acquises à la fois par ESR et U-Th, il devient alors possible de calculer des âges combinés ESR/U-Th ainsi que de déterminer les paramètres d'incorporations d'uranium dans chaque tissu dentaire.

2.4 -COUPLAGE ESR/U-TH ET CALCUL DES PARAMÈTRES D'INCORPORATION ET DE L'ÂGE

Les âges ESR/U-Th sont calculés à partir de la cohérence des données isotopiques obtenues par U-Th (teneur en uranium et rapports isotopiques $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$, $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$, $^{222}\text{Rn}/^{230}\text{Th}$) et des données ESR (D_E , mais aussi $d_{\text{ext}2}$ déterminée à partir de la teneur en radionucléides du sédiment environnant, de la dose de rayonnements gamma reçue par ce dernier et de la dose cosmique). Pour calculer l'âge d'un échantillon donné, les différentes données acquises lors des analyses ESR et U-Th permettent alors de modéliser soit une incorporation post-mortem d'uranium dans les différents tissus concernés, soit une incorporation puis une perte d'uranium (lessivage) (fig. 2)

Dans le cas d'une incorporation seule, l'âge est déterminé en utilisant l'équation suivante (*Uranium-series model*, US; Grün *et al.*, 1988):

$$U(t) = U_m [t/T]^{(p+1)} \quad (3)$$

où U_t est la teneur en uranium à l'instant t , U_m , la teneur actuelle en uranium, T , l'âge de l'échantillon et p , le paramètre d'incorporation ($p \geq -1$, fig. 2A). Dans ce cas, l'âge ESR/U-Th obtenu est plus grand que les âges U-Th apparents déterminés pour chacun des tissus dentaires de l'échantillon. L'une des limites d'utilisation principales de ce modèle est son impossibilité de modéliser un lessi-

vage d'uranium. Dans ces cas-là il faut avoir recours à d'autres modèles.

Par exemple, dans le cas d'une incorporation puis d'un lessivage, l'incorporation peut être décrite comme un processus accélérant au cours du temps (*Accelerating Uptake model*, AU; Shao *et al.*, 2012) et est définie par deux paramètres: le taux d'incorporation initial, f , et l'accélération de ce taux, a . Pour les calculs, on définit un paramètre supplémentaire, $n = a/f$, qui permet de décrire l'évolution de la teneur en uranium dans le tissu considéré (fig. 2B). Avec ce modèle il est possible de considérer que la quantité d'uranium présente dans les tissus dentaires peut avoir été plus grande dans le passé qu'elle ne l'est aujourd'hui, ce qui permet d'expliquer des rapports $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$ mesurés (et donc des âges U-Th) qui peuvent être plus importants qu'en considérant une incorporation précoce de l'uranium dans l'échantillon.

Le protocole de calcul des âges combinés ESR/U-Th a récemment été décrit par Shao *et al.* (2014) (fig. 3). A partir des données isotopiques mesurées par U-Th, une relation reliant paramètre d'incorporation et temps est tout d'abord déterminée pour chaque tissu dentaire (étape 1 de la fig. 3). Il devient alors possible de simuler l'évolution au cours du temps des contributions des différents tissus dentaires à la dose annuelle (étape 2). En ajoutant la simulation de la dose externe environnementale (étape 3), il devient possible de simuler l'évolution de la dose annuelle totale au cours du temps (étape 4), puis

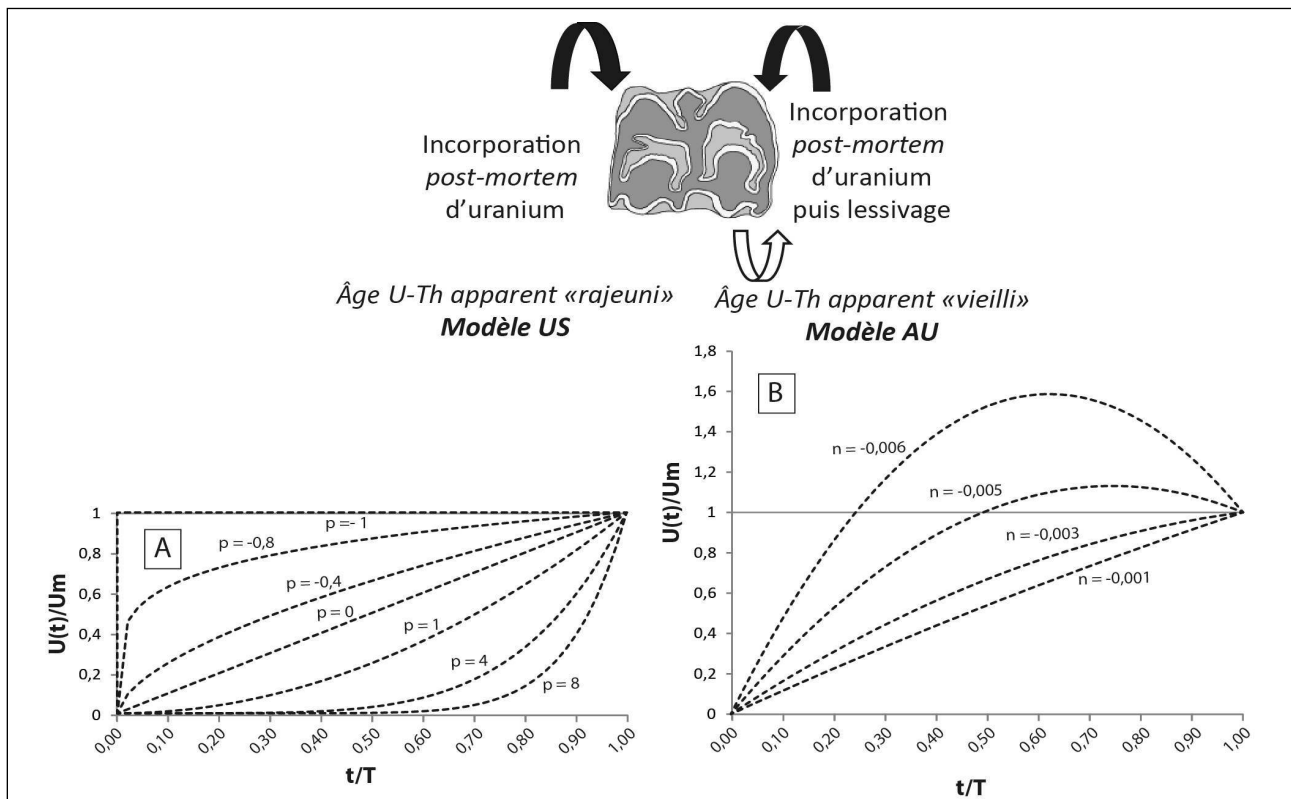


Fig. 2 : Évolution de la teneur relative en uranium dans un tissu paléontologique donné en fonction du temps écoulé par rapport à l'âge pour différents paramètres d'incorporation.

A : paramètre p , incorporation seule; B : paramètre n , incorporation puis lessivage.

Fig. 2: Evolution of U concentration with time for a given palaeontological tissue depending on the value of the U-uptake parameter considered. A: p -parameter, only U-uptake; B: n -parameter, U-uptake followed by leaching.

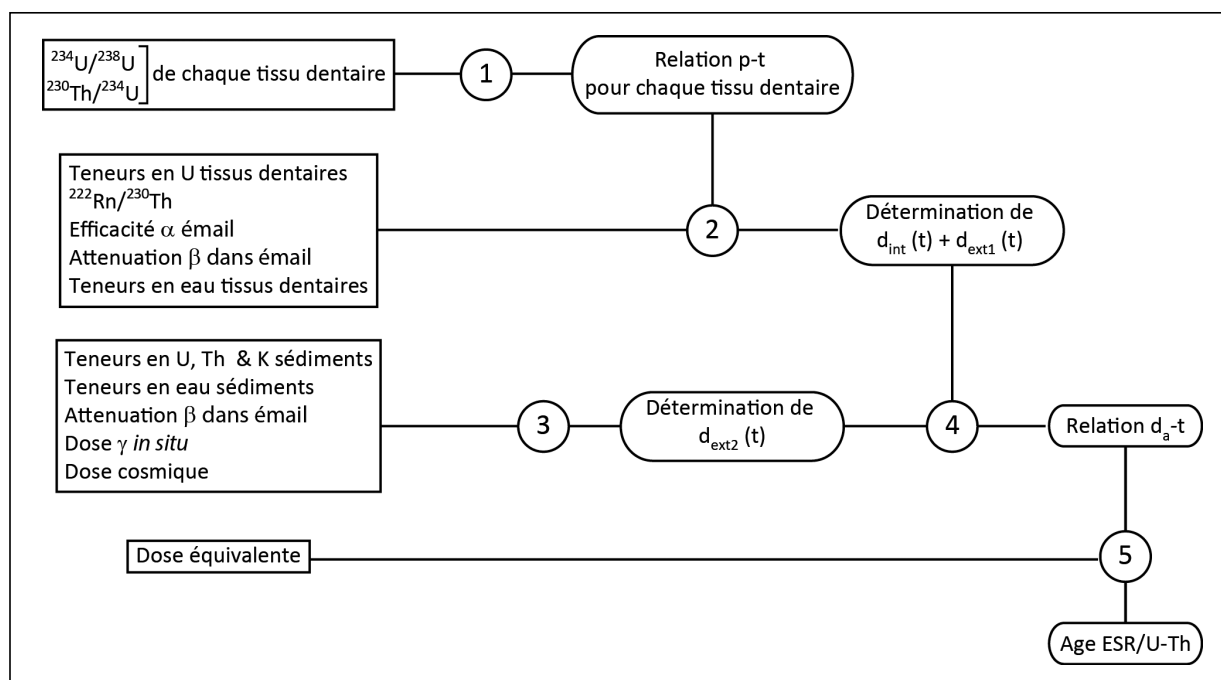


Fig. 3 : Illustration schématique de l'obtention d'un âge couplé ESR/U-Th.

Fig. 3: Schematic illustration of coupled ESR/U-series age calculation.

de calculer l'âge en confrontant la valeur de la paléodose obtenue expérimentalement par ESR à cette simulation (étape 5). A partir de cet âge, les valeurs correspondantes aux paramètres d'incorporation peuvent être calculées pour chaque tissu. Concrètement, dans le cadre de ce travail le modèle US est utilisé par défaut pour toutes les dents, en première approximation, mais lorsqu'un lessivage apparent d'uranium est mis en évidence à partir des données U-Th mesurées, le modèle AU est préféré pour décrire l'évolution de la teneur en uranium – et du débit de dose associé – du tissu correspondant.

Le calcul d'âge impliquant la détermination préalable de plus de 25 variables, les incertitudes associées à l'âge obtenu sont largement dépendantes de la qualité des mesures associées à ces dernières. Elles sont souvent plus importantes que pour les méthodes radiométriques classiques, notamment lorsque la spectrométrie de masse est utilisée, mais la méthode ESR/U-Th offre la possibilité de dater directement des échantillons provenant de niveaux archéologiques ou paléontologiques pléistocènes dans différents types de contexte (fluvial, karstique, littoral...) et de prendre ainsi le relais de méthodes plus conventionnelles lorsque ces dernières ne peuvent être utilisées.

La méthode ESR/U-Th fournit également des éléments d'information sur l'homogénéité des niveaux archéologiques étudiés, lorsque le nombre d'échantillons analysés est suffisant et que le contexte dosimétrique de la formation étudiée ou du niveau archéologique considéré est correctement décrit. Ceci va être illustré ci-dessous à travers quelques exemples des résultats obtenus sur un même niveau archéologique ou sur une même unité géologique dans plusieurs sites du Pléistocène moyen en contexte fluvial, pour lesquels les niveaux sont homogènes d'un point de vue dosimétrique et la dose externe

en conséquence plus facile à contraindre : Tourville-la-Rivière (France), Mauer (Allemagne), Dali (Chine) et Cuesta de la Bajada (Espagne).

3 - SITES ÉTUDIÉS ET ÉCHANTILLONNAGE

3.1 - TOURVILLE-LA-RIVIÈRE

Située sur une terrasse fluviale fossile de la Seine, le site de Tourville-la-Rivière (Seine-Maritime, France) est connu depuis la fin des années 1960. Plusieurs zones de gisement ont été fouillées successivement, livrant une faune abondante de la fin du Pléistocène moyen témoignant d'un climat tempéré continental (Auguste, 2009), une riche industrie du Paléolithique moyen (Cliquet *et al.*, 2010) et, en 2010, trois os d'un bras humain attribués à un membre de la lignée néandertalienne (Favre *et al.*, 2014). La séquence stratigraphique comprend à la base des dépôts fluviaux, estuariens et de versant interprétés comme représentant le bilan sédimentaire de deux cycles climatiques glaciaire/interglaciaire, puis une séquence de couverture fossilisée par un paléosol attribué à l'Eemien (Lautridou, 1985). Les données chronologiques disponibles confirment l'attribution des dépôts fluviaux et estuariens au Saalien, notamment ceux de Balescu *et al.* (1997) qui a obtenu des âges de 196 ± 23 ka et 198 ± 26 ka par IRSL et TL respectivement pour le niveau D2 ayant livré les restes archéologiques. Cet âge saalien a récemment été confirmé par des datations ESR/U-Th sur dents extraites de la fouille de 2010 qui placent ces niveaux entre 183 et 226 ka (Favre *et al.*, 2014). Six dents de cheval extraites lors de la fouille en 2008 du niveau archéologique D2 (Cliquet *et al.*, 2010), ont été analysées dans le présent travail par ESR/U-Th.

3.2 - MAUER

Le site de Mauer, près d'Heidelberg (Allemagne), est l'un des sites majeurs de la Préhistoire européenne depuis la découverte en 1907 de la mandibule holotype d'*Homo heidelbergensis* dans des alluvions fossiles de la Neckar (Schoetensack, 1908). La séquence stratigraphique du gisement comprend deux ensembles fluviaux sableux à riche faune interglaciaire roménienne séparés par un épais niveau argileux stérile (*Lettenbank*) dont la mise en place est supposée contemporaine d'une phase glaciaire. Les dépôts fluviaux sont par ailleurs recouverts par une épaisse séquence loessique comprenant au moins deux paléosols de rang interglaciaire (Wagner *et al.*, 2011). Une étude par radiofluorescence infra-rouge (IR-RF) de grains de quartz provenant des sables fluviaux a également été réalisée dans le même temps (Wagner *et al.*, 2010). Cette dernière méthode permet d'estimer l'âge de la dernière exposition à la lumière des grains de feldspaths potassiques du sédiment avant enfouissement. Les résultats obtenus à Mauer varient de 607 ± 55 ka à 502 ± 27 ka pour les sables inférieurs et de 508 ± 50 ka à 420 ± 33 ka pour les sables supérieurs (Wagner *et al.*, 2010). Cinq dents de l'ensemble sableux inférieur et trois dents de l'ensemble sableux supérieur analysées par ESR/U-Th dans le travail précédent (Wagner *et al.*, 2010) ont été utilisées ici, mais les âges ont été recalculés en tenant compte de la possibilité, au sein d'une même dent, d'observer dans certains tissus une incorporation simple alors que d'autres présentent des lessivages.

3.3 - DALI

Le gisement paléanthropologique de l'« Homme de Dali » est situé à l'extrémité méridionale du plateau loessique dans la province du Shaanxi, en Chine. Un crâne attribué à un *Homo sapiens* archaïque (Stringer, 2002) y fut découvert fortuitement en 1978 dans des dépôts fluviaux de la rivière Luo, affluent de la rivière Wei elle-même tributaire du Fleuve Jaune. La séquence stratigraphique du gisement comprend des dépôts fluviaux graveleux, puis sableux et des dépôts loessiques dans lesquels deux paléosols de rang interglaciaire sont enregistrés, le second étant dédoublé. Ces niveaux ont été corrélés avec les sols S1 et S2 de la séquence du Plateau loessique chinois corrélés respectivement avec les MIS 5e et 7. Sur la base de ces données stratigraphiques et des données paléoenvironnementales disponibles, Xiao *et al.* (2002) ont corrélé le dépôt des graves fluviales situées sous le niveau paléanthropologique avec la transition MIS 9/8, âge confirmé par datation ESR/U-Th de deux dents de rhinocéros et de deux dents de cheval issues de la fouille du niveau paléanthropologique (Yin *et al.*, 2011). Les données obtenues sur ces échantillons sont utilisées dans la présente étude, excepté pour la dent Dali 04, dont la paléodose et l'âge ont été recalculés.

3.4 - CUESTA DE LA BAJADA

Le gisement de la Cuesta de la Bajada, à Teruel (Espagne), a livré une riche industrie lithique du Paléo-

lithique moyen et une faune abondante du Pléistocène moyen dans des dépôts fluviaux fossiles de la rivière Alfambra. Le niveau archéologique CB3 a récemment été datés par ESR (264 ± 42 ka et 350 ± 49 ka, respectivement à partir des centres Ti-H et Ti-Li) et OSL (entre 264 ± 22 ka et 293 ± 24 ka) sur quartz des MIS 9 et 8 alors que la racémisation des acides aminés (RAA) fournit une estimation d'âge plus ancienne (431 ± 44 ka), bien que les données archéologiques et paléontologiques attestent du bon état de conservation du niveau archéologique (Santonja *et al.*, 2014). Quatre dents de cheval provenant de ce même niveau CB3 ont été analysées par ESR/U-Th.

4 - RÉSULTATS

Les résultats obtenus sur les différents gisements sont présentés dans les tableaux 1 et 2 et dans les figures 4 et 5.

4.1 - TOURVILLE-LA-RIVIÈRE

Le modèle US a pu être appliqué à tous les échantillons, contrairement à ce qui a été observé dans l'étude de Faivre *et al.* (2014) concernant des dents issues d'une parcelle située à quelques dizaines de mètres de celle d'où proviennent les dents étudiées ici. Ces dernières présentent des paramètres paléodosimétriques assez similaires. Ainsi, la dispersion observée des paléodoses est faible (de l'ordre de 5 %, tab. 2), les cinétiques d'incorporation sont précoces pour tous les tissus (fig. 4). La dose externe environnementale utilisée pour le calcul des âges correspond à la somme des dose beta et gamma liées aux sédiments, cette dernière correspondant à la moyenne des résultats très homogènes issus de quatre mesures de spectrométrie gamma effectuées *in situ* à quatre emplacements différents de la couche D2 (417 ± 21 μ Gy/a), et de la dose cosmique. Les âges obtenus pour les six dents montrent une variabilité relativement faible, entre 203 ± 13 ka et 249 ± 15 ka. Un âge moyen de 222 ± 22 ka a été établi pour le niveau archéologique D2, permettant de dater la mise en place de ce dernier au sein de la première partie du stade isotopique 7 (fig. 5). Cet âge est légèrement plus ancien que ceux obtenus lors des études précédentes (néanmoins en accord à 1σ), mais semble correspondre mieux à l'enregistrement géologique qui place la fin du MIS 7 au-dessus du niveau G, bien plus haut dans la stratigraphie (Jamet, 2014).

4.2 - MAUER

Les doses équivalentes des cinq dents de l'ensemble sableux inférieur sont relativement dispersées (tab. 2, entre $482,6 \pm 12,2$ Gy et $813,8 \pm 18,5$ Gy, valeur moyenne de 619 ± 54 Gy) mais cette dispersion reste limitée (22 %), compte-tenu à la fois de l'antiquité du gisement et de la variabilité des cinétiques d'incorporation d'uranium mise en évidence (fig. 4). Une incorporation quasi-linéaire a en effet été modélisée pour certains tissus, comme cela avait été mis en évidence dans le passé entraînant la définition du modèle d'incorporation linéaire (Ikeya, 1982),

Site / Couche	Échantillon	Tissu	Paléodoses (Gy)	Paramètre d'incorporation p (US) ou n (AU)	d _{int} (μGy/a)	d _{ext1} (μGy/a)	d _{ext2} (μGy/a)	d _a (μGy/a)	Âge ESR/U-Th (US ou AU) (ka)
Tourville-la-Rivière Couche D2	TVL 157	émail	220.08 ± 2.33	-0.8300 ± 0.0368	139 ± 27	216 ± 41	606 ± 30	961 ± 58	229 ± 13
		dentine		-0.7151 ± 0.0450					
	TVL 160	émail	207.72 ± 2.72	-0.9128 ± 0.0319	100 ± 19	220 ± 43	591 ± 30	911 ± 56	228 ± 14
		dentine		-0.8797 ± 0.0340					
	TVL 219	émail	204.54 ± 2.49	-0.8188 ± 0.0456	142 ± 28	279 ± 55	587 ± 30	1008 ± 61	203 ± 14
		dentine		-0.7257 ± 0.0526					
	TRV 923	émail	204.56 ± 1.09	-0.8849 ± 0.0360	103 ± 21	221 ± 46	610 ± 30	934 ± 59	219 ± 14
		dentine		-0.7814 ± 0.0436					
	TRV 928	émail	191.33 ± 5.82	-0.9317 ± 0.0302	75 ± 26	111 ± 38	582 ± 30	768 ± 55	249 ± 20
		dentine		-0.6885 ± 0.0479					
	TVL 929(a)	émail	191.95 ± 2.73	-0.7420 ± 0.0447	65 ± 14	191 ± 42	597 ± 30	853 ± 54	225 ± 15
		dentine		-0.7269 ± 0.0456					
Dali Niveau archéologique	Dali01	émail	665.1 ± 36.5	-0.9742 ± 0.0446	1322 ± 346	558 ± 146	602 ± 38	2482 ± 377	268 ± 38
		dentine		-0.0052 ± 0.0010					
	Dali02	émail	956.0 ± 56.1	-0.2499 ± 0.1546	1434 ± 391	1159 ± 316	670 ± 41	3263 ± 505	293 ± 42
		dentine		-0.6803 ± 0.0737					
	Dali03	émail	507.0 ± 39.1	-0.5015 ± 0.1304	100 ± 50	652 ± 328	726 ± 86	1478 ± 343	343 ± 75
		dentine		-0.0039 ± 0.0011					
	Dali04	émail	2215.0 ± 290	-0.0049 ± 0.0008	4672 ± 1215	1750 ± 455	610 ± 38	7032 ± 1298	315 ± 41
		dentine		-0.0051 ± 0.0008					
Mauer "Upper sands"	M0502	émail	809.7 ± 30.6	-0.0021 ± 0.0003	359 ± 77	346 ± 74	840 ± 120	1545 ± 161	524 ± 51
		dentine		-0.0022 ± 0.0003					
	M0505	émail	643.6 ± 10.7	-0.2642 ± 0.0753	413 ± 85	227 ± 47	750 ± 46	1390 ± 108	463 ± 35
		dentine		0.1106 ± 0.1089					
	M0504	émail	754.8 ± 23.0	-0.4808 ± 0.0588	264 ± 71	368 ± 99	851 ± 54	1483 ± 133	509 ± 43
		dentine		0.4376 ± 0.0639					
Mauer "Lower sands"	M0506	émail	662.8 ± 13.1	-0.5536 ± 0.0610	404 ± 79	685 ± 120	330 ± 21	1416 ± 145	468 ± 47
		dentine		-0.8163 ± 0.0308					
		cément		-0.0030 ± 0.0004					
	M0507	émail	813.8 ± 18.5	-0.3867 ± 0.0810	701 ± 132	295 ± 56	314 ± 31	1310 ± 147	621 ± 68
		dentine		-0.5007 ± 0.0668					
	M0508	émail	482.6 ± 12.2	-0.2540 ± 0.0912	101 ± 29	386 ± 78	332 ± 20	818 ± 84	590 ± 63
		dentine		0.3749 ± 0.1635					
		cément		-0.0019 ± 0.0002					
		émail		0.2409 ± 0.1442					
	M0503	dentine	676.7 ± 12.7	0.6189 ± 0.1865	347 ± 87	399 ± 70	365 ± 20	1109 ± 113	610 ± 61
		cément		-0.5649 ± 0.0491					
	M0501	émail	499.9 ± 46.2	-0.1092 ± 0.1387	107 ± 43	283 ± 114	381 ± 21	771 ± 124	648 ± 85
dentine		-0.0017 ± 0.0002							
Cuesta de la Bajada Niveau archéologique CB3	CB0001	émail	470.2 ± 13.6	1.3210 ± 0.2873	100 ± 66	278 ± 144	1043 ± 41	1421 ± 163	331 ± 33
		dentine		1.4747 ± 0.3031					
		cément		-0.2372 ± 0.1686					
	CB0002	émail	1317.9 ± 49.0	1.7772 ± 0.5873	178 ± 100	1131 ± 452	1043 ± 41	2352 ± 464	562 ± 103
		dentine		0.7635 ± 0.3848					
		cément		-0.2651 ± 0.1654					
	CB0701	émail	398.5 ± 6.8	-0.9645 ± 0.0366	324 ± 96	485 ± 100	1043 ± 41	1852 ± 145	215 ± 18
		dentine		-0.2640 ± 0.0920					
		cément		0.6979 ± 0.1645					
	CB0702	émail	933.1 ± 67.4	7.9288 ± 0.8831	103 ± 99	121 ± 105	1043 ± 41	1267 ± 150	736 ± 102
		dentine		7.9632 ± 0.8868					
		cément		8.7018 ± 0.9556					

Tab. 1 : Données ESR/U-Th obtenues sur les échantillons de dents provenant des différents gisements considérés.

d_{int} : dose annuelle interne, d_{ext} : dose annuelle externe, d_a : dose annuelle totale.

Tab. 1: ESR/U-series data obtained on the tooth samples from the different studied sites. d_{int}: internal dose rate, d_{ext}: external dose rate, d_a: total dose rate.

alors que des lessivages sont modélisés pour d'autres tissus (Shao *et al.*, 2012). Les âges obtenus pour quatre des cinq dents analysées sont du même ordre de grandeur (fig. 5) et permettent de calculer un âge moyen de 612 ± 65 ka (tab. 2), compatibles avec les données obtenues par IR-RF et plaçant le dépôt des sables inférieurs, attribué à une période interglaciaire, au cours du stade isotopique 5. L'âge obtenu pour la cinquième dent (M0506), la plus élevée altimétriquement dans la stratigraphie des sables inférieurs et la plus proche du *Lettenbank*, tombe dans le domaine d'âge obtenu pour les échantillons des sables supérieurs, de même d'ailleurs que l'échantillon

IR-RF prélevé au même niveau, qui semblent s'être mis en place au cours de l'interglaciaire suivant, le MIS 13 (fig. 5). Un remaniement de la dent depuis les sables supérieurs semble toutefois peu probable, l'âge IR-RF du sédiment prélevé au même niveau étant du même ordre et l'hypothèse d'un changement dosimétrique liée à la mise en place du *Lettenbank* a été avancée (Wagner *et al.*, 2010). Ce phénomène semble se répéter au sommet des sables supérieurs, pour lesquels dent (M0505) et sédiments fournissent là encore des âges plus récents que ne le laisse supposer l'homogénéité paléontologique de ces niveaux. Les âges obtenus pour ces deux échan-

Site / Couche	Dents analysées	Paléodose moyenne * (Gy)	Dispersion * (%)	Âge moyen ESR/U-Th pondéré ** (ka)	Dispersion * (%)
Tourville-la-Rivière / Couche D2	6	203 ± 11	5	223 ± 12	7
Dali / Niveau archéologique	4	1086 ± 775	71	295 ± 43	10
Mauer / "Upper sands"	3	736 ± 85	11	491 ± 47	6
Mauer / "Lower sands"	5	627 ± 138	22	564 ± 97 (612 ± 65) sans M0506	12 (4)
Cuesta de la Bajada / Niveau archéologique CB3	4	780 ± 430	55	259 ± 200	51

* La dispersion correspond au coefficient de variation, c'est-à-dire l'écart type relatif par rapport à la moyenne arithmétique
** Calculé avec Isoplot 4.15 (Ludwig, 2008) à partir des âges individuels obtenus.

Tab. 2 : Doses équivalentes moyennes et âges moyens obtenus sur les échantillons de dents provenant des différents gisements considérés.
Tab. 2: Mean equivalent dose values and associated ages obtained for the tooth samples considered in the present study.

tillons, aux alentours de 420 - 460 ka, pourraient alors être liés à la mise en place des premiers dépôts loessiques sus-jacents au cours du MIS 12.

4.3 - DALI

L'une des quatre dents analysées pour le site de l'Homme de Dali (Dali 04) présente une paléodose plus forte que les

autres, induisant une dispersion importante (71 %) (tab. 2). Cette paléodose (2215 ± 90 Gy) est cependant bien moins importante que celle publiée par Yin *et al.* (2010) pour cet échantillon (3317 ± 81 Gy), en raison de l'utilisation alors d'une fonction exponentielle simple, inadaptée à ce type de courbes de croissance et conduisant à une surestimation des paléodoses (voir Duval *et al.*, 2009). Les cinétiques d'incorporation, à l'instar de

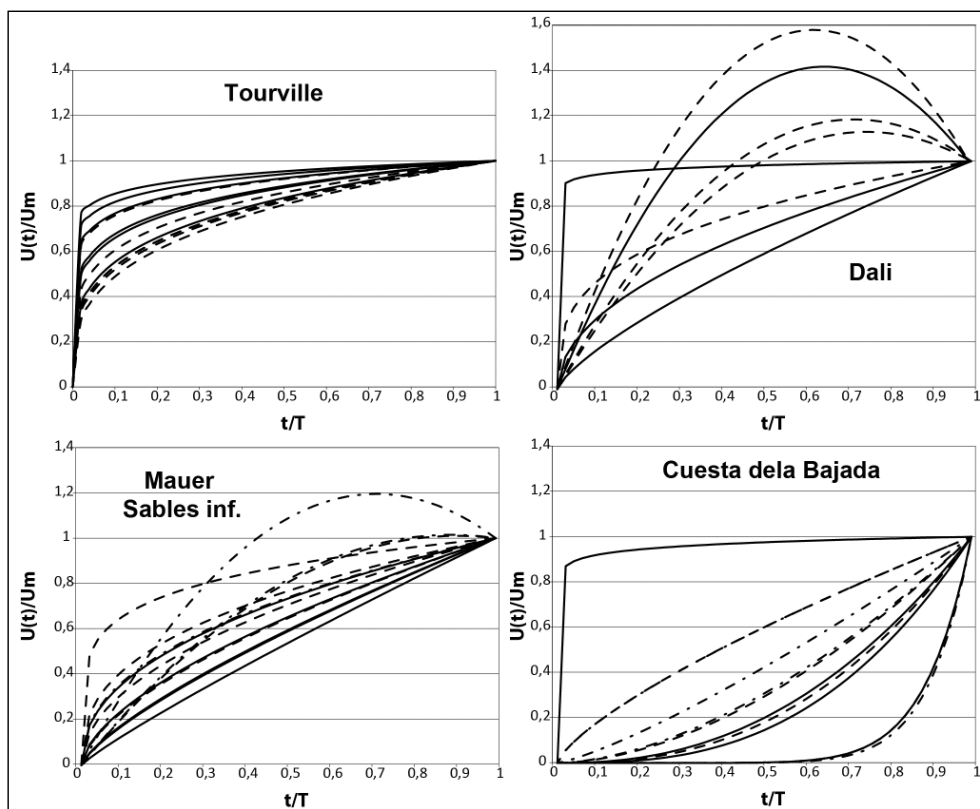


Fig. 4 : Cinétiques d'incorporation de l'uranium modélisées pour les différents tissus des dents provenant des différents gisements considérés.
Email : trait continu, dentine : pointillé régulier, cément : pointillé irrégulier.
Fig. 4: U-uptake kinetics modeled for all the dental tissues of the present study. Enamel: continuous line, dentine: regularly dotted line, cement: irregularly dotted line.

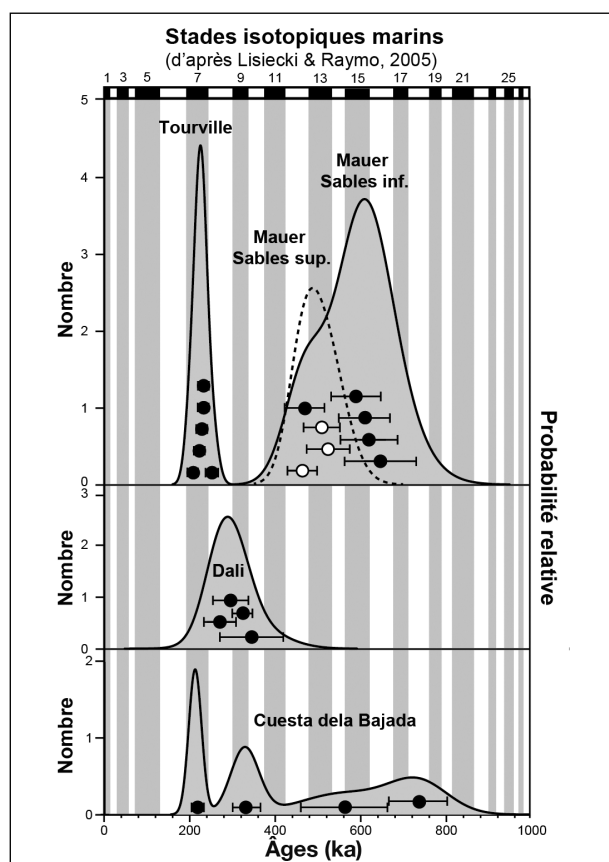


Fig. 5 : Ages ESR/U-Th obtenus sur les échantillons de dents provenant des différents gisements considérés.

Les cercles blancs correspondent aux échantillons provenant de l'unité des Sables supérieurs de Mauer.

Fig. 5: ESR/U-series ages on tooth samples from the different studied sites. White circles correspond to samples from Mauer Upper sands.

celles observées pour les échantillons de Mauer, varient d'une incorporation quasiment linéaire à un lessivage qui peut être important (fig. 4). Comme pour Tourville, les doses gamma et cosmiques de la dose externe $d_{ext2}(t)$ (au total $565 \pm 38 \mu\text{Gy/a}$, déterminée à partir des mesures de laboratoire) utilisée pour les calculs d'âge ont été les mêmes pour tous les échantillons. Malgré la disparité des paléodoses, les autres contributions ($d_{int}(t)$ et $d_{ext1}(t)$) permettent de compenser cette variabilité et l'âge obtenu pour la dent Dali 04 est indifférenciable des trois autres. Grâce à ce nouveau résultat, il est donc désormais possible de calculer un âge moyen de $295 \pm 43 \text{ ka}$. Ce résultat, en accord avec les données stratigraphiques et paléoenvironnementales disponibles, indique que le sédiment correspondant s'est déposé durant une période glaciaire ou transitionnelle (Yin *et al.*, 2010), permet de proposer pour le niveau paléanthropologique un âge contemporain de la transition MIS 9/8 (fig. 5).

4.4 - CUESTA DE LA BAJADA

Les résultats obtenus sur les échantillons de Cuesta de la Bajada sont sans conteste les plus problématiques. Les doses équivalentes varient de 399 ± 14 à $1318 \pm 98 \text{ Gy}$, avec une dispersion très élevée de 55 % (tab. 2). Là encore, les mêmes doses gamma (au total $1043 \pm 41 \mu\text{Gy/a}$, déterminée lors de plusieurs campagnes de

dosimétrie gamma et TL) et cosmiques ont été utilisées pour les quatre échantillons. La variabilité des paléodoses ne peut donc être compensée que par les contributions liées à l'incorporation d'uranium dans les différents tissus dentaires. Aucun lessivage apparent d'uranium n'a pu être observé dans les tissus analysés, si bien que le modèle US a pu être utilisé dans tous les cas. Malgré des cinétiques d'incorporation obtenues par le modèle US et indiquant des incorporations précoces à tardives (fig. 4), les âges sont très hétérogènes, variant de 215 ± 15 à $737 \pm 69 \text{ ka}$ (fig. 5) et conduisant à un âge moyen de $259 \pm 200 \text{ ka}$ sans signification réelle (tab. 2). De plus, ces âges diffèrent pour la plupart sensiblement de ceux obtenus par OSL et ESR sur des quartz extraits des sédiments du niveau archéologique qui placent la mise en place des sédiments au sein du MIS 8 ou par RAA sur dents qui le placeraient plutôt dans les stade isotopiques 12 ou 11 (Santonja *et al.*, 2014).

5 - DISCUSSION

Le potentiel et les limites de l'utilisation de la méthode ESR/U-Th pour dater des niveaux archéologiques et paléontologiques du Pléistocène moyen en contexte fluvial ont été illustrés à travers la présentation des résultats obtenus sur quatre sites.

Les résultats obtenus sur les sites de Tourville-la-Rivière, de Mauer et de Dali sont représentatifs de ce que l'on peut attendre en termes de variabilité sur de tels gisements fluviaux. L'homogénéité dosimétrique des dépôts fluviaux sableux et l'utilisation des modèles combinant ESR et U-Th permettent alors de proposer des cinétiques d'incorporations qui peuvent varier sensiblement d'un tissu ou d'un échantillon à l'autre, mais impactent finalement peu sur l'âge moyen obtenu. Les échantillons de Tourville-la-Rivière sont remarquablement homogènes que ce soit au niveau des doses équivalentes, des cinétiques d'incorporation et des âges obtenus, même si ces derniers sont sensiblement plus anciens que les âges obtenus lors des études précédentes (Balescu *et al.*, 1997; Faivre *et al.*, 2014), mais restent compatibles avec ces derniers à $\pm 1\sigma$. A Mauer, par contre, la comparaison systématique des résultats ESR/U-Th et IR-RF (Wagner *et al.*, 2010) montre que les variations observées pour les échantillons provenant des deux ensembles sableux sont similaires pour les deux méthodes, avec des âges sensiblement plus récents au sommet des deux ensembles. Ceci pourrait indiquer pour ces échantillons une modification de la dosimétrie externe $d_{ext2}(t)$ liés au dépôt des sédiments sus-jacents, c'est à dire pour les sables inférieurs lors de la mise en place du *Lettenbank*, qui est attribué par Wagner *et al.* (2011) à une période glaciaire et pour les sables supérieurs lors de celles des dépôts de couverture loessique.

En ce qui concerne Dali, l'hypothèse du mélange de plusieurs stocks de dents aux histoires paléodosimétriques différentes avait été avancée par Yin *et al.* (2011) pour expliquer la disparité observée des résultats. En fait, il semblerait que cette disparité soit plutôt liée à une

surestimation de la paléodose, et donc de l'âge, de l'un des échantillons analysés. L'utilisation d'une fonction mathématique correspondant à la somme de deux fonctions exponentielles conduit en effet à une paléodose bien plus petite que celle déterminée au moyen d'une simple extrapolation exponentielle et à un âge indifférenciable de ceux obtenus sur les autres dents. En accord avec les autres données géologiques et stratigraphiques disponibles, un âge contemporain des MIS 9 et 8, peut alors être avancé pour ce niveau.

Maintenant, comment expliquer la disparité des résultats obtenus sur le site de la Cuesta de la Bajada? Comme la modélisation proposée par la combinaison des méthodes ESR et U-Th permet de maîtriser les variations de la dose interne et externe $d_{ext1}(t)$ qui lui sont liées, une mauvaise reconstruction de l'histoire paléodosimétrique du niveau considéré doit être envisagée. Cependant, pour la Cuesta de la Bajada, cette hypothèse paraît difficile à étayer. En effet, cela impliquerait d'utiliser une dose $d_{ext2}(t)$ supérieure de + 55 % à + 285 % à celles, très reproductibles, mesurées sur le terrain lors de trois campagnes différentes et en utilisant des dosimètres TL et deux spectromètres gamma différents. Ceci paraît d'autant plus difficilement envisageable que les études ESR et OSL menées sur les sédiments donnent des âges bien plus homogènes qui indiquent que le contexte paléodosimétrique du niveau étudié semble bien décrit et placent le dépôt lors des MIS 9 et 8 (Santonja *et al.*, 2014).

La présence de plusieurs stocks d'âges différents ou ayant eu des histoires dosimétriques sensiblement différentes n'a pour l'instant pas été évoquée par les archéozoologues pour le site de la Cuesta de la Bajada, bien qu'il soit intéressant de souligner qu'une étude par racémisation des acides aminés de dents provenant de ce niveau donne un âge moyen sensiblement plus ancien que ceux obtenus sur les quartz extraits des sédiments (Santonja *et al.*, 2014). La disparité des résultats obtenus pour ce gisement est telle qu'il est difficile d'avancer un âge sur la seule base des âges ESR/U-Th, mais l'âge ESR/U-Th le plus récent (215 ± 15 ka), bien que sensiblement plus récents que les âges OSL et ESR obtenus sur les sédiments qui placent le dépôt lors des MIS 9 et 8 (Santonja *et al.*, 2014), semble le plus raisonnable à envisager, en l'état actuel des résultats ESR/U-Th.

6 - CONCLUSION

La méthode ESR/U-Th lorsqu'elle est appliquée à des dents issues d'un même niveau archéologique fluviatile permet généralement, compte tenu des autres données paléoenvironnementales disponibles, d'attribuer le site à un stade isotopique donné. Dans certains cas, une dispersion des résultats est observée et ne peut être simplement expliquée par une mauvaise reconstruction de l'histoire paléodosimétrique du niveau considéré. Cependant, pour les gisements utilisés comme exemples, la dose externe relativement homogène mise en évidence pour les niveaux étudiés et la variation de la dose interne

reconstruite à partir des cinétiques d'incorporation de l'uranium modélisées pour les différents tissus dentaires ne permettent pas d'expliquer la dispersion observée des paléodoses. Ce type de données peut alors s'expliquer en postulant un mélange de stocks paléontologiques au sein des niveaux étudiés, des dents remaniées, plus anciennes ou ayant connu une histoire dosimétrique très différente, pouvant être mélangées avec celles associées à l'occupation archéologique que l'on cherche à dater. Il convient alors de vérifier l'aspect taphonomique des échantillons. L'âge le plus probable du dépôt correspondrait alors au groupe d'âges les plus récents, comme cela semble être observé à la Cuesta de la Bajada par comparaison avec des résultats obtenus par d'autres méthodes de datation stratigraphiques ou géochronologiques.

REMERCIEMENTS

Nous remercions chaleureusement tous les collègues archéologues, géologues, paléoanthropologues, paléontologues, géographes ou physiciens qui nous ont permis d'accéder aux gisements présentés dans ce travail, d'y échantillonner des dents pour analyse destructive et de réaliser ces analyses selon une approche pluridisciplinaire: Dominique Cliquet, Céline Bellimi, Sylvie Coutard, Gunther Wagner, Matthias Krbetschek (†), Yin Gongming, Shen GuanJun, Alfredo Perez-Gonzalez, Manuel Santonja, Norbert Mercier et Lee Arnold. Un grand merci également aux deux relecteurs dont Mathieu Duval à qui, au vu de son travail, nous avons proposé de cosigner cet article, et un relecteur anonyme dont les remarques ont permis d'améliorer sensiblement cet article. Ce travail, à travers la participation d'Oliver Tombret, a bénéficié d'une aide de l'Etat gérée par l'Agence Nationale de la Recherche au titre du LabEx ANR-10-LABX-0003-BCDiv, dans le cadre du programme «Investissements d'avenir» portant la référence n° ANR-11-IDEX-0004-02. Mathieu Duval est actuellement le bénéficiaire d'une bourse de recherche européenne Marie Curie IOF (*International Outgoing Fellowship*) obtenue dans le cadre du septième programme-cadre de recherche (FP7/2007-2013) sous la convention de subvention n° PEOF-GA-2013-626474. Cet article est par ailleurs dédié à la mémoire de Matthias Krbetschek (†), qui a effectué l'étude IR-RF des sédiments de Mauer, étape majeure dans la réflexion présentée dans cet article.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- AUGUSTE P., 2009 - Évolution des peuplements mammaliens en Europe du Nord-Ouest durant le Pléistocène moyen et supérieur. Le cas de la France septentrionale. *Quaternaire*, **20** (4), 527-550.
- BAHAIN J.-J., YOKOYAMA Y., FALGUÈRES C. & SARCIA M.N., 1992 - ESR dating of tooth enamel: a comparison with K-Ar dating. *Quaternary Science Reviews*, **11** (1-2), 245-250.
- BALESCU S., LAMOTHE M. & LAUTRIDOU J.-P., 1997 - Luminescence evidence for two Middle Pleistocene interglacial events at Tourville, northwestern France. *Boreas*, **26** (1), 61-72.

- BISCHOFF J.L. & ROSENBAUER R.J., 1981** - Uranium-series dating of human skeletal remains from the Del Mar and Sunnyvale sites, California. *Science*, **213** (4511), 1003-1005.
- BISCHOFF J.L., ROSENBAUER R.J., TAVOSO A. & DE LUMLEY H., 1988** - A test of uranium-series dating of fossil tooth enamel: Results from Tournal cave, France. *Applied Geochemistry*, **3** (2), 135-141.
- BLACKWELL B.N., PORAT N., SCHWARCZ H.P. & DEBENATH A., 1992** - ESR dating of tooth enamel: comparison with $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$ speleothem dates at La Chaise-de-Vouthon (Charente), France. *Quaternary Science Reviews*, **11** (1-2), 231-244.
- BRENNAN B.J., RINK W.J., MCGUIRL E.L., SCHWARCZ H.P. & PRESTWICH W.V., 1997** - Beta doses in tooth enamel by "One Group" theory and the Rosy ESR dating software. *Radiation Measurements*, **27** (2), 307-314.
- CLIQUET D., LAUTRIDOU J.-P., COUTARD S., BEMILLI C., BAHAIN J.-J., MERCIER N., LIMONDIN-LOZOUET N. & GAUTHIER A., 2010** - *Tourville-la-Rivière, Seine-Maritime. Carrières et ballastières de Normandie: « La Fosse-Marmitaine »*. Rapport Final d'Opération, Service Régional de l'Archéologie, Basse-Normandie, Caen, 106 p.
- DUVAL M., GRÜN R., FALGUÈRES C., BAHAIN J.-J. & DOLO J.-M., 2009** - ESR dating of Lower Pleistocene fossil teeth: limits of the single saturating exponential (SSE) function for the equivalent dose determination. *Radiation Measurements*, **44** (5-6), 477-482.
- FAIVRE J.-P., MAUREILLE B., BAYLE P., CREVECOEUR I., DUVAL M., GRÜN R., BEMILLI C., BONILAURI S., COUTARD S., BESSOU M., LIMONDIN-LOZOUET N., COTTARD A., DESHAYES T., DOUILLARD A., HENAFF X., PAUTRET-HOMERVILLE C., KINSLEY L. & TRINKAUS E., 2014** - Middle Pleistocene human remains from Tourville-la-Rivière (Normandy, France) and their archaeological context. *PlosOne*, **9** (10), e104111.
- GRÜN R., 2000** - Methods of dose determination using ESR spectra of tooth enamel. *Radiation Measurements*, **32** (5-6), 767-772.
- GRÜN R. & BRUMBY S., 1994** - The assessment of errors in past radiation doses extrapolated from ESR/TL dose-response data. *Radiation Measurements*, **23** (2-3), 307-315.
- GRÜN R. & KATZENBERGER-APEL O., 1994** - An alpha-irradiator for ESR dating. *Ancient TL*, **12** (2), 35-38.
- 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 and Radiation Measurements*, **14** (1-2), 237-241.
- IKEYA M., 1982** - A model of linear uranium accumulation for ESR age of Heidelberg (Mauer) and Tautavel bones. *Japanese Journal of Applied Physics*, **21** (11), L690-L692.
- JAMET G., 2014** - *Réponses sédimentaires d'un bassin versant côtier aux variations glacio-eustatiques et au soulèvement plio-quaternaire: l'exemple du bassin versant côtier de la baie de Seine (Seine, Touques et Dives)*. Thèse de Doctorat, Université de Caen, Caen, 418 p.
- LAUTRIDOU J.-P., 1985** - *Le cycle périglaciaire pléistocène en Europe du Nord-Ouest et plus particulièrement en Normandie*. Thèse de Doctorat d'Etat, Université de Basse-Normandie, Caen, 2 vol., 908 p.
- LISIECKI L.E. & RAYMO M.E., 2005** - A Pliocene-Pleistocene stack of 57 globally distributed benthic $\delta^{18}\text{O}$ records. *Paleoceanography*, **20** (1), 1-17.
- LUDWIG K.R., 2008** - Isoplot 3.70, a geochronological toolkit for microsoft excel. *Berkeley Geochronology Center Special Publication*, **4**, 76 p.
- MERCIER N. & FALGUÈRES C., 2007** - Field gamma dose-rate measurement with a NaI(Tl) detector: re-evaluation of the 'threshold' technique. *Ancient TL*, **25** (1), 1-4.
- PRESCOTT J.R. & HUTTON J.T., 1994** - Cosmic ray contributions to dose rates for Luminescence and ESR Dating: Large depths and long-term time. *Radiation Measurements*, **23** (2-3), 497-500.
- SANTONJA M., PÉREZ-GONZÁLEZ A., DOMÍNGUEZ-RODRIGO M., PANERA J., RUBIO-JARA S., SESÉ C., SOTO E., ARNOLD L.J., DUVAL M., DEMURO M., ORTIZ J.E., DE TORRES T., MERCIER N., BARBA R. & YRAVEDRA J., 2014** - The Middle Paleolithic site of Cuesta de la Bajada (Teruel, Spain): a perspective on the Acheulean and Middle Paleolithic technocomplexes in Europe. *Journal of Archaeological Science*, **49**, 556-571.
- SCHOETENSACK O., 1908** - *Der Unterkiefer des Homo Heidelbergensis aus den Sanden von Mauer bei Heidelberg: ein Beitrag zur Paläontologie des Menschen*. Engelmann, Leipzig, 67 p.
- SHAO Q., BAHAIN J.-J., FALGUÈRES C., PERETTO C., ARZARELLO M., MINELLI A., THUN HOHENSTEIN U., DOLO J.-M. & GARCIA T., 2011** - New ESR/U-series data for the early Middle Pleistocene site of Isernia La Pineta, Italy. *Radiation Measurements*, **46** (9), 847-852.
- SHAO Q., BAHAIN J.-J., FALGUÈRES C., DOLO J.-M. & GARCIA T., 2012** - A new U-uptake model for combined ESR/U-series dating of tooth enamel. *Quaternary Geochronology*, **10**, 406-411.
- SHAO Q., BAHAIN J.-J., DOLO J.-M. & FALGUÈRES C., 2014** - Monte Carlo approach to calculate US-ESR ages and their uncertainties. *Quaternary Geochronology*, **22**, 99-106.
- STRINGER C.B., 2002** - Modern Human Origins: Progress and Prospects. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences*, **357** (1420), 563-579.
- VALLADAS G., 1982** - Mesure de la dose gamma annuelle de l'environnement d'un site archéologique par un dosimètre TL. *PACT*, **6**, 77-85.
- VERMEESCH P., 2009** - RadialPlotter: A Java application for fission track, luminescence and other radial plots. *Radiation Measurements*, **44** (4), 409-410.
- WAGNER G.A., KRBETSCHKE M., DEGERING M., BAHAIN J.-J., SHAO Q., FALGUÈRES C., VOINCHET P., DOLO J.-M., GARCIA T. & RIGHTMIRE G.P., 2010** - Radiometric dating of the type-site for *Homo heidelbergensis* at Mauer, Germany. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **107** (46), 19726-19730.
- WAGNER G.A., MAUL L.C., LÖSCHER M. & SCHREIBER H.D., 2011** - Mauer - the type site of *Homo heidelbergensis*: palaeoenvironment and age. *Quaternary Science Reviews*, **30** (11-12), 1464-1473.
- XIAO J., JINC C. & ZHU Y., 2002** - Age of the fossil Dali Man in north-central China deduced from chronostratigraphy of the loess-paleosol sequence. *Quaternary Science Reviews*, **21** (20-22), 2191-2198.
- YIN G., BAHAIN J.-J., SHEN G., TISSOUX H., FALGUÈRES C., DOLO J.-M., HAN F. & SHAO Q., 2011** - ESR/U-series study of teeth recovered from the palaeoanthropological stratum of the Dali Man site (Shaanxi Province, China). *Quaternary Geochronology*, **6** (1), 98-105.
- YOKOYAMA Y., FALGUÈRES C. & QUAEGBEUR J.P., 1985** - ESR dating of quartz from Quaternary sediments: first attempt. *Nuclear Tracks and Radiation Measurements*, **10** (4-6), 921-928.