



Paléontologie humaine et préhistoire

Les derniers *Homo heidelbergensis* et leurs descendants les néandertaliens : datation des sites d'Orgnac 3, du Lazaret et de Zafarraya

The last Homo heidelbergensis and their descendants the Neandertals: Orgnac 3, Lazaret and Zafarraya dating

Véronique Michel^{a,b,*}, Guanjun Shen^c, Chuan-Chou Shen^d, Michel Fornari^b,
Chrystèle Vérati^b, Sylvain Gallet^b, Doriane Sabatier^e

^a Université Nice Sophia-Antipolis, campus Saint-Jean-d'Angély, SJA3 - CEPAM - UMR 6130 CNRS, 24, avenue des Diables-Bleus, 06357 Nice cedex 4, France

^b Géozur, CNRS UMR6526, UNS, Parc-Valrose, 06108 Nice, France

^c College of Geographical Sciences, Nanjing Normal University, Nanjing 210046, Chine

^d High-precision Mass Spectrometry and Environment Change Laboratory (HISPEC), Department of Geoscience, National Taiwan University, Taipei, Taiwan

^e Cerege, UMR 6635 CNRS, université Aix-Marseille, Europôle-de-l'Arbois, BP 80, 13545 Aix-en-Provence cedex 4, France

INFO ARTICLE

Historique de l'article :

Reçu le 11 février 2011

Accepté après révision 30 mai 2011

Disponible sur internet le 15 août 2011

Présenté par Henry de Lumley

Mots clés :

Datation radiométrique

Homo heidelbergensis

Néandertal

Acheuléen

Moustérien

Keywords:

Radiometric dating

Homo heidelbergensis

Neandertal

Acheulian

Mousterian

R É S U M É

Les résultats de datation multiméthodes de trois sites archéologiques sont présentés : ceux d'Orgnac 3 (Ardèche, France), de la grotte du Lazaret (Alpes-Maritimes, France) et de la grotte de Zafarraya (Andalousie, Espagne). Les sites ont été datés par les méthodes $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$, U-Th et/ou ^{14}C . À Orgnac 3 où on trouve *Homo heidelbergensis* et l'apparition du débitage levallois, les deux spéléothèmes du niveau 5b–6–7 ont été datés par U-Th (U-series) par MC-ICPMS (Multi Collector-Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry). Compte tenu des erreurs à 2σ , les âges sont compris entre 319 et 255 ka (MIS8–9). Le niveau volcanique supérieur 2 a fait l'objet d'une datation préliminaire par la méthode $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$; la moyenne pondérée sur 12 déterminations est de $308,2 \pm 6,8$ ka (2σ). La datation ESR/U-Th combinée des dents de cerf du Lazaret situe les niveaux acheuléens et pré-moustériens entre 190 et 120 ka (MIS6). Les dates sont en accord avec les datations U-Th par TIMS, obtenues sur la tranchée TRA située au-dessus, comprises entre 108 et 44 ka (MIS5, 4, 3). À Zafarraya, des analyses de charbons de bois par la méthode ^{14}C , ainsi que la datation ESR/U-Th combinée sur émail dentaire de *Capra* et d'*Equus* permettent de situer les niveaux moustériens où des restes de néandertaliens ont été découverts, entre 42 et 34 ka (MIS3).

© 2011 Académie des sciences. Publié par Elsevier Masson SAS. Tous droits réservés.

A B S T R A C T

This article presents the dating results recently obtained on three archaeological sites in Europe. At Orgnac 3 (Ardèche, France) from where the last *Homo heidelbergensis* fossils are associated with the first evidence of levallois technique, two speleothem formations from the 5b–6–7th layers were U-Th dated with MC-ICPMS, giving an age range of 319–255 ka (2σ) (MIS8–9), while the volcanic ash-bearing second layer was dated by $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$, obtaining a preliminary date of 308.2 ± 6.8 ka (2σ). The combined ESR/U-Th dating of red deer enamel teeth from Lazaret cave (Alpes-Maritimes, France) attributed ages of 120–190 ka

* Auteur correspondant.

Adresse e-mail : vmichel@cepam.cnrs.fr (V. Michel).

to the Acheulean and pre-Mousterian layers (MIS 6), which is in agreement with previous TIMS U-Th dates between 108 and 44 ka on calcite samples from the overlying TRA trench (MIS 5, 4, 3). At Zafarraya (Andalousie, Espagne), a number of ^{14}C measurements on charcoal samples as well as combined ESR/U-Th dates on *Capra* and *Equus* dental enamels assigned the Mousterian artefacts and neandertalian fossils-bearing deposits an age interval between 42 and 34 ka (MIS 3).

© 2011 Académie des sciences. Published by Elsevier Masson SAS. All rights reserved.

Abridged English version

Dating is one of the major issues for establishing the mode of human evolution and for reconstructing paleoenvironments and prehistoric civilization. A reliable timescale for the interface between Neandertal and modern human in Europe may be cited as such an example (Adler et al., 2008; Banks et al., 2008; D'Errico and Sanchez Goni, 2003; Finlayson et al., 2006). It is necessary to systematically crosscheck the results from different dating methods. It is also very important to select samples of the highest possible quality for dating and to better understand their environmental background. Since more than two decades, the dating methods have been using more and more sophisticated techniques, such as mass spectrometries [(Thermal ionization mass spectrometry (TIMS), accelerator mass spectrometry (AMS), and inductively coupled plasma mass spectrometry (ICPMS)]. The inter-comparison of age results on well-preserved samples with different dating methods leads to the best age estimate of the archaeological level to be dated. This paper presents the recent dating results for three sites in Europe: Orgnac 3, Lazaret Cave and Zafarraya Cave (Fig. 1), by using the U-Th, $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ and ^{14}C methods. The sites are considered as references for understanding human evolution since *Homo heidelbergensis* remains were discovered at Orgnac 3 and at Lazaret Cave with the Acheulean–Mousterian transition. At Orgnac 3, the levallois debitage method appears at the top of the sequence and Zafarraya Cave where a cannibalism ritual was displayed, has yielded several *Homo neanderthalensis* remains.

Orgnac 3

The site was at first a cave, then it was transformed into a rock shelter and finally into an open-air site (Combier, 1967; Moncel et al., 2005). The sequence was divided into four major stratigraphic units (Fig. 2) (Khatib, 1994) and 10 archaeological levels (Debard and Pastre, 1988). Seven teeth of *H. heidelbergensis* were discovered in levels 5a, 5b and 6.

The lower stratigraphic unit I is characterised by the presence of carnivores and reindeer (Combier, 2000). The unit II contains speleothem formations and two archaeological levels (5b–6–7th) with a dominant presence of red deer. From five archaeological levels (3, 4a, 4b, 5a and 5b) of unit III, mainly bovid fossils were recovered. At the top of the sequence, in unit IV, two archaeological levels were identified (1, 2) with a dominant presence of *Equus steinheimensis*.

Based on the associated fauna, Aouraghe (1992) assigned the median levels (units II and III) to marine isotope

stage MIS9 and the upper levels to MIS8 (unit IV). Whereas Combier (2000) attributed the sequence to stages MIS9–10. In this study, four pure calcite samples from level 5b–6–7 were taken and analyzed by U-Th by using multicollector (MC)-ICPMS at the High-precision Mass Spectrometry and Environment Change Laboratory (HISPEC, Taiwan). The ages are between 255 and 319 ka (2σ). The results are more precise than the previous data obtained by alpha spectrometry technique (Shen, 1985) and by electron spin resonance dating method (ESR) (Fig. 3). Samples of cineritic material were taken from level 2 (Org-C1). Direct dating was carried out with $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ on sanidine grains. We carefully selected several sets of about 50–80 sanidine grains in the 200 μm fraction for dating by direct laser fusion (Table 1). Analyses were conducted at the Geoazur laboratory (Nice, France). Four fractions yield very old ages 901–29686 ka (Table 1) because of a contamination by K feldspar inherited grain. The remaining 12 ages are between 276 and 326 ka with a weighted mean age of 308.2 ± 6.8 ka. This age is in agreement with the age of 298 ± 55 ka obtained by Fission track dating (FT) on zircons (Khatib, 1994).

Roger et al. (1999) analyzed by $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ tephra layers from the sedimentary sequences at the Praclaux maars and Lac du Bouchet (French Massif Central). Based on mineralogical analyses the tephra came from the eruption of the Puy de Sancy, and is considered to be the same as in Orgnac 3.

The authors obtained a weighted mean age of 275 ± 5 ka from a series of sanidines total laser fusion and a plateau age of 300 ± 2 ka from a furnace step-heating experiment of a sanidine sample.

They considered that the age of 275 ± 5 ka may represent the Orgnac 3 date, discarding the furnace age due to mixture of juvenile sanidine phenocrysts and older K-feldspar xenocrysts. Our $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dates are more consistent with the age of 300 ± 2 ka.

Further $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ laser dating on the Orgnac sanidines is currently in progress in order to reduce the discrepancy range.

Lazaret Cave

The archaeological levels of Lazaret Cave have delivered 21 human remains attributed to *H. heidelbergensis*. Most of the artefacts are Acheulean in lower levels and Mousterian at the top of the sequence. The latest dating results were published recently (Michel et al., 2009) and are summarized in this paper. The faunal associations indicate a cold period at the end of the Middle Pleistocene (MIS 6) (Valensi et al., 2007). The ESR ages obtained on enamel from *Cervus elaphus* teeth yielded ages between 120 and 190 ka (MIS 6)

(Fig. 7). All U-Th dates carried out on the flowstone layer E, which covered the archaeological level at the top of the sequence, are presented in Fig. 4. The U-Th ages obtained by TIMS are with a greater precision (G. Shen), ranging from 108 ka at the base of the drill core TRA-H to 44 ka at the top (Fig. 5).

Zafarraya Cave

New ^{14}C , U-Th (TIMS) and ESR chronological studies on Mousterian levels of the Zafarraya site are presented, which revise the data before 1995 (Fig. 6.1). The AMS ^{14}C analyses were carried out at the Oxford Laboratory on fifteen charcoals and eight faunal remains. Among the charcoal samples, four were not amenable to ^{14}C dating because of a carbon insufficiency. The results of the eleven others are dispersed and inconsistent with the stratigraphic order, which suggests possible contamination by recent carbon (Fig. 6.2). The oldest ages between 34 and 37 ka BP were obtained on three charcoals. Four of the eight faunal remains (two dentine and two bones) were dateable, giving ages between 26 and 33 ka BP, which appear to be less dispersed than those from the charcoals. The other four faunal remains could not be dated because of an insufficient quantity of collagen. The failed ^{14}C analyses suggest on the one hand that the upper limit of the AMS ^{14}C method may possibly be approached taking into account of the old charcoal ages. On the other hand, the organic matter of the faunal remains may have undergone significant alteration. Moreover, the oldest AMS ^{14}C ages (~ 37 ka) should be considered as underestimated by 2 to 6 ka owing to the non-calibration of the data presented here. The faunal remains were also analysed by U-Th methods, either by alpha spectrometry or (TIMS) (Cerege, Aix-en-Provence) (Fig. 6.3). The age results are widely scattered and provide no more stringent constraint than those from AMS ^{14}C . Certain tooth remains analysed by TIMS were also dated by ESR (enamel). The combination of both methods for one *Capra* and two horse teeth yielded ages in the range of 34 and 42 ka (Fig. 6.4). This time interval overlaps the oldest ^{14}C ages obtained on charcoals (37 ka) and bone (33 ka). Taken together, it is not possible to determine with high precision the age of the Mousterian levels associated with the Zafarraya Neanderthal remains. Nevertheless, our results point to a range between 34 and 42 ka, corresponding to the MIS 3 (Fig. 7), as a more realistic estimate than the age of 30 ka widely cited in the literature up to now.

1. Introduction

Parmi les programmes pluridisciplinaires de la pré-histoire, la datation constitue une des problématiques majeures pour permettre d'établir la chronologie des fossiles d'Hominidés, pour la reconstruction du paléoenvironnement et des civilisations préhistoriques, comme par exemple l'extinction des néandertaliens et l'émergence de l'Homme moderne en Europe (Adler et al., 2008; Banks et al., 2008; D'Errico et Sanchez Goni, 2003; Finlayson et al., 2006). Il a été mis en évidence la nécessité de systématiser les opérations de comparaison des résultats entre les méthodes lorsque cela est possible, de maî-

triser le contrôle de la qualité de l'échantillon à dater et de bien connaître son environnement. En général, les principales méthodes de datation mises en œuvre sont basées sur des processus nucléaires de décroissance (^{14}C , K-Ar, Ar/Ar, U-Th) ou cumulatifs (TL, OSL, ESR), avec des degrés de précision variables ou bien, sur l'enregistrement de processus naturels (dendrochronologie, archéomagnétisme) (Barrandon et al., 2001; Ludwig et Renne, 2000). L'application des méthodes de datation se fait à l'aide de techniques de plus en plus sophistiquées telle la spectrométrie de masse. Le bon choix de l'échantillon et la comparaison des âges des différentes méthodes de datation permettent de s'approcher au mieux de l'âge réel du niveau géologique à dater. Nous proposons de résumer ici les derniers résultats de datation obtenus sur les sites d'Orgnac 3 (Ardèche, France), de la grotte du Lazaret (Alpes-Maritimes, France) et de la grotte de Zafarraya (Andalousie, Espagne) (Fig. 1). Les méthodes de datation radiométriques utilisées dans cette étude sont les suivantes: U-Th, $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ et ^{14}C . Les sites choisis sont des gisements clés pour la compréhension de l'évolution de l'homme et de ses civilisations dans le Sud de l'Europe, puisque Orgnac 3 et le Lazaret sont deux gisements à *H. heidelbergensis* qui ont enregistré dans leur séquence stratigraphique le passage d'une culture acheuléenne au Moustérien et l'apparition du débitage levallois et le Boquete de Zafarraya correspond à des occupations tardives d'*Homo neanderthalensis*, où un cannibalisme rituel a pu être mis en évidence dans certains niveaux.

2. Matériels et méthode

La méthode Ar/Ar présente le plus vaste champ d'application temporel, de quelques milliers d'années à 4,5 milliards d'années (Deino et al., 1998). Elle permet la



Fig. 1. Localisation géographique des sites d'Orgnac 3, du Lazaret et de Zafarraya.

Fig. 1. Geographical location of Orgnac 3, Lazaret and Zafarraya.

datation de formations volcaniques, en relation avec les sites préhistoriques (Lumley de et al., 2002).

La technique d'analyse utilisée est la spectrométrie de masse en phase gazeuse appliquée au laboratoire de Géozur (Nice, France); elle est décrite par divers auteurs (Féraud et al., 1990; Jourdan et al., 2006; Vérati et al., 2007). Le minéral volcanique le plus favorable pour permettre la datation de sites préhistoriques relativement jeunes (Pléistocène), est la sanidine contenant suffisamment de potassium par rapport à la limite de sensibilité de la méthode. Les âges Ar/Ar ont été calculés à l'aide du logiciel ArArCALC v2.5 de Koppers (2002).

La méthode ESR (limites 10 ka–2 Ma) permet la datation de l'émail dentaire de grands mammifères découverts en association avec les restes humains fossiles et leurs outils lithiques. Les techniques d'analyses utilisées sont la spectrométrie gamma, la spectrométrie alpha et la spectrométrie ESR (Electron spin resonance). Les procédures sont décrites par ailleurs (Michel et al., 2009). Les âges ESR ont été calculés à l'aide du programme informatique DATA de Grün (2009).

La méthode U-Th (limite supérieure ~500 ka) permet la datation de matériaux liés à l'activité humaine (os, dents, coquilles), ou de matériaux découverts dans les dépôts, en relation stratigraphique avec des niveaux archéologiques: plages marines (coraux, coquilles), planchers stalagmitiques. Les techniques d'analyse utilisées sont la spectrométrie alpha, la spectrométrie de masse à ionisation thermique (TIMS) appliquée au Cerege (Aix-en-Provence, France, collaboration E. Bard et D. Sabatier) ou au LSCE (à Gif-sur-Yvette, France, G. Shen et L. Turpin) et au GEOTOP, Montréal, Canada, G. Shen et B. Gahleb) (Shen et al., 1996, 2001), la spectrométrie de masse avec torche à plasma (MC-ICPMS) (National Taiwan University, Taipei, C-C Shen) (Shen et al., 2008; Shen et al., 2010).

La méthode ^{14}C permet la datation depuis l'Actuel jusqu'à 50 000 ans. Deux techniques d'analyse sont possibles pour déterminer les isotopes du carbone: par comptage bêta et par spectrométrie de masse avec accélérateur (AMS). Cette dernière est l'une des techniques parmi les plus précises et permet l'analyse de petites quantités d'échantillon. Les échantillons de charbons et de restes fauniques ont été sélectionnés et analysés par AMS au Laboratoire d'Oxford (UK) (Collaboration P. Pettitt) (Hedges et Van Klinken, 1992). Les dates présentées en années BP sont non calibrées, avec comme référence l'année 1950 AD.

3. Résultats et discussion

3.1. Le site d'Orgnac 3

Le site d'Orgnac 3 se situe en Ardèche à 320 m d'altitude et est connu depuis 1956 par la mise au jour d'une série de silex taillés et d'ossements fossiles (Combiér, 1967; Combiér, 2000). Ce site était dans un premier temps une grotte, puis s'est transformé en un abri sous roche pour devenir enfin un site de plein air (Moncel et al., 2005). À partir des sondages réalisés, une première interprétation cohérente de la formation du gisement divise la séquence en dix niveaux archéologiques (Debard et Pastre, 1988) (Fig. 2). Sept dents d'*H. heidelbergensis* ont été découvertes dans les niveaux 5a, 5b et 6. Le remplissage, fouillé sur 7 m de profondeur, renferme des dépôts décrits par les mêmes auteurs en six ensembles sédimentologiques. Plus tard, Khatib (1994) définit quatre ensembles stratigraphiques principaux (Fig. 2). À la base, l'ensemble stratigraphique I, comprend cinq niveaux sédimentaires composés de cailloutis anguleux, lités, dans une matrice sablo-argileuse. Cet ensemble a été déposé lors

Khatib (1994) Units	Levels	Archaeological level	Moncel et al. (2005)	Stratigraphical level	Altitude cm	Lithology	Dominant faunal composition Aouraghe (1992)	Paleoclimate	Biochronology	MIS
IV	IVb	1	Pre-Mousterian	a	-100	Argile plastique rouge	Horses	cold & dry	Late Middle Pleistocene	8
	IVa	2		c						
III	IIIc	3	Dominant production development ↑ Appearance of the Levallois knapping = Middle Paleolithic Acheulian	d	-200	Limon sableux induré	Bovids	cold & humid	Middle Pleistocene	9
	IIIb	4a		e						
	IIIb	4b		f						
	IIIa	5a		g						
	IIIa	5b		h						
II Erosion	IIb	6		i	-300	Planchers stalagmitiques et cailloutis à matrice limono sableuse	Deers	temperate & humid		
	IIa	7		j	-400	Matrice sabro-argilo-limoneuse	Carnivores	cold & dry		
I	le	8		k	-500					
	ld			l						
	lc			m						
	lb			n						
	la			o						
				p						
			q	-600						
			r							
			s							
				t	-700					
				substratum						

Fig. 2. Niveaux archéologiques et stratigraphiques d'Orgnac 3, composition faunique dominante et biostratigraphie.

Fig. 2. Archaeological levels, stratigraphic levels of Orgnac 3, dominant faunal composition and biostratigraphy.

d'un climat généralement froid. Ce dépôt contient essentiellement des restes de carnivores et de rennes (Aouraghe, 1992). Les espèces suivantes sont représentées: *Canis lupus* de petite taille, *Crocota crocuta spelaea*, *Ursus thibetanus*, *Vulpes vulpes*, *Panthera (Leo) spelaea*, *Ursus deningeri*, *Ursus arctos* (Combiér, 2000; Moncel et al., 2005). L'ensemble II est un dépôt limoneux à cailloux corrodés et à gros blocs d'effondrement, avec la présence de formations stagalmitiques (Khatib, 1994). Cet ensemble comprend deux niveaux archéologiques (6 et 7) avec la présence dominante de cervidés. L'ensemble III est composé de trois niveaux argilo-sableux à cailloux anguleux et blocs correspondant à un climat plus frais et humide. Dans cet ensemble, les bovidés sont abondants. Cinq niveaux archéologiques y ont été repérés (3, 4a, 4b, 5a et 5b). Au sommet du remplissage, l'ensemble stratigraphique IV est argileux à rares cailloux et comprend deux niveaux archéologiques 1 et 2. Il correspond aux dernières occupations humaines, avec la présence du cheval *Equus steinheimensis* et l'installation d'un climat encore plus frais, sec et d'un paysage ouvert (Fig. 2). D'après les associations fauniques, Aouraghe (1992) attribue les niveaux médians au stade MIS9 et les niveaux supérieurs au stade MIS8. Combiér (2000) attribue le remplissage aux stades MIS9–10. La technique du débitage levallois fait son apparition dans l'ensemble III et l'industrie devient pré-moustérienne dans le niveau supérieur 1.

Dans le niveau 5b–6–7, on note donc la présence de spéléothèmes dans lesquels de petits fragments de calcite très pure ont été prélevés et analysés dans le cadre de cette étude, par la méthode U-Th par MC-ICPMS. Nous rappelons les résultats de datations obtenus par des

études antérieures sur les différents ensembles stratigraphiques pour comparaison (Fig. 3). En tenant compte des erreurs analytiques à 2σ , les âges U-Th obtenus par MC-ICPMS sont compris entre 255 et 319 ka, ce qui correspond aux stades MIS8–9. Ils sont plus précis que les résultats obtenus par spectrométrie alpha, il y a plus d'une vingtaine d'années (Shen, 1985) et par ESR (Falguères et al., 1988) (Fig. 3). Les âges ESR obtenus par Masaoudi (1995) sur des dents et des quartz conduisent à une dispersion des âges entre les stades MIS13 et 5.

On trouve également dans le niveau 2, la présence de dépôts sableux jaunâtres d'origine volcanique (Fig. 2), conservés intacts dans d'anciens terriers d'après Khatib (1989). Ces retombées volcaniques ont été identifiées et proviennent, d'après Debard et Pastre (1988), de l'activité volcanique du Puy de Sancy, situé dans le Massif central, à environ deux cents kilomètres d'Ornac 3. Les auteurs estimaient alors l'âge de la retombée à 300 ka environ. Des zircons ont été récupérés dans ces niveaux volcaniques et datés de 298 ± 55 ka par traces de fission (TF) (Khatib, 1994) (Fig. 3). Plus tard, ces mêmes niveaux ont été prélevés pour une datation par la méthode $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ présentée dans ce travail préliminaire (Tableau 1). À partir du prélèvement, plusieurs centaines de grains de sanidine ont été soigneusement sélectionnés au microscope binoculaire. Une partie des grains a été analysée par EDS/EDX (Energy-dispersive X-ray spectroscopy, Ecole des Mines, Sophia Antipolis) pour vérifier la teneur en potassium K des sanidines et l'homogénéité de la séparation. Les grains ont été ensuite irradiés pendant une heure, sous Cd, en position 5C dans le réacteur nucléaire de l'Université de McMaster (Ontario, Canada). L'extraction de l'argon a été faite par un

Dating	MIS	Dating	MIS	Dating this work	MIS
Fission track dating FT on zircons: 298 ± 55 ka (level 2) Khatib (1994)	8-9	(Masaoudi, 1995) ESR on teeth: EU ESR ages = 242 ka (level 1) 111 ka (level 5a)	7 5	Ar/Ar dating on sanidines: (level 2) 308.2 ± 6.8 ka (2σ) weighted mean	8-9
$^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating: sanidines of the Velay maars * (100 km ~Puy de Sancy) 275 ± 5 ka (1σ)		LU ESR ages = 360 ka (level 1) 161 ka (level 5)	10 6		
Falguères et al. (1988) U-Th on calcite: 4 samples (level 5b-6-7) 290-400 ka average = 339 ka	8-11 9	ESR on quartz: 375 ka (level 4b) 501 ka (level 5a)	11 13		
ESR on calcite : 1 sample (level 5b-6-7) 309 ± 34 ka	9	ESR on calcite: 6 samples (level 5b-6-7) 293 ± 39 - 372 ± 47 ka	8-11	U-Th on calcite: 4 samples (level 5b-6-7) 255-319 ka (2σ)	8-9

* indirect dating of level 2

Fig. 3. Données des datations d'Ornac 3 obtenues par les études antérieures et les âges obtenus dans ce travail.

Fig. 3. Dating results of Ornac 3 obtained from previous studies and ages obtained in this work.

laser CO₂ continu en portant les grains de sanidine à fusion totale. Le spectromètre de masse est un VG 3600 travaillant avec un système de détection Daly (Géoazur, Nice). Dans le [Tableau 1](#), les résultats des 16 fusions Ar/Ar sont présentés. Quatre échantillons de grains de sanidine ont donné des âges vieux, > 900 ka, et sont écartés car ils résultent probablement d'une pollution par des xénocristaux hérités. Les âges apparents pour les 12 autres sont compris entre 281 et

331 ka ([Tableau 1](#)). La moyenne pondérée des âges Ar/Ar de ces douze échantillons est de 308,2 ± 6,8 ka (2σ). Compte tenu des erreurs à 2σ, c'est un âge apparent en accord avec la datation par TF sur zircons ([Fig. 3](#)).

Par ailleurs, [Roger et al. \(1999\)](#) ont daté par ⁴⁰Ar/³⁹Ar des sanidines provenant des téphras des maars du Praclaux et du Lac-du-Bouchet (Puy-en-Velais), dont les retombées volcaniques proviennent également du Puy-de-Sancy situé

Tableau 1

Premières données analytiques Ar/Ar des échantillons d'Orgnac 3 (niveau 2).

Table 1

First Ar/Ar data summary of samples from Orgnac 3 (level 2).

Sample	Lab n°	⁴⁰ Ar (moles)	⁴⁰ Ar (V)	± 1σ	³⁹ Ar (V)	± 1σ	³⁸ Ar (V)	± 1σ	³⁷ Ar (V)	± 1σ	³⁶ Ar (V)	± 1σ
Blank	B405-1		0,003703	0,000055	0,000082	0,000004	0,000108	0,000007	0,000574	0,000007	0,000286	0,000003
Sanidine	H405-1	2,416E-15	0,124498	0,000130	0,142002	0,000098	0,001952	0,000017	0,000761	0,000011	0,000344	0,000009
Sanidine	H405-2	2,549E-15	0,131177	0,000126	0,142491	0,000099	0,001930	0,000018	0,000721	0,000008	0,000365	0,000005
Sanidine	H405-3	2,190E-15	0,113187	0,000152	0,133857	0,000230	0,001832	0,000028	0,000778	0,000013	0,000315	0,000007
Blank	B498-1		0,003654	0,000045	0,000313	0,000006	0,000105	0,000003	0,000530	0,000008	0,000236	0,000005
Sanidine	H498-1	2,220E-15	0,114672	0,000158	0,131559	0,000173	0,001737	0,000013	0,000478	0,000009	0,000307	0,000006
Blank	B498-2		0,003053	0,000041	0,000017	0,000003	0,000055	0,000006	0,000511	0,000004	0,000230	0,000005
Sanidine	H498-2	1,906E-15	0,098358	0,000129	0,108337	0,000148	0,001457	0,000016	0,000515	0,000011	0,000313	0,000004
Sanidine	H498-3 ^a	9,342E-15	0,470144	0,000305	0,119291	0,000113	0,001567	0,000009	0,000514	0,000009	0,000291	0,000010
Sanidine	H498-4	1,879E-15	0,096989	0,000147	0,106580	0,000137	0,001441	0,000012	0,000484	0,000009	0,000289	0,000008
Blank	B89-1		0,004338	0,000043	0,000514	0,000024	0,000223	0,000007	0,000535	0,000007	0,000212	0,000002
Sanidine	K89-1	2,677E-15	0,138212	0,000199	0,162997	0,000159	0,002320	0,000020	0,000531	0,000012	0,000263	0,000006
Blank	B120-1		0,002831	0,000025	0,000308	0,000017	0,000152	0,000006	0,000434	0,000012	0,000185	0,000006
Sanidine	K120-1	3,988E-15	0,202226	0,000291	0,241362	0,000246	0,003165	0,000019	0,000365	0,000010	0,000246	0,000012
Sanidine	K120-2	2,947E-15	0,150172	0,000177	0,177248	0,000159	0,002391	0,000014	0,000368	0,000011	0,000213	0,000004
Blank	B135-1		0,002704	0,000008	0,000253	0,000009	0,000132	0,000009	0,000371	0,000015	0,000163	0,000004
Sanidine	K135-1 ^a	1,298E-13	6,490739	0,001681	0,090641	0,000123	0,001189	0,000013	0,000143	0,000009	0,000431	0,000012
Sanidine	K135-2 ^a	9,757E-15	0,490551	0,000710	0,211750	0,000306	0,002838	0,000013	0,000315	0,000008	0,000281	0,000005
Sanidine	K135-3	4,082E-15	0,206782	0,000135	0,214268	0,000286	0,002851	0,000026	0,000322	0,000009	0,000316	0,000004
Blank	B135-2		0,003433	0,000015	0,000250	0,000014	0,000153	0,000014	0,000369	0,000010	0,000158	0,000005
Sanidine	K135-4	5,788E-15	0,292838	0,000332	0,311954	0,000340	0,004142	0,000033	0,000328	0,000005	0,000355	0,000007
Sanidine	K135-5 ^a	1,665E-14	0,835979	0,000852	0,340279	0,000449	0,004465	0,000033	0,000361	0,000014	0,000427	0,000008
Sanidine	K135-6	6,469E-15	0,326870	0,000287	0,287225	0,000271	0,003842	0,000014	0,000335	0,000009	0,000553	0,000005

Lab n°	⁴⁰ Ar*/ ³⁹ Ar _k	± 1σ	% ⁴⁰ Ar*	Age (ka) ± 2σ
B405-1				
H405-1	0,735	0,021	85,4	308,5 ± 17,6
H405-2	0,735	0,015	81,2	308,7 ± 12,7
H405-3	0,756	0,019	91,3	317,5 ± 15,7
B498-1				
H498-1	0,684	0,021	80,5	289,0 ± 17,3
B498-2				
H498-2	0,658	0,021	74,2	276,9 ± 17,7
H498-3	3,793	0,048	96,1	1595,8 ± 40,3 ^a
H498-4	0,720	0,029	81,2	303,7 ± 24,3
B89-1				
K89-1	0,726	0,015	87,9	305,5 ± 12,3
B120-1				
K120-1	0,745	0,018	89,9	313,7 ± 15,6
K120-2	0,778	0,015	93,3	327,7 ± 12,7
B135-1				
K135-1	71,119	0,720	98,8	29689,2 ± 596,3 ^a
K135-2	2,141	0,024	92,5	900,9 ± 20,4 ^a
K135-3	0,736	0,014	77,0	310,0 ± 11,4
B135-2				
K135-4	0,736	0,013	79,1	310,0 ± 11,1
K135-5	2,214	0,026	90,2	931,8 ± 21,5 ^a
K135-6	0,716	0,019	63,3	301,4 ± 16,0

Chaque analyse est une fusion totale au laser d'environ 50 à 80 grains de sanidine. Les échantillons ont été irradiés une heure sous Cd en position 5C dans le réacteur nucléaire de McMaster.

Le facteur j est 0,0002333 ± 0,0000012 pour la sanidine ASC (1,194 ± 0,0004 Ma, [Nomade et al., 2005](#)), utilisé comme standard de flux.

Les données sont présentées selon les recommandations de [Renne et al. \(2009\)](#) et les calculs ont été réalisés à l'aide du programme ArArCALC de [Koppers \(2002\)](#).

^a Calcul de la moyenne pondérée de l'âge excepté ceux des analyses H498-3, K135-1, 2, 5 à cause de la présence de feldspaths contaminants hérités: moyenne pondérée est de 308,2 ± 6,8 ka.

à environ 100 km. Les auteurs ont, en particulier, réalisé des fusions totales sur des échantillons de trois à huit grains de sanidine, dont la moyenne pondérée est de 275 ± 5 ka. Ils ont également réalisé la datation d'un échantillon plus gros de sanidine, par incréments de température (*step-heating*) à l'aide d'un four à induction. Le spectre d'âge obtenu conduit à un âge plateau de 300 ± 2 ka, écarté par les auteurs à cause d'un possible mélange avec des cristaux hérités plus anciens.

On remarque que le résultat à 275 ka n'est pas tout à fait en accord avec l'âge que nous avons obtenu ($308,2 \pm 6,8$ ka).

Le niveau 5b–6–7 d'Orgnac 3 daté par U-Th (MC-ICPMS) serait contemporain du stade isotopique 8–9, mais vu la dispersion des âges (de 261 ± 6 à 305 ± 14 ka), nous ne sommes pas en mesure d'expliquer la différence entre les méthodes U-Th et $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$. Ce travail représente la première intercomparaison en site préhistorique entre deux

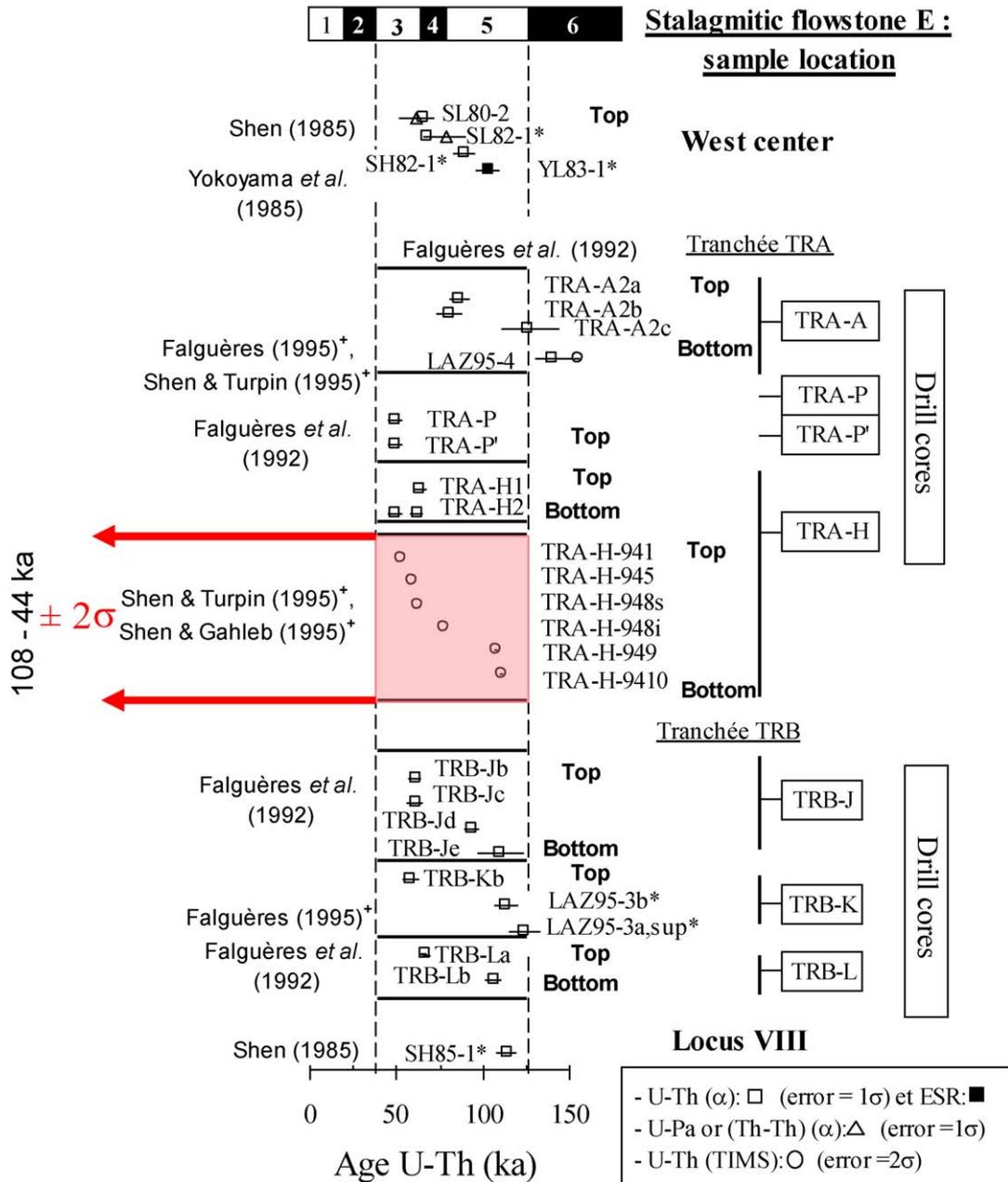


Fig. 4. Représentation graphique des résultats de datation U-Th (par spectrométrie alpha et TIMS), obtenus sur les échantillons de plancher stalagmitique E à différents endroits dans la grotte du Lazaret et à partir des tranchées TRA et TRB (* données non publiées ; en rouge données TIMS, voir Tableau 2 ; données alpha et ESR d'après Shen, 1985 ; Yokoyama et al., 1985 ; Falguères et al., 1992).

Fig. 4. Graphical representation of U-Th dating (alpha spectrometry and TIMS) obtained on samples of the flowstone layer E from different places at Lazaret Cave and from drill cores TRA and TRB (* are unpublished data ; TIMS red data, see Table 2 ; alpha and ESR data after Shen, 1985 ; Yokoyama et al., 1985 ; Falguères et al., 1992).

importantes méthodes de datation (Ludwig et Renne, 2000) et il serait intéressant d'approfondir le sujet. Afin d'affiner les résultats, de nouvelles analyses $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ sont programmées en tentant d'optimiser le nombre de grains pour écarter d'éventuelles pollutions, tout en gardant un signal suffisant à l'analyse.

3.2. La grotte du Lazaret

La grotte du Lazaret se situe à Nice à 26 m d'altitude. Elle est fouillée depuis les années 1950 par H. de Lumley qui y définit quatre principales unités dans la séquence stratigraphique (Lumley de, 1976) : les plages marines A et B à la base, le complexe C et le plancher stalagmitique E au sommet. Les dépôts continentaux du complexe C qui correspondent aux niveaux archéologiques, sont constitués de cailloutis et de blocs enrobés dans une argile rouge de colluvion. Le complexe C a été divisé en trois grands ensembles stratigraphiques (CI, CII et CIII). Les fouilles entreprises depuis 1967 à l'entrée de la grotte ont permis de mettre en évidence 27 unités archéostratigraphiques (UA1 à UA27) dans le remplissage de l'ensemble stratigraphique CIII et du sommet du CII. Ces unités archéostratigraphiques ont été définies à partir de l'étude des projections d'objets sur des plans verticaux (Lumley de et al., 2004). Jusqu'à présent, les niveaux archéologiques du complexe C ont livré 21 restes humains attribués à *H. heidelbergensis*. L'industrie lithique est acheuléenne dans les niveaux inférieurs et évolue vers une industrie moustérienne au sommet du remplissage. Les associations fauniques du site caractérisent dans l'ensemble une période froide de la fin du Pléistocène moyen d'après Valensi et al. (2007). Les datations menées au Lazaret ont été récemment présentées par Michel et al. (2009). Nous présentons ici les conclusions générales qui peuvent être déduites des différentes méthodes de datation appliquées à ce site. Les âges ESR déterminés à partir des dents de cerf montrent que les niveaux archéologiques de l'ensemble C sont contemporains du stade MIS6. La disparition des bifaces est enregistrée dans les dépôts supérieurs, aux alentours de 120 ka. Si on reprend la totalité des analyses U-Th qui ont été réalisées sur les formations stalagmitiques de l'ensemble E qui scellent les derniers dépôts archéologiques (Fig. 5), on constate que la datation U-Th réalisée par TIMS (G. Shen), il y a une quinzaine d'années, au niveau de la tranchée TRA (Fig. 4) est la plus précise et la plus significative (Tableau 2). Les âges décroissent de la



Fig. 5. Localisation des échantillons dans la tranchée TRA-H du plancher stalagmitique E (Zone N21) pour la datation U-Th par TIMS à la grotte du Lazaret.

Fig. 5. Location of the samples drill from the core TRA-H of the flowstone layer E (Zone N21) for U-Th dating using TIMS at Lazaret Cave.

base du plancher au sommet. Ces résultats permettent de situer cette formation épaisse de 30 cm de 108 ka à 44 ka (MIS 5, 4, 3) (Figs. 4 et 5).

3.3. La grotte de Zafarraya

La grotte de Zafarraya se situe au Sud de l'Espagne, en Andalousie, à 1022 m d'altitude. Elle a été découverte par C. Barroso en 1979 et a fait l'objet de nombreuses études pluridisciplinaires publiées récemment sous forme de monographie (Barroso Ruiz, 2003; Barroso Ruiz et de Lumley, 2006). Trois complexes stratigraphiques ont été mis en évidence (supérieur, moyen, inférieur). L'examen des vestiges découverts permet d'inférer l'existence de plusieurs périodes bien différenciées d'occupation pré-historique, du Paléolithique moyen au Néolithique. De par les limites des méthodes de datation que nous utilisons pour comparaison, nous nous sommes intéressés à la datation des niveaux moustériens. Ces dépôts se rapportent au complexe stratigraphique moyen composé de cailloutis, à matrice sablo-limoneuse brun ocre, et pouvant être subdivisé en deux ensembles stratigraphiques I et II dans lesquels 47 unités archéostratigraphiques ont été mises en évidence (Barroso Ruiz et de Lumley, 2006). Ces niveaux ont livré des restes humains néandertaliens dont certains présentaient des témoignages d'un cannibalisme (Barroso Ruiz et al., 2006a; Barroso Ruiz et al., 2006b; Hublin et al., 1996). Geraads (1997), puis Barroso Ruiz et al. (2006c) publient une liste complète des faunes

Tableau 2

Rapports isotopiques U-Th (TIMS) et résultats des âges pour le plancher stalagmitique E du Lazaret: tranchée TRA-H (d'après Shen et Turpin, 1995, Shen et Gahleb, 1995, données non publiées).

Table 2

Mass spectrometric U-Th isotopic ratios and age results for the flowstone layer E at Lazaret Cave: Drill core TRA-H (after Shen and Turpin, 1995, Shen and Gahleb, 1995, unpublished data).

Drill	Zone	Sample	Lab No	U (ppm)	$^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$	$^{230}\text{Th}/^{232}\text{Th}$	$^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$	Age U-Th (ka)
TRA-H	N21	TRA-H-941	SHEN-74	0,2156 ± 0,0005	1,0458 ± 0,0050	44,1 ± 0,5	0,3354 ± 0,0024	44,3 ± 0,4
		TRA-H-945	S-19	0,2037 ± 0,0006	1,0516 ± 0,0047	88,7 ± 0,5	0,3810 ± 0,0027	51,9 ± 0,5
		TRA-H-948s	SHEN-52	0,2163 ± 0,0003	1,0509 ± 0,0036	101,3 ± 0,3	0,3999 ± 0,0018	55,3 ± 0,3
		TRA-H-948i	S-29	0,1930 ± 0,0005	1,0555 ± 0,0039	165,0 ± 1,2	0,4843 ± 0,0037	71,5 ± 0,8
		TRA-H-949	S-30	0,2536 ± 0,0008	1,0281 ± 0,0053	547,1 ± 4,1	0,6208 ± 0,0051	104,8 ± 1,5
		TRA-H-9410	S-20	0,2998 ± 0,0008	1,0406 ± 0,0040	352,0 ± 2,3	0,6332 ± 0,0041	108,0 ± 1,3

Les erreurs sont à deux sigma.

de grands mammifères. La principale espèce est *Capra pyrenaica*. Il y a maintenant plus d'une dizaine d'années qu'une première série de datations par la méthode U-Th sur des dents de *Capra* et par la méthode conventionnelle du carbone-14 sur os a été publiée (Hublin et al., 1995). Nous résumons ici l'ensemble des résultats de datation du site. À l'époque, les auteurs considèrent une bonne concordance entre les deux méthodes et concluent à la présence tardive, il y a 30 000 ans, des néandertaliens au Sud de la Péninsule ibérique (Hublin et al., 1995). Les âges U-Th sont compris entre $25\,100 \pm 1300$ ans et $33\,400 \pm 2000$ ans (couche D) et les âges non calibrés obtenus par la méthode ^{14}C sont respectivement de $29\,800 \pm 600$ BP (Gif-9140-II) et $31\,800 \pm 550$ BP (Gif/LSM-9140-I) (Fig. 6 1). Nous avons augmenté le nombre d'analyses en sélectionnant des échantillons de charbons de bois, des os et des dents, pour datation au ^{14}C par spectrométrie de masse avec accélérateur (AMS) au laboratoire d'Oxford (Fig. 6 2). Les résultats se sont avérés bien différents, puisqu'il y a une dispersion des âges et parfois les âges sont très jeunes. Les âges ^{14}C non calibrés sont compris entre 595 ± 35 ans (OxA-7134) pour le plus jeune et $36\,900 \pm 3000$ ans BP (OxA-7117) pour le plus ancien. Des contaminations par le carbone actuel sont certainement la cause de ces rajeunissements. Par

conséquent, seules les datations non calibrées les plus anciennes sont considérées comme étant les plus correctes et valables. Elles sont de $36\,900 \pm 3000$ ans BP (OxA-7117), de $36\,700 \pm 1400$ ans BP (OxA-9001) et de $34\,600 \pm 800$ ans BP (OxA-9002) pour trois charbons de bois (Fig. 6 2). Les âges de ces charbons de bois sont non calibrés et l'âge vrai est donc plus grand, de 2 à 6 ka, selon les hypothèses sur la courbe de calibration (Bard et al., 2004). Une dispersion des âges U-Th par spectrométrie alpha est obtenue du fait de l'analyse d'un grand nombre de restes fauniques (22 échantillons) : les âges sont compris entre 5 ka et 60 ka (Fig. 6 3). La datation U-Th des restes fauniques osseux et dentaires est connue pour conduire à une dispersion des âges U-Th, du fait des systèmes ouverts qu'ils représentent (Eggins et al., 2005; Michel et Yokoyama, 2001). La bonne concordance entre les méthodes U-Th et U/Pa permettrait de vérifier la fermeture du système. À Zafarraya, l'émail dentaire n'étant pas analysable par spectrométrie alpha à cause de sa faible teneur en uranium, la datation U-Th a été réalisée par spectrométrie de masse à ionisation thermique (TIMS, collaboration E. Bard, Cerege, Aix-en-Provence). Les âges obtenus sont aussi dispersés, compris entre 16 ka et 53 ka (Fig. 6 3). Il est préférable d'appliquer la méthode ESR à l'émail dentaire bien conservé (Michel et al., 1999; Michel

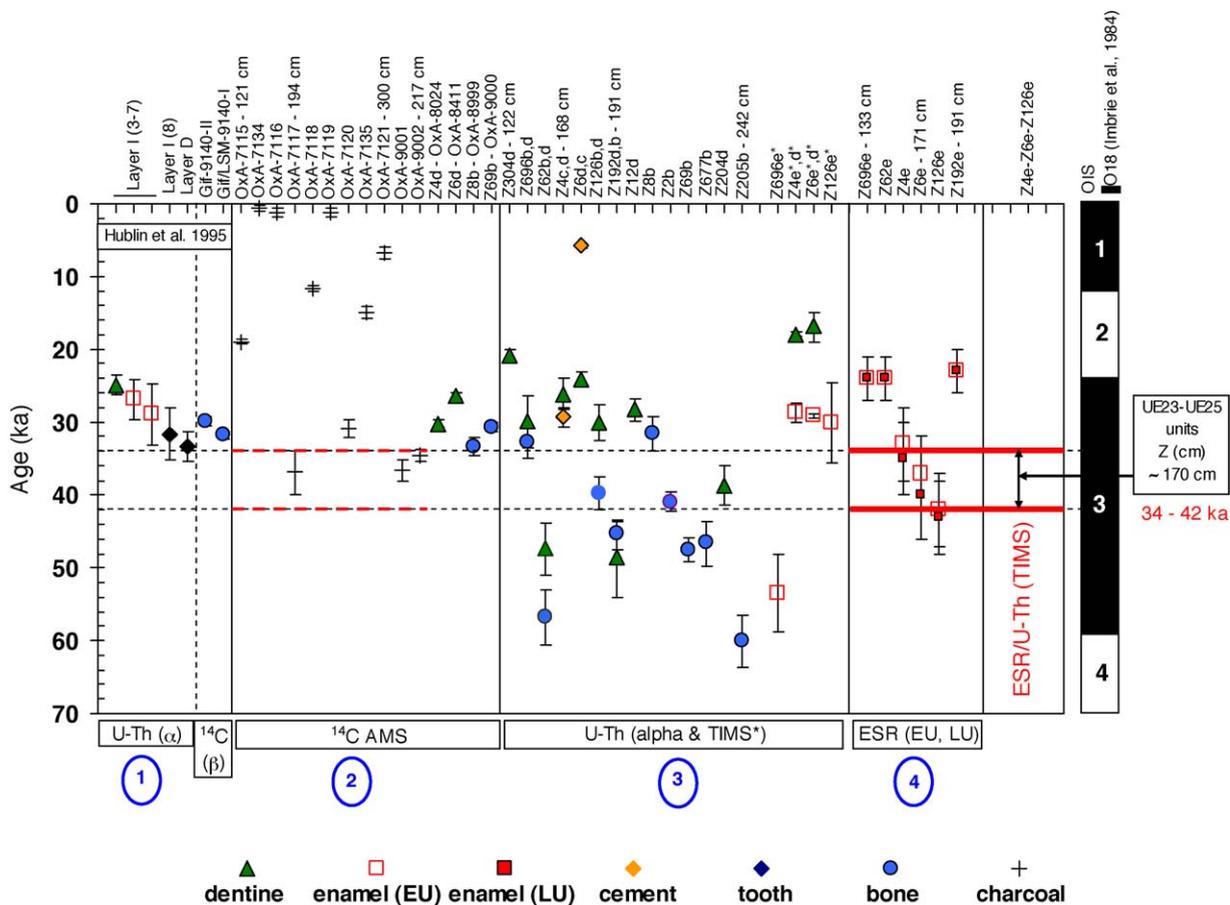


Fig. 6. Datation de la grotte de Zafarraya.
 Fig. 6. Dating data of Zafarraya Cave.

et al., 2004). C'est aussi, le biomatériau, à 98 % d'apatite, le moins poreux et le moins altérable (Michel et Yokoyama, 2001; Michel et al., 1995; Michel et al., 1996). Les âges ESR (EU, early uptake) et (LU, linear uptake) sont compris entre 23 ka et 43 ka (Fig. 6 4). De par les faibles teneurs en uranium mesurées dans l'émail ($\sim 0,02$ ppm) et la dentine (~ 2 ppm), les deux modes EU et LU conduisent à des âges très proches (Fig. 6 4). La bonne concordance des deux méthodes de datation U-Th et ESR a été obtenue pour trois échantillons d'émail (Z4e, Z6e, deux dents de cheval, Z126e une dent de *Capra*). Ainsi, la méthode ESR/U-Th combinée (Grün, 2007; Grün et al., 1988) indique ici des migrations d'uranium comprises entre le mode EU et le mode LU. À partir de ce résultat, nous pouvons conclure que les moyennes pondérées déterminées à partir des âges ESR EU et LU de ces trois échantillons sont respectivement les suivantes : 37 ± 3 ka et 39 ± 3 ka. Elles permettent de situer chronologiquement les niveaux moustériens entre 42 et 34 ka (Fig. 6 4), période contemporaine du stade MIS 3. Ces datations sont en accord avec les datations ^{14}C non calibrées et les plus anciennes citées ci-dessus (Fig. 6 2).

4. Conclusion

Les datations préliminaires menées à Orgnac 3, un site de référence pour l'apparition du débitage levallois en association avec des restes d'*H. heidelbergensis*, indiquent un âge contemporain des stades MIS 8–9 pour les spéléothèmes du niveau médian 5b–6–7. L'âge $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ du niveau supérieur 2 obtenu est de $308,2 \pm 6,8$ ka; ce résultat constitue une datation préliminaire de ce niveau. À l'heure actuelle, nous ne sommes pas en mesure de distinguer les datations U-Th des spéléothèmes du niveau 5b–6–7, stratigraphiquement antérieurs, des datations Ar/Ar du niveau 2.

H. heidelbergensis est toujours présent dans cette région du Sud de la France, au Lazaret, entre 190 ka et 120 ka (MIS 6), avec une industrie lithique qui évolue de

l'Acheuléen au pré-Moustérien, à une période plus tardive qu'à Orgnac 3 (Fig. 7). À Zafarraya, la multiplicité des analyses par les méthodes ^{14}C , U-Th et ESR indique que les niveaux dans lesquels ont été découverts des restes de néandertaliens tardifs, associés à une industrie moustérienne, sont compris entre 42 et 34 ka (MIS 3) (Fig. 7).

Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier Jean Combié et Samir Khatib (Laboratoire du Lazaret, Nice) pour leur aide lors des prélèvements des échantillons à Orgnac 3 et Michel Manetti pour la séparation des sanidines aux liqueurs denses (Géoazur, Nice), le Professeur Henry de Lumley pour l'étude des sites du Lazaret et de la grotte de Zafarraya. Nous remercions également Cécilio Barroso pour les échantillons de Zafarraya ainsi que Salah Abdessadok (IPH, MNHN, Paris) et Christian Perrenoud (Cerp, Tautavel). Cet article fait suite au Colloque organisé en octobre 2008 et financé par la Fondation des Treilles (Tourtour, Var, France) que nous tenons à remercier. Enfin, nous remercions les deux rapporteurs Pierre Guibert et Marie-Hélène Moncel pour leurs remarques constructives.

Références

- Adler, D.S., Bar-Yosef, O., Belfer-Cohen, A., Tushabramishvili, N., Boaretto, E., Mercier, N., Valladas, H., Rink, W.J., 2008. Dating the demise: neanderthal extinction and the establishment of modern humans in the southern Caucasus. *J. Hum. Evol.* 55, 817–833.
- Aouraghe, H., 1992. Les faunes de grands mammifères du site Pléistocène moyen d'Orgnac 3 (Ardèche, France): étude paléontologique et paléolithographique, implications paléocologiques et biostratigraphiques, Phd thesis, Muséum National d'Histoire Naturelle, Paris, 492 p.
- Banks, W.E., d'Errico, F., Peterson, A.T., Kageyama, M., Sima, A., Sanchez-Goni, M.F., 2008. Neanderthal extinction by competitive exclusion. *PLoS ONE* 3, 1–8.
- Bard, E., Rostek, F., Ménot-Combes, G., 2004. A better radiocarbon clock. *Science* 303, 178–179.
- Barrandon, J.N., Guibert, P., Michel, V., 2001. Actes des XXI^e Rencontres internationales d'archéologie et d'histoire d'Antibes, 19–21 octobre 2000, Antibes, ADPCA.
- Barroso Ruiz, C., 2003. El Pleistoceno Superior de la Cueva del Boquete de Zafarraya. *Arqueología Monografías*, Junta de Andalucía (Ed.).
- Barroso Ruiz C., de Lumley H., 2006. La grotte du Boquete de Zafarraya, Malaga, Andalousie. *Consejería de Cultura, Junta De Andalucía* (Ed.).
- Barroso Ruiz, C., de Lumley, M.A., Moigne, A.M., Riquelme Cantal, J.A., Echassoux, A., Valensi, P., 2006a. Les restes humains néandertaliens et *Homo sapiens* de la grotte du Boquete de Zafarraya. In: Barroso Ruiz, C., de Lumley, H. (Eds.), *La grotte du Boquete de Zafarraya*, Malaga, Andalousie, Tome III. *Consejería de Cultura, Junta De Andalucía*, pp. 1167–1396.
- Barroso Ruiz, C., de Lumley, M.A., Moigne, A.M., Riquelme Cantal, J.A., Echassoux, A., Valensi, P., 2006b. Signification paléolithologique des restes humains néandertaliens et de *H. sapiens* de la grotte du Boquete de Zafarraya: taphonomie, fracturation, traces de découpe, combustion. In: Barroso Ruiz, C., de Lumley, H. (Eds.), *La grotte du Boquete de Zafarraya*, Malaga, Andalousie, Tome III. *Consejería de Cultura, Junta De Andalucía*, pp. 1423–1480.
- Barroso Ruiz, C., Riquelme Cantal, J.A., Moigne, A.M., Banes, L., 2006c. Les faunes de grands mammifères du Pléistocène supérieur de la grotte du Boquete de Zafarraya. *Étude paléontologique, paléocologique et archéozoologique*. In: Barroso Ruiz, C., de Lumley, H. (Eds.), *La grotte du Boquete de Zafarraya*, Malaga, Andalousie, Tome II. *Consejería de Cultura, Junta De Andalucía*, pp. 675–891.
- Combié, J., 1967. Le Paléolithique de l'Ardèche dans son cadre bioclimatique. *Mémoire n° 4*, Bordeaux: Delmas.
- Combié, J., 2000. Le gisement d'Orgnac 3 (Ardèche, France) Pléistocène moyen. *Stades isotopiques 9–10. AFEQ*, 66–75.
- Debard, E., Pastre, J.F., 1988. Un marqueur chronostratigraphique du Pléistocène moyen à la périphérie du Massif central: la retombée à

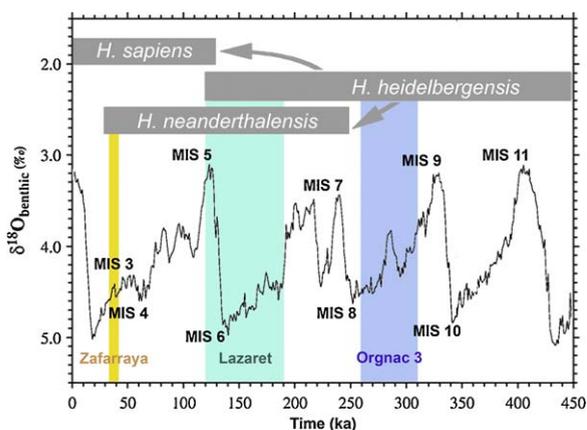


Fig. 7. Courbe $\delta^{18}\text{O}$ des foraminifères benthiques d'après Lisiecki et Raymo (2005) et d'après Scaillet et al. (2008) avec modifications. Les barres verticales colorées indiquent les datations d'Orgnac 3, du Lazaret et de Zafarraya.

Fig. 7. Stacked $\delta^{18}\text{O}$ record of benthic foraminifera from Lisiecki and Raymo (2005) and after Scaillet et al. (2008) with modifications. The colored vertical envelopes show the Orgnac 3, Lazaret and Zafarraya dating results.

- clinopyroxène vert du Sancy dans le site acheuléen d'Orgnac III (Bas-Vivarais, SE. France). C. R. Acad. Sci. Paris Ser. II 306, 1515–1520.
- Deino, A.L., Renne, P.R., Swisher III, C.C., 1998. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating in paleoanthropology and archaeology. *Evol. Anthropol.* 6, 63–75.
- D'Errico, F., Sanchez Goni, M.F., 2003. Neandertal extinction and the millennial scale climatic variability of OIS3. *Quat. Sci. Rev.* 22, 769–788.
- Eggins, M.S., Grün, R., McCulloch, M.T., Pike, A.W.G., Chappell, J., Kinsley, L., Mortimer, G., Shelley, M., Murray-Wallace, C.V., Spotl, C., Taylor, L., 2005. In situ U-series dating by laser-ablation multicollector ICPMS: new prospects for Quaternary geochronology. *Quat. Sci. Rev.* 24, 2523–2538.
- Falguères, C., de Lumley, H., Bischoff, J.L., 1992. U-Series dates for stalagmitic flowstone E (Riss/Würm interglaciation) at grotte du Lazaret, France. *Quat. Res.* 38, 227–233.
- Falguères, C., Shen, G., Yokoyama, Y., 1988. Datation de l'Aven d'Orgnac III : comparaison par les méthodes de la résonance de spin électronique (ESR) et du déséquilibre des familles de l'uranium. *L'Anthropologie* 92, 727–730.
- Féraud, G., Lo Bello, P., Hall, M., Cantarel, C., York, J.M., Bernat, D.M., 1990. Direct dating of Plio-Quaternary pumices by $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ step-heating and single-grain laser fusion methods: the example of the Monts-Dore massif (Massif Central, France). *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 40, 39–53.
- Finlayson, C., Pachero, F.G., Rodriguez-Vidal, J., Fa, D.A., Gutierrez Lopez, J.M., Santiago Perez, A., Finlayson, G., Allue, E., Preysler, J.B., Caceres, I., Carrion, J.S., Fernandez Jalvo, Y., Gled-Owen, C.P., Jimenez Espejo, F.J., Lopez, P., Lopez Saez, J.A., Riquelme Cantal, J.A., Sanchez Marco, A., Guzman, F.G., Brown, K., Fuentes, N., Valarino, C.A., Villalpando, A., Stringer, C.B., Ruiz, F.M., Sakamoto, T., 2006. Late survival of Neanderthals at the southernmost extreme of Europe. *Nature* 443, 850–853.
- Geraads, D., 1997. La Grande faune associée aux derniers Néandertaliens de Zafarraya (Andalousie, Espagne) systématique et essai d'interprétation. C. R. Acad. Sci. Paris Ser. Ila 325, 725–731.
- Grün, R., 2007. Electron Spin Dating. *Encyclopedia of Quaternary Science*, 1505–1516.
- Grün, R., 2009. The DATA program for the calculation of ESR age estimates on tooth enamel. *Quat. Geochronol.* 4, 231–232.
- Grün, R., Schwarz, H.P., Chadam, J.M., 1988. ESR dating of tooth enamel: coupled correction for U-uptake and U-series disequilibrium. *Nucl. Tracks. Radiat. Meas.* 14, 237–241.
- Hedges, R.E.M., Van Klinken, G.J., 1992. A review of current approaches in the pretreatment of bone for radiocarbon dating by AMS. *Radiocarbon* 34, 279–291.
- Hublin, J.J., Barroso Ruiz, C., Medina Lara, P., Fontugne, M., Reyss, J.L., 1995. The mustertian site of Zafarraya (Andalucía, Spain): dating and implications on the Palaeolithic peopling processes of western Europe. C. R. Acad. Sci. Paris Ser. Ila 321, 931–936.
- Hublin, J.J., Spoor, F., Braun, M., Zonneveld, F., Condemi, S., 1996. A late Neanderthal associated with upper Palaeolithic artefacts. *Nature* 381, 224–226.
- Jourdan, F., Vêrati, C., Féraud, G., 2006. Intercalibration of the $\text{Hb3gr } ^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating standard. *Chem. Geol.* 231, 177–189.
- Khatib, S., 1989. Le site d'Orgnac 3 (Ardèche, France). Étude sédimentologique et géochimique, Cadre chronologique et évolution paléoclimatique, PhD thesis, Muséum National d'Histoire Naturelle, Paris, 209 p.
- Khatib, S., 1994. Datation des cendres volcaniques et analyses géochimiques du remplissage d'Orgnac 3 (Ardèche, France). *Quaternaire* 5, 13–22.
- Koppers, A.A.P., 2002. ArArCALC-software for $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ age calculations. *Comput. Geosci.* 28, 605–619.
- Lisiecki L.E., Raymo M.E., 2005. A Plio-Pleistocene Stack of 57 Globally Distributed Benthic $\delta^{18}\text{O}$ Records, *Paleoceanography*, PA1003, doi:10.1029/2004PA001071.
- Ludwig K.R., Renne P.R., 2000. Geochronology on the Paleoanthropological Time Scale. *Evol. Anthropol.* 101–110.
- Lumley de H., 1976. Grotte du Lazaret. In: Sites paléolithiques de la région de Nice et grottes de Grimaldi, IXth U.I.S.P.P. Meeting, B1 Nice, France, pp. 53–75.
- Lumley de H., Lordkipanidze, D., Féraud, G., Garcia, T., Perrenoud, C., Falguères, C., Gagnepain, J., Saos, T., Voinchet, P., 2002. Datation par la méthode $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ de la couche volcanique (couche VI) de Dmanisi (Géorgie) qui a livré des restes d'hominidés fossiles de 181 ma. C. R. Palevol. 1, 181–189.
- Lumley de H., et al., 2004. Le sol d'occupation acheuléen de l'unité archéostratigraphique UA 25 de la grotte du Lazaret. Édition Edisud, Nice, Alpes-Maritimes, 493 p.
- Masaoudi H., 1995. Application des méthodes du déséquilibre des familles de l'uranium ($^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$) et de la résonance de spin électronique (ESR) à la datation des sites d'Orgnac 3, Payre et de l'abri des Pêcheurs (Ardèche), Phd thesis, Muséum National d'Histoire Naturelle, Paris, 155p.
- Michel, V., Yokoyama, Y., 2001. Méthodes U-Th/ESR en Préhistoire et problèmes d'altération des matériaux: exemple de la datation des carbonates et apatites de la grotte du Lazaret. In: Barrandon, J.N., Guibert, P., Michel, V. (Eds.), *Datation. Actes des XXI^e Rencontres internationales d'archéologie et d'histoire d'Antibes*. 19–21 octobre 2000, Antibes, APDCA, pp. 187–205.
- Michel, V., Ildefonse, P., Morin, G., 1995. Chemical and structural changes in *Cervus elaphus* tooth enamels during fossilization (Lazaret cave): a combined IR and XRD Rietveld analysis. *Appl. Geochem.* 10, 145–159.
- Michel, V., Ildefonse, P., Morin, G., 1996. Assessment of archaeological bone and dentine preservation from Lazaret cave (Middle Pleistocene) in France. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.* 126, 109–119.
- Michel, V., Loch, J.L., Antoine, P., Masaoudi, H., Falguères, C., Yokoyama, Y., 1999. Datation ESR/U-Th combinée des restes fauniques du site moustérien de plein air de Beauvais. C. R. Acad. Sci. Paris Ser. Ila 329, 369–375.
- Michel, V., Shen, G., Valensi, P., de Lumley, H., 2009. ESR dating of dental enamel from Middle Palaeolithic levels at Lazaret Cave, France. *Quat. Geochronol.* 4, 233–240.
- Michel, V., Yokoyama, Y., Loch, J.L., 2004. Datation ESR/U-Th de dents des niveaux moustériens de Beauvais et de Bettencourt : étude comparative. *BAR Int. Ser.* S1270, 9–16.
- Moncel, M.H., Moigne, A.M., Combier, J., 2005. Pre-Neandertal behavior during isotopic stage 9 and the beginning of stage 8. New data concerning fauna and lithics in the different occupation levels of Orgnac 3 (Ardèche, South-East France): occupation types. *J. Archaeol. Sci.* 32, 1283–1301.
- Nomade, S., Renne, P.R., Vogel, N., Deino, A.L., Sharp, W.D., Becker, T.A., Jaouni, A.R., Mundil, R., 2005. Alder Creek sanidine (ACS-2): a Quaternary $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating standard tied to the Cobb Mountain geomagnetic event. *Chem. Geol.* 218, 315–338.
- Renne, P.R., Deino, A.L., Hames, W.E., Heizler, M.T., Hemming, S.R., Hodges, K.V., Koppers, A.A.P., Mark, D.F., Morgan, L.E., Philipps, D., Singer, B.S., Turrin, B.D., Villa, I.M., Villeneuve, M., Wijbrans, J.R., 2009. Data reporting norms for $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronology. *Quat. Geochronol.* 4, 346–352.
- Roger, S., Féraud, G., de Baulieu, J.L., Thouveny, N., Coulon, C., Cocheme, J.J., Andrieu, J., Williams, T., 1999. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating on tephra of the Velay maars (France): implications for the Late Pleistocene proxy-climatic record. *Earth Planet. Sci. Lett.* 170, 287–299.
- Scaillet, S., Vita-Scaillet, G., Guillou, H., 2008. Oldest human footprints dated by Ar/Ar. *Earth Planet. Sci. Lett.* 275, 320–325.
- Shen, G., 1985. Datation des planchers stalagmitiques de site acheuléens en Europe par les méthodes des déséquilibres des familles de l'uranium et contribution méthodologique, PhD thesis, Muséum National d'Histoire Naturelle, Paris, 162 p.
- Shen, C.C., Kano, A., Hori, M., Lin, K., Chiu, T.C., Burr, G.S., 2010. East Asian monsoon evolution and reconciliation of climate records from Japan and Greenland during the last deglaciation. *Quat. Sci. Rev.* 29, 3327–3335.
- Shen, G., Ku, T.L., Gahleb, B., Yuan, Y., 1996. Preliminary results on U-series dating of Pekin man site with high precision TIMS. *Acta Anthropol. Sin.* 15, 210–217.
- Shen, G.J., Ku, T.L., Cheng, H., Edwards, R.L., Yuan, Z.X., Wang, Q., 2001. High-precision U-series dating of Locality 1 at Zhoukoudian. *China J. Hum. Evol.* 41, 676–688.
- Shen, C.C., Li, K.S., Sieh, K., Natawidjaja, D., Cheng, H., Wang, X., Edwards, R.L., Lam, D.D., Hsieh, Y.T., Fan, T.Y., Meltzner, A.J., Taylor, F.W., Quinn, T.M., Chiang, H.W., Kilbourne, H., 2008. Variation of initial $^{230}\text{Th}/^{232}\text{Th}$ and limits of high precision U-Th dating of shallow-water corals. *Geochim. Cosmochim. Acta* 72, 4201–4223.
- Valensi, P., Bailon, S., Michel, V., Desclaux, E., Rousseau, L., Onorotini, G., Genty, D., Blamart, D., de Lumley, H., 2007. Cadre climatique et environnemental des acheuléens de la grotte du Lazaret, à Nice. Données paléontologiques, biogéochimiques et radiométriques établies sur les faunes de vertébrés et d'invertébrés. *Archéosciences* 31, 137–150.
- Vêrati, C., Rapaille, C., Féraud, G., Marzoli, A., Bertrand, H., Youbi, N., 2007. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ ages and duration of the Central Atlantic Magmatic Province volcanism in Morocco and Portugal and its relation to the Triassic–Jurassic boundary. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.* 244, 308–325.
- Yokoyama, Y., Falguères, C., Quaegebeur, J.P., 1985. ESR dating of quartz from Quaternary sediments: first attempt. *Nucl. Tracks* 10, 921–928.