



Paléontologie générale (Taphonomie et fossilisation)

Datations U/Th (TIMS) et ^{14}C (AMS) des stalagmites de la grotte Chauvet (Ardèche, France) : intérêt pour la chronologie des événements naturels et anthropiques de la grotte

Dominique Genty ^{a,*}, Bassam Ghaleb ^b, Valérie Plagnes ^{a,c}, Christiane Causse ^d,
Hélène Valladas ^a, Dominique Blamart ^a, Marc Massault ^e,
Jean-Michel Geneste ^f, Jean Clottes ^g

^a *Laboratoire des sciences du climat et de l'environnement, UMR CEA/CNRS 1572, bât. 709, L'Orme des Merisiers, CEA Saclay, 91191 Gif-sur-Yvette cedex, France*

^b *GEOTOP, UQAM, CP 8888, succ. Centre-Ville, H3C 3P8, Montréal, Canada*

^c *UMR Sisyphe 7619, université Paris-6, cc 123, 4, place Jussieu, 75252 Paris cedex, France*

^d *Laboratoire de Moulis, CNRS (FRET), 09200 Saint-Girons, France*

^e *Laboratoire d'hydrologie et de géochimie isotopique, université Paris-11, 91400 Orsay cedex, France*

^f *Drac Aquitaine, ministère de la Culture, SRA, 33000 Bordeaux*

^g *11, rue du Fourcat, 09000 Foix, France*

Reçu le 5 janvier 2004 ; accepté après révision le 1 juin 2004

Disponible sur internet le 19 août 2004

Présenté par Philippe Taquet

Résumé

Huit stalagmites, deux planchers stalagmitiques ainsi que des charbons de bois trouvés piégés sous les concrétionnements prélevés dans la grotte Chauvet (Vallon-Pont-d'Arc, Ardèche) ont été datés par des méthodes radiométriques par spectrométrie de masse (U/Th et ^{14}C). Les résultats donnent des jalons chronologiques précis de l'histoire de la grotte et confirment aussi, pour certains, l'âge avancé des charbons de bois. Ils montrent également quelles ont été les périodes climatiques favorables à la croissance des stalagmites. **Pour citer cet article : D. Genty et al., C. R. Palevol 3 (2004).**

© 2004 Académie des sciences. Publié par Elsevier SAS. Tous droits réservés.

Abstract

TIMS U/Th and ^{14}C AMS ages of the Chauvet cave stalagmites: interest for the chronology of natural and human events of the cave. Eight stalagmites, two flowstones and several pieces of charcoal found trapped under the speleothems from the Chauvet cave (Vallon-Pont-d'Arc, Ardèche, France) have been dated by radiometric mass spectrometric methods (U/Th et

* Auteur correspondant.

Adresse e-mail : genty@lsce.saclay.cea.fr (D. Genty).

¹⁴C). Results give accurate ages for some geological features of the cave, and, for some of them, confirm the old ages of the prehistoric charcoal. They also indicate the timing of the climatic periods that were favourable to the stalagmites growth. **To cite this article:** D. Genty et al., C. R. Palevol 3 (2004).

© 2004 Académie des sciences. Publié par Elsevier SAS. Tous droits réservés.

Mots clés : Grotte Chauvet ; Spéléothème ; Stalagmite ; Datation uranium–thorium ; Karst ; France

Keywords: Chauvet cave; Speleothem; Uranium–thorium ages; Radiocarbon; Karst; France

Abridged English version

1. Introduction

The discovery of the Chauvet Cave (Vallon-Pont-d'Arc, Ardèche, southern France), in December 1994, is a revolution for prehistoric-art history. The paintings discovered are among the oldest known on Earth (from 25 to 33 ka BP; [19,34]) and are among the most sophisticated from their style and techniques [10–12]. Beside the paintings, there are numerous remains in the Chauvet Cave; especially cave bear bones, charcoal, flint tools etc. Some of these remains are covered by speleothems (stalagmites and flowstones) that can be accurately dated with uranium series methods, especially by Thermal Ionisation Mass Spectrometry (TIMS; [30]). But stalagmites have also grown on the entrance collapse, which was a main event in the Chauvet Cave's history, because it closed the entrance and then prevented any intrusion into it and preserved the prehistoric remains. We present here results of TIMS U/Th analyses of the Chauvet cave, which give minimum ages for the entrance collapse, the Hillaire Chamber collapse, and for some prehistoric charcoal that were found trapped under the studied speleothems. It also gives the timing of speleothem growth periods during the last 35 ka.

2. Sample localization and methods

The Chauvet Cave's entrance is localized in the Lower Cretaceous limestone cliffs in the Ardèche River canyon ($L = 44.23^\circ\text{N}$; $l = 4.26^\circ\text{E}$; 240 m asl). The eight studied stalagmites and the two flowstones have been taken close to the pathway that was put in since the discovery of the cave; they are spread all over the cave (Fig. 1; Table 1).

We have used the TIMS U/Th method because it is less destructive and because 300 to 2000 mg of calcite

are only necessary. Dated samples represent between 5 and 50 years of calcite deposition, which is less than the analytical errors for most of the stalagmites, but which can be much larger for flowstones whose growth rate is slower. U/Th dating have been made by two different laboratories: the LSCE (Gif-sur-Yvette, France; V.P., Ch.C.) for Chau-stm1, Chau-stm2 and Chau-stm3, and GEOTOP (Canada; B.G.) for all the other samples. Details of the methods can be found in [21,32]. We only recall that a ²³²Th correction has been performed when necessary in order to take into account the detrital origin of the ²³⁰Th. Final error is given at 2 σ .

3. Results and discussion

3.1. Speleothem growth-rate chronology

Twenty-nine TIMS U/Th have been made on the Chauvet Cave's speleothems (Tables 1 and 2). Ages, from 32.9 to 0.3 ka, can be classified in four growth periods (Fig. 2). The first one, before 24 ka, corresponds to the end of MIS (marine isotopic stage) 3 where Chau-stm6 and Chau-pl1 started to grow (Fig. 2). The second growth period starts at the well-known Bølling-Allerød (BA) transition around 15 ka with the beginning of Chau-pl2, Chau-stm3 and Chau-stm2 growth and the restart of Chau-stm6 growth (Fig. 3). The third growth period is coincident with the end of the Younger Dryas at 11.5 ka with the starts of Chau-stm8 and Chau-stm5. Finally, the last period of growth appears around 5 ka (Chau-stm1, Chau-stm4 and Chau-stm7) and could be linked with the end of the Atlantic humid period.

But the most important characteristic of these U/Th age results is the long period without any stalagmite deposition between 24.5 ± 1 and 15 ± 1 ka (Figs. 2 and 3). At the same time, the sea level is low [31] (Fig. 2), methane in the atmosphere, measured in ice core trap-

ped air, is low [8], which demonstrates that, during this period, climate was extremely cold, at least at high and mid latitudes. In order to grow, speleothems need seepage water and vegetation above the cave in order to produce enough CO₂ so that limestone dissolution is possible. Growth rates are mainly controlled by the seepage water [Ca] content, flow rate and temperature [16]. Consequently, speleothems do not grow during cold stages, especially at places where water or vegetation is not available. Frequency distribution of numerous U/Th ages of speleothems from northwestern Europe shows that speleothems are extremely rare around 20 ka [2,25]. In a southwestern France cave (Villars, Dordogne; at the same latitude as the Chauvet Cave) where many stalagmites have been dated with TIMS U/Th, no samples grew between 16 ± 1 and 32 ± 1 ka [23,24]. Thus, it appears that after 25 ka and before 16 ka, it is very likely that no stalagmites grew in the Chauvet caves.

3.2. Entrance collapse age

In order to have an idea of the age and of the dynamics of the entrance collapse, two small stalagmites have been sampled: one at the top and one at the base. Dating results of the first layers of calcite that developed a few millimetres above the limestone blocks show that the collapse basis is older than $11\,500 \pm 172$ yr and that the collapse top is older than 5797 ± 92 yr (Table 2). Consequently, the entrance collapse is older than the Pre-Boreal transition. Previous studies have linked the entrance collapses of southern France caves to tectonics and to cold stages [6,17], which might be the case for the Chauvet Cave too (YD or Last Glacial Maximum). But, because no stalagmite from under the collapse of the Chauvet cave was dated in order to give a maximum age, the exact age of the collapse is still unknown. Moreover, ages obtained in numerous archaeological remains, such as charcoal and paintings and animals bones, suggest that the cave has not been visited by humans after at least 24 ka BP [11,12,34] or by animals after at least 22 ka BP [7]. Only more ages from other samples taken on the entrance collapse will give a better idea of the timing of this event.

3.3. Hillaire Chamber collapse chronology

In the Hillaire Chamber, near the bottom of the Chauvet cave, there is a 10-m-large collapse of the

floor and of the flowstone that covers it (Fig. 1). Inside this pit, detrital sediments and archaeological remains (cave bear bones) are visible on a height of more than 2 m; they are sealed by a 5-cm-thick flowstone. U/Th ages made at the base and at the top of this flowstone show that the archaeological floor, at least in this part of the cave, was covered with calcite deposits as early as 28 ka (Table 2). A piece of charcoal found just under this flowstone was dated by AMS ¹⁴C and gave an age of $30\,020 \pm 350$ yr BP (Table 3). Both flowstone and charcoal ages are in agreement with each other and demonstrate that prehistoric charcoal are older than 28 ka (AMS ¹⁴C ages are conventional and not calibrated, but recent works on radiocarbon calibration over this period demonstrates that actual ages are older from 3 to 5 ka than conventional ages; [3,29,35]). The U/Th age of the top of Chau-p11 flowstone suggests that the Hillaire Chamber collapse occurred after 7.7 ka, but, because of the age uncertainty due to the high content of detrital thorium, this age must be checked by other measurements. The comparison between the U/Th ages of the base of the speleothems and of the ¹⁴C ages of the charcoals that were trapped under them shows that the no-deposition time (of speleothem and of archaeological material) varied from 2230 yr to more than 15 400 yr (Tables 2 and 3).

4. Conclusion

TIMS U/Th dating of the Chauvet Cave stalagmites and flowstones brings the following results:

- since 33 ka, several periods of stalagmite growth are observed and are coincident with climatic improvements; but it appears from this first set of analyses that no deposition occurred between 24.5 ± 0.5 ka and 15.5 ± 0.5 ka because the climate was too cold;
- U/Th ages of the stalagmites that grew at the basis and at the top of the entrance collapse of the cave demonstrate that this collapse seems to have occurred before the end of the Younger Dryas, but more analyses on other stalagmites from the entrance collapse are necessary in order to confirm or not this hypothesis, especially because other ages obtained on archaeological remains indicate an older closing of the cave;
- the 10-m-large collapse of the Hillaire Chamber occurred after 7.7 ka and the flowstone that seals the archaeological deposits of this part of the cave star-

ted to grow around 27.8 ± 1.9 ka;

- the comparison between speleothem U/Th and charcoals ^{14}C ages demonstrates that the prehistoric charcoals are older than 30 ka, at least for the Croisillons Gallery and very likely for the Hillaire Chamber.

1. Introduction

La découverte de la grotte Chauvet (Vallon-Pont-d'Arc, Ardèche), en décembre 1994 à proximité du pont d'Arc, a constitué une révolution dans l'histoire de l'art préhistorique, puisqu'elle a livré des peintures préhistoriques d'un style très élaboré, qui sont parmi les plus anciennes connues au monde [10–12]. Les âges mesurés par la méthode du ^{14}C par spectrométrie de masse (AMS, UMS Tandétron, Gif-sur-Yvette) sur les charbons trouvés au sol et sur quelques peintures ont fourni deux ensembles de dates : le premier est compris entre 25 et 27 ka BP, et le second entre 30 et 33 ka BP [19,34]. Ces âges sont conventionnels, c'est-à-dire qu'ils ne sont pas corrigés de l'activité initiale du ^{14}C atmosphérique. Même si les courbes de calibration du radiocarbone sont encore peu précises au-delà de 20 ka BP, il est certain que les âges réels sont en fait plus vieux de 2 à 6 ka que les âges conventionnels obtenus. Mais la grotte Chauvet renferme aussi une multitude de restes observés directement à la surface du sol : faune (ours principalement), empreintes de pas humains et d'ours, foyers et outils de silex. Une partie de ces témoignages sont recouverts par des concrétions de calcite prenant la forme de planchers stalagmitiques et de stalagmites. Or, l'intérêt majeur de ces concrétions est de pouvoir être datées par une méthode indépendante de celle du radiocarbone : la méthode uranium–thorium (U/Th) par spectrométrie de masse par thermo-ionisation (TIMS) [30]. Ainsi, il est possible de « post-dater » (donner un âge minimum) certains éléments de la grotte recouverts par la calcite, que ce soient des objets archéologiques comme les charbons de bois, ou l'effondrement de la salle Hillaire (soutirage à l'emporte-pièce de 10 m de diamètre), ou l'éboulis de la salle d'entrée. Ce dernier constitue un événement majeur dans l'histoire de la grotte, puisqu'il l'a isolée de l'extérieur, au moins en ce qui concerne les gros animaux et l'homme. Mais ces âges minimums doivent être interprétés avec précaution, car un laps de

temps important peut exister entre les derniers dépôts au sol (charbon, blocs calcaire, os) et leur recouvrement par les concrétions. En effet, ces dernières ne se développent que s'il y a infiltration d'eau dans la zone non saturée au-dessus de la grotte et s'il y a dissolution du calcaire encaissant. Il est donc nécessaire de connaître les périodes favorables à la croissance des spéléothèmes dans la région étudiée, périodes généralement chaudes et humides, comme l'attestent la distribution statistique des datations U/Th faites en Europe [2], mais aussi les autres indicateurs paléoclimatiques globaux ou régionaux (niveaux marins, pollens, isotopes stables des spéléothèmes, des foraminifères marins ou des ostracodes). Nous présentons ici les premiers résultats des datations U/Th par spectrométrie de masse issus de stalagmites et de planchers stalagmitiques prélevés dans la grotte Chauvet. Ceux-ci apportent des jalons chronologiques importants dans l'histoire de la grotte, ainsi que dans l'histoire climatique régionale.

2. Localisation et description des échantillons

La grotte Chauvet se développe dans les falaises de calcaire du Barrémien supérieur (à faciès urgonien) des gorges de l'Ardèche (latitude = 44.23°N ; longitude = 4.26°E). Située à 240 m d'altitude, elle est soumise à un climat essentiellement océanique, avec quelques influences méditerranéennes [14,15]. L'épaisseur de calcaire qui la surmonte est d'environ 50 m.

Hormis les deux stalagmites prises sur l'éboulis d'entrée, tous les échantillons ont été trouvés, déjà cassés pour la plupart et à proximité du cheminement mis en place par les inventeurs. Les huit stalagmites et les deux morceaux de plancher stalagmitique sont répartis sur l'ensemble de la grotte (Fig. 1). La hauteur des stalagmites varie de 6 à 68 cm et celle des planchers, de 2 à 4,5 cm (Tableau 1). Ces formations sont composées de calcite d'une fabrique cristalline palissadique typique, composée de cristaux de quelques millimètres à plusieurs centimètres de long qui sont perpendiculaires aux lamines de croissance [20,27].

3. Méthodes expérimentales

Seules de petites stalagmites ont été prélevées dans la grotte Chauvet, ceci pour ne pas porter de préjudice

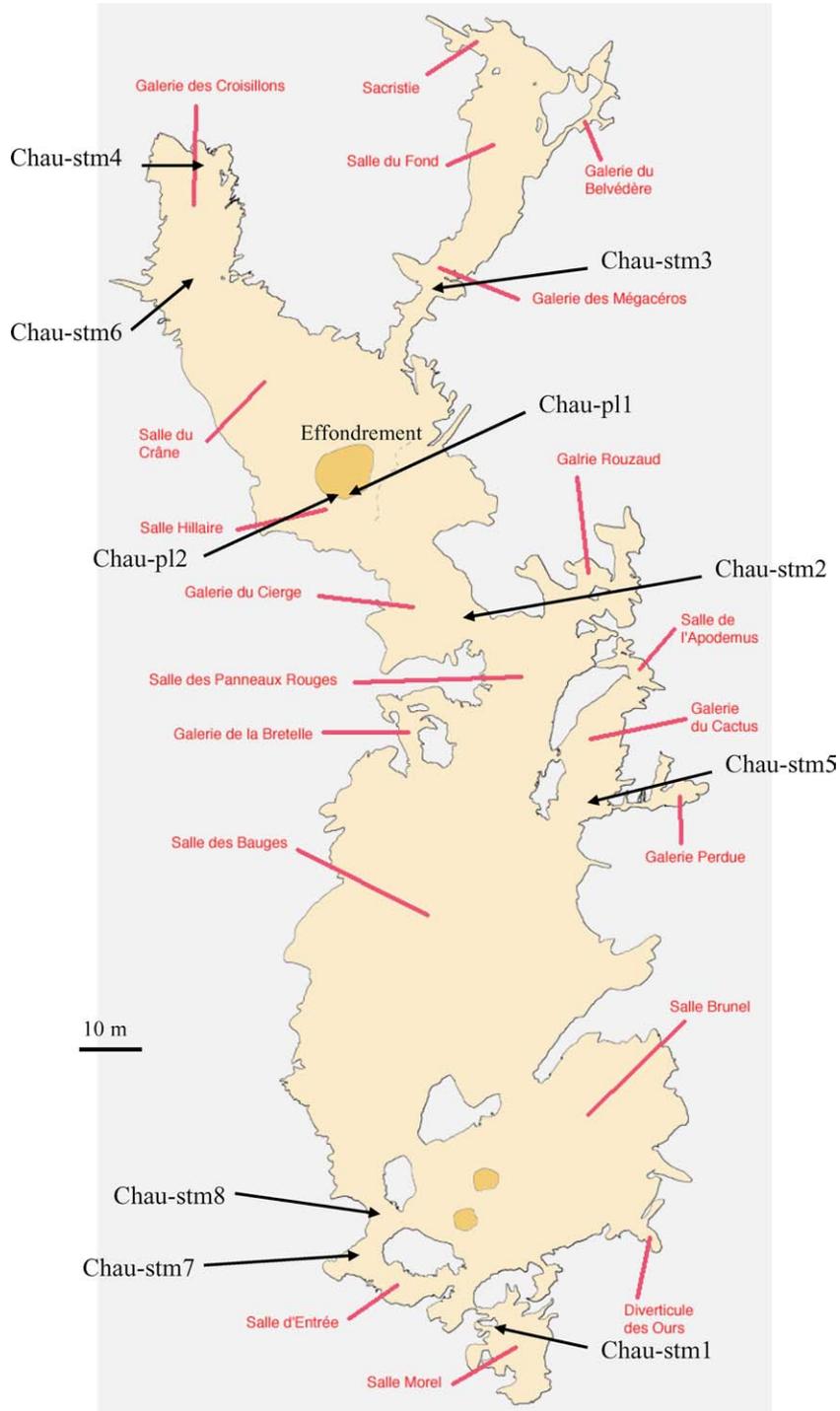


Fig. 1. Localisation des échantillons (base topographique : Yannick Le Guillou, Frédéric Maksud. En hommage à François Rouzaud).
Fig. 1. Position of the studied speleothems in the Chauvet Cave (map from Yannick Le Guillou, Frédéric Maksud. Hommage to François Rouzaud).

Tableau 1
Situation des échantillons étudiés.

Nom	Date d'échantillonnage	Localisation	Type	Hauteur cm	Etat du prélèvement
Chau-stm1	01/11/1999	près puits d'entrée, après passage étroit	stalagmite	35,7	cassée, la base est en place
Chau-stm2	16/03/2000	passage, seuil, avant galerie ciege	stalagmite	15,2	entière, en place sur chemin
Chau-stm3	16/03/2000	galerie des Mégacéros	stalagmite	14,3	entière, en place sur chemin
Chau-stm4	16/03/2000	galerie des Croisillons	stalagmite	33,8	cassée, manque la base
Chau-stm5	13/03/2001	galerie du Cactus	stalagmite	28	entière, tombée
Chau-stm6	15/05/2001	galerie des Croisillons	stalagmite	68	entière, tombée
Chau-stm7	15/05/2001	éoluis d'entrée (en haut)	stalagmite	6	entière, en place sur éboulis
Chau-stm8	15/05/2001	éoluis d'entrée (en bas)	stalagmite	22,2	entière, en place sur éboulis
Chau-p11	17/10/2001	bord effondrement, salle Hillaire	plancher	4,5	en place, sur sol archéologique
Chau-p12	17/10/2001	bord effondrement, salle Hillaire	plancher	2	en place, sur sol archéologique

esthétique. De par la rareté du matériel, il était indispensable d'utiliser les méthodes de datation les plus précises possibles, comme la méthode U/Th par spectrométrie de masse par thermo-ionisation (TIMS). Celle-ci nécessite l'emploi de petits échantillons de calcite (0,3 à 2 g) et le fait de compter directement les isotopes de l'uranium et du thorium sur un spectromètre de masse augmente la précision analytique (entre 1 et 2% à 2σ pour des échantillons « propres »). Les diamètres des stalagmites varient de 3 à 6 cm, ce qui limite la hauteur minimale d'un échantillon : ainsi, pour la chronologie U/Th (TIMS), la hauteur du bloc de calcite (extrait à la microscie diamantée) est comprise entre 0,5 et 1,0 cm, ce qui représente, selon la vitesse de croissance, une durée comprise entre 5 et 50 ans, généralement inférieure à l'incertitude analytique. En revanche, un tel prélèvement sur un plancher stalagmitique peut correspondre à une durée beaucoup plus grande (plusieurs centaines d'années), car la vitesse de croissance est souvent plus faible.

Les analyses U/Th par spectrométrie de masse ont été faites dans deux laboratoires : au LSCE (V.P., Ch.C., Gif-sur-Yvette) pour les trois stalagmites Chau-stm1 à Chau-stm3, et au GEOTOP (B.G., université du Québec, Montréal, Canada) pour toutes les autres stalagmites, ainsi que pour les planchers stalagmitiques (Tableau 2). Les détails des procédures analytiques se trouvent dans [21] et dans [32]. Nous rappelons cependant les points importants suivants : les échantillons sont brûlés à 900 °C pour détruire toute matière organique, puis ils sont dissous dans de l'acide chlorhydrique

(LSCE) ou nitrique (Geotop), après addition d'un traceur ^{229}Th – ^{236}U – ^{233}U . Les fractions uranium et thorium sont préconcentrées par coprécipitation sur hydroxyde de fer, séparées et purifiées par fixation sélective sur résines d'échange anioniques et, enfin, déposées sur des filaments de rhénium. Le premier ensemble d'échantillons a été mesuré sur un spectromètre de masse Finnigan Mat 262 (LSCE), le second ensemble sur un VG Sector (GEOTOP). Une correction a été appliquée sur les échantillons dont les âges sont vieillis par l'apport de ^{230}Th issu d'éléments détritiques qui apportent aussi du ^{232}Th , et ceci, lorsque le rapport $^{230}\text{Th}/^{232}\text{Th}$ est inférieur à 50. Nous avons supposé un rapport initial $^{230}\text{Th}/^{232}\text{Th}$ égal à 1 [9], avec une incertitude de $\pm 50\%$ (Tableau 2). En conséquence, l'erreur finale sur l'âge des échantillons contaminés est large (cas des planchers stalagmitiques).

3.1. Radiocarbone

Pour le ^{14}C (AMS), les prélèvements sur les stalagmites se font à la micro-perceuse (diamètre : 0,8 mm). Deux à quatre trous sont suffisants et peuvent être faits latéralement sur un même niveau de croissance, ce qui représente une durée de croissance variant de 1 à 5 ans. La méthode employée est détaillée dans [21,22]. Les incertitudes varient de 0,4 à 0,8 pMC (% modern carbon). Les âges issus des mesures de radiocarbone sur la calcite sont corrigés d'une proportion de carbone mort (carbone issu principalement de la dissolution du cal-

Tableau 2

Résultats des analyses uranium–thorium. Une correction sur le ^{230}Th initial a été effectuée pour tous les échantillons dont le rapport $^{230}\text{Th}/^{232}\text{Th}$ est inférieur à 50. Un rapport $^{230}\text{Th}/^{232}\text{Th}$ initial de 1 (activité) a été choisi avec une incertitude de $\pm 0,5$, qui est prise en compte dans l'erreur finale (colonne *Erreur totale*), d'où les grandes marges d'incertitude sur l'âge des échantillons contaminés par du thorium détritique. Le rapport d'activité $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ inhabituel de l'échantillon Chau-stm6 ($\sim 0,55$ au lieu de ~ 1 en général) est très probablement dû à une eau d'infiltration déjà appauvrie en ^{234}U , comme le démontre le rapport $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ de $0,8838 \pm 0,0054$ mesuré sur de l'eau moderne prélevée à environ 5 m de la stalagmite. Ceci montre que, localement, la minéralisation des eaux s'effectue à travers des formations (sol/roche) lessivées et appauvries en ^{234}U .

Uranium-thorium results. An initial ^{230}Th correction has been made for all the samples that have a $^{230}\text{Th}/^{232}\text{Th}$ activity ratio < 50 . We choose an initial $^{230}\text{Th}/^{232}\text{Th}$ activity ratio of 1 ± 0.5 . The final error (*Erreur finale* column) takes into account this error too, which explains the large error bars for the samples that have been significantly contaminated by detrital thorium. The unusual $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ activity ratio of the Chau-stm6 stalagmite (~ 0.55 instead of ~ 1 generally) is likely due to a seepage water that was already depleted in ^{234}U , as seems to show the very low $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ activity ratio of the modern seepage water sampled about 5 m far from the Chau-stm6 stalagmite (0.8838 ± 0.0054). This shows that, locally, the seepage water mineralisation occurs across rock/soil units whose ^{234}U content is low due to weathering. La position de -10 mm/base de l'échantillon Chau-stm7 indique que l'échantillon a été prélevé sous la discontinuité de base de la stalagmite, qui, quant à elle, marque la base (0 cm/base). Localisation of the studied speleothems. The -10 -mm/basis for the Chau-stm7 stalagmite indicates that the sub-sample was extracted below the basis discontinuity that marked the basis of the sample (0 cm/basis)

Nom échantillon	Position mm/base	\pm	^{235}U ppm	\pm	$^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ activité	\pm	$^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$ activité	\pm	$^{230}\text{Th}/^{232}\text{U}$ activité	\pm	Age A_0 ans	“+”	“-”	Age U/Th corrigé ans	Erreur totale ans	Laboratoire
Chau-stm1-U/Th-A	266,5	3,5	0,22631	0,00014	1,01499	0,00260	0,03878	0,00080	6,1	0,1	4301	84	84	3601	391	LSCE
Chau-stm1-U/Th-B	5	4,5	0,17211	0,00014	1,03373	0,00320	0,04281	0,00040	24,6	0,3	4757	39	39	4557	103	LSCE
Chau-stm2-U/Th-B	146,75	5,7	0,21349	0,00031	0,97310	0,0091	0,08176	0,0024	35,5	1,0	9280	224	222	9030	223	LSCE
Chau-stm2-U/Th-E	54	4	0,18310	0,00015	1,03924	0,0031	0,11423	0,0008	511,4	6,9	13 182	78	78	13 112	78	LSCE
Chau-stm2-U/Th-D	37	3	0,26954	0,00011	1,02821	0,0017	0,11768	0,0007	1080,8	7,2	13 608	68	68	13 558	68	LSCE
Chau-stm2-U/Th-Ab	4	4	0,21473	0,00011	1,02786	0,0028	0,12141	0,0010	414,2	4,7	14 068	95	95	13 995	95	LSCE
Chau-stm3-U/Th-E	121,5	3,5	0,13684	0,00015	0,99359	0,00320	0,11503	0,00080	842,8	10,1	13 291	71	71	13 231	71	LSCE
Chau-stm3-U/Th-D	66	3	0,13243	0,00011	0,98935	0,00460	0,12359	0,00100	623,4	5,8	14 350	94	93	14 290	94	LSCE
Chau-stm3-U/Th-A2	13	6	0,22586	0,00009	0,97411	0,00230	0,12680	0,00090	799,4	8,3	14 755	84	84	14 695	84	LSCE
Chau-stm7-U/Th-C	50	10	0,50874	0,00389	0,98178	0,00688	0,00285	0,00013	21,0	1,0	305	11	11	290	13	GEOTOP
Chau-stm7-U/Th-B	10	10	0,97807	0,07690	0,98536	0,00883	0,05189	0,00084	119,6	2,1	5797	92	92	5797	92	GEOTOP
Chau-stm7-U/Th-A	-10		0,39578	0,00240	1,01247	0,00686	1,00065	0,01025	92,6	1,1	>500 000	ind.	ind.	>500 000	ind.	GEOTOP
Chau-stm8-U/Th-C	192,5	12,5	0,33660	0,00272	0,95901	0,01180	0,07637	0,00131	1676,1	27,3	8648	155	154	8648	155	GEOTOP
Chau-stm8-U/Th-B	162,5	12,5	0,34519	0,00264	0,95640	0,00947	0,07958	0,00110	715,2	10,3	9026	132	131	9026	132	GEOTOP
Chau-stm8-U/Th-A	12,5	12,5	0,21166	0,00152	0,91714	0,00716	0,10016	0,00135	212,4	3,2	11 500	172	174	11 500	172	GEOTOP
Chau-stm5-U/Th-A	7,5	7,5	0,31270	0,00170	0,97772	0,00506	0,11190	0,00301	7,1	0,2	12 912	370	368	11 175	1163	GEOTOP
Chau-stm6-U/Th-F	664	8	0,28477	0,00157	0,57000	0,00490	0,09910	0,00120	210,7	2,6	11 498	152	152	11 498	152	GEOTOP
Chau-stm6-U/Th-E	511	7	0,32860	0,00175	0,55440	0,00460	0,10590	0,00180	1119,0	19,0	12 356	230	229	12 356	230	GEOTOP
Chau-stm6-U/Th-D	374,5	7,5	0,31018	0,00173	0,55920	0,00470	0,11490	0,00210	976,8	17,8	13 488	272	270	13 488	271	GEOTOP
Chau-stm6-U/Th-J	324,5	5,5	0,34780	0,00221	0,53510	0,00740	0,11810	0,00190	644,0	8,3	13 920	252	250	13 920	251	GEOTOP
Chau-stm6-U/Th-B	215,5	7,5	0,25651	0,00147	0,58160	0,00730	0,12370	0,00350	493,6	13,9	14 591	458	454	14 591	456	GEOTOP
Chau-stm6-U/Th-I	152,5	7,5	0,32090	0,00176	0,55510	0,00650	0,12700	0,00190	625,8	7,7	15 044	254	253	15 044	254	GEOTOP
Chau-stm6-U/Th-H	92	5	0,50650	0,00266	0,55576	0,00609	0,20954	0,00368	134,4	2,1	26 446	574	567	26 446	571	GEOTOP
Chau-stm6-U/Th-A3	37,5	2,5	0,44080	0,00188	0,54153	0,00440	0,22694	0,00638	182,4	5,2	29 128	1011	996	29 128	1004	GEOTOP
Chau-stm6-U/Th-A2	17,5	2,5	0,37720	0,00171	0,56455	0,00464	0,22627	0,00885	152,9	6,0	28 882	1370	1344	28 882	1357	GEOTOP
Chau-stm6-U/Th-A	10	5	0,44810	0,00219	0,54449	0,00435	0,25093	0,00370	81,8	1,2	32 872	625	618	32 872	622	GEOTOP
Chau-pI1-U/Th-C	38	5	0,07700	0,00048	0,99619	0,00938	0,08687	0,00249	4,4	0,1	9887	300	299	7704	1633	GEOTOP
Chau-pI1-U/Th-B	21	4	0,69800	0,00534	0,98590	0,00515	0,16618	0,00213	12,7	0,2	19 776	278	277	18 327	1028	GEOTOP
Chau-pI1-U/Th-A	10	5	1,00964	0,00697	0,99964	0,00611	0,23932	0,00280	13,5	0,2	29 747	410	408	27 787	1915	GEOTOP
Chau-pI2-U/Th-A	10	5	0,14680	0,00088	1,00249	0,00720	0,14775	0,00247	11,4	0,2	17 380	323	322	15 951	1106	GEOTOP

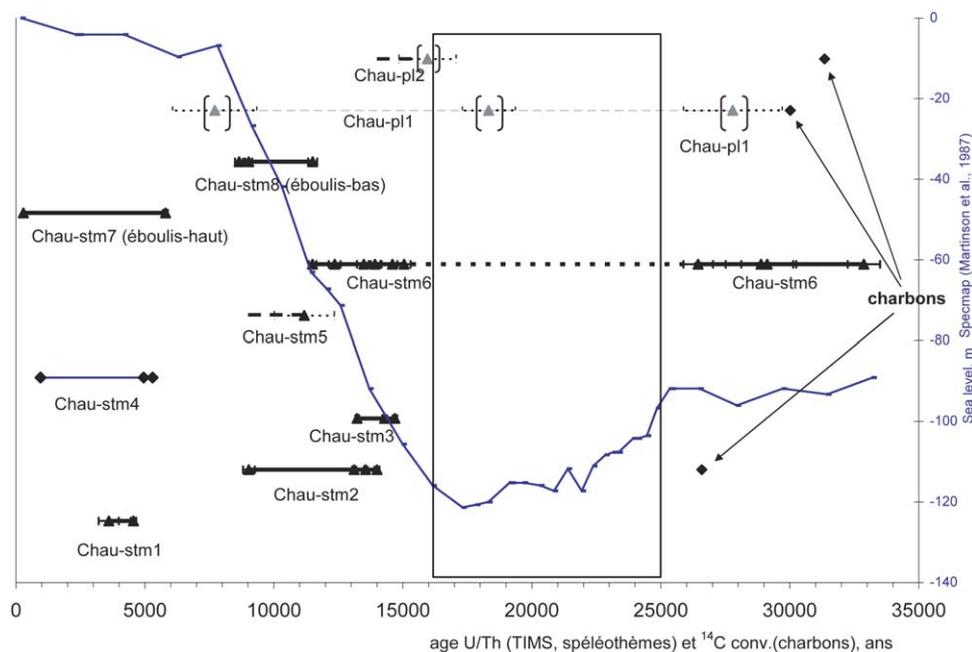


Fig. 2. Distribution des âges U/Th (TIMS) des stalagmites et planchers stalagmitiques de la grotte Chauvet. Seule la stalagmite Chau-stm4 a été datée par ^{14}C , avec correction de C mort et calibration. La valeur de 4% de C mort choisie pour cette correction est issue de la comparaison des âges U/Th et ^{14}C de la stalagmite Chau-stm1, seul échantillon contemporain de Chau-stm4, où les deux types d'analyse ont été effectués. Les âges des charbons sont conventionnels. Les barres d'erreur représentent 2σ . Trait continu : courbe du niveau des océans (SPECMAP, [31]). Le rectangle représente la période où les stalagmites ne poussent pas. Enfin, les échantillons des planchers stalagmitiques sont mis entre parenthèses, car leur teneur en éléments détritiques (forte teneur en ^{232}Th) ainsi que leur faible vitesse de croissance rendent leur âge incertain (Tableau 2).
 Fig. 2. TMS U/Th distribution of the Chauvet Cave speleothems. Chau-stm4 is the only stalagmite that has been dated with ^{14}C AMS. The value of 4% for the dead carbon proportion comes from the comparison between U/Th and ^{14}C ages of a contemporary stalagmite (Chau-stm1). Charcoals ages are conventional ages. Error bars indicate 2σ variation. Continuous line is the sea level reconstructed from marine cores (SPECMAP, [31]). Rectangle = no stalagmite growth. The flowstone samples have been bracketed because of their uncertainty due to their very low growth rate and to their high ^{232}Th content (Table 2).

caire) et calibrés [21,22,33]. Cette proportion avait été estimée à 4% en comparant les âges U/Th et ^{14}C de la stalagmite Chau-stm1, obtenus lors d'une précédente étude [21,22]. Seule la stalagmite Chau-stm4 a été datée uniquement par ^{14}C , ainsi que le sommet de Chau-stm1.

4. Résultats et discussions

4.1. Distribution des âges et périodes de croissance favorables au concrétionnement à la grotte Chauvet

Vingt-neuf analyses U/Th TIMS ont été effectuées sur les spéléothèmes de la grotte Chauvet (Tableau 2). Les âges s'échelonnent entre 32,9 et 0,3 ka et montrent plusieurs phases de croissance successives, plus ou

moins distinctes. La première, entre 32,9 et 24 ka, pendant laquelle la stalagmite Chau-stm6 a poussé de 13,5 cm et le plancher Chau-pl1 a commencé sa croissance (Figs. 2 et 3). La seconde phase, qui est la mieux marquée, a lieu aux environs de 15 ka : elle comporte les stalagmites Chau-stm2 et Chau-stm3 qui commencent leur croissance entre 14260 ± 95 et 14900 ± 84 ans (âges par rapport à l'année 2000 extrapolés jusqu'à la base des échantillons) ainsi que Chau-stm6, dont la croissance reprend il y a 15148 ± 254 ans, après un arrêt d'environ 9000 ans (Fig. 2). Enfin, le plancher Chau-pl2 aurait déposé sa fine couche de calcite (2 cm) autour de 16 ka, ± 1.1 . Le début de la croissance de Chau-stm8 à 11500 ± 172 ans, ainsi que celui de Chau-stm5 (Fig. 2), bien que moins net à cause des incertitudes, pourraient marquer une troisième période favorable à la reprise du

concrétionnement à Chauvet. Enfin, Chau-stm1, Chau-stm4 et Chau-stm7 débutent leur croissance autour de 5000 ± 800 ans.

Même si, statistiquement, le nombre d'échantillons étudiés est faible, ces phases de croissance coïncident avec des événements climatiques connus : la première phase correspond à la fin du stade isotopique 3, période encore suffisamment chaude et humide pour permettre l'infiltration de l'eau et la dissolution du calcaire. La seconde phase débute à la transition pléni-glaciaire Bølling–Allerød (BA) à 15 ka ; la troisième, bien que moins nette, a lieu exactement après le Younger Dryas (11,5 ka). La dernière phase, autour de 5 ka, pourrait être liée à la fin de la période humide de l'« Atlantique ». Les âges des planchers doivent, en revanche, être interprétés avec précaution, pour deux raisons. D'une part, leur forte contamination en éléments détritiques (concentration en ^{232}Th élevée) entraîne une incertitude importante sur l'âge. D'autre part, leur vitesse de croissance est beaucoup plus faible ; avec une vitesse moyenne de $0,0015 \text{ mm an}^{-1}$ pour le plancher Chau-p11, un prélèvement typique pour une datation (10 mm de hauteur en moyenne) représente, en théorie, 6700 années de dépôt. Cependant, les spéléothèmes ne poussent pas aussi lentement, mais plutôt irrégulièrement, avec des phases de croissance « normales », qui alternent avec des arrêts, ce qui pourrait être le cas de ces planchers. Enfin, la structure de la base de Chau-p11 étant confuse (pas de stratification nette, cristaux dendritiques et fabrique cristalline poreuse), les âges de $27,8 \text{ ka} \pm 1,9$ et $18,3 \pm 1,0 \text{ ka}$ sont encore à considérer avec prudence.

Mais le point essentiel qui ressort de ce premier ensemble d'âges est qu'il n'y a pas de croissance de stalagmite entre 25 et 16 ka environ, ce qui s'explique par des conditions climatiques rigoureuses. Ainsi, le niveau des mers est au plus bas entre 23 et 17 ka [31] (Fig. 2). Le méthane, qui caractérise l'activité biogéologique, mesuré dans les bulles d'air piégées dans les glaces de l'Antarctique et du Groenland montre aussi des valeurs très basses (~ 400 ppb) entre 26 et 17 ka, avant une augmentation brusque jusqu'à ~ 700 ppb à 14,8 ka [8]. La fin de cet intervalle, autour de 16 ka, est particulièrement marquée dans nos échantillons, avec le début de croissance de plusieurs stalagmites (Fig. 2). Elle correspond à la transition Pléni-glaciaire/Bølling–Allerød (BA) reconnue dans de nombreuses archives paléoclimatiques globales et régionales. Ainsi, la brus-

que transition vers le BA est datée à 14,5 ka dans les isotopes des glaces du Groenland [1,13]. Sur le continent européen, les isotopes des ostracodes du lac Ammersee (Sud de l'Allemagne) ont livré une courbe remarquable de la déglaciation où la transition BA est calée à 14,7 ka [26]. Plus proche de l'Ardèche, les pollens des lacs des monts d'Aubrac (Massif central) et du Sud des Alpes caractérisent le passage d'une végétation steppique, essentiellement composée d'*Artemisia*, à une végétation arborée avec l'apparition de *Juniperus* dans l'intervalle 14,4–16 ka cal BP ($12,8 \pm 0,25 \text{ ka BP}$ non calibré ; [4,5]).

La croissance des spéléothèmes est conditionnée par de nombreux paramètres, dont les principaux sont la teneur en calcium de l'eau d'infiltration, le débit, la température et les pressions partielles de CO_2 (air et eau) [16]. Lorsque le climat se refroidit, les spéléothèmes ralentissent leur croissance. Au-delà d'un certain seuil, ils s'arrêtent de pousser, soit à cause d'un blocage de l'infiltration, lié à un pergélisol ou à une période sèche, soit à cause du manque de végétation qui empêche l'eau de se charger en CO_2 et donc de dissoudre le calcaire encaissant. Il est possible ainsi de définir des « chronozones », c'est-à-dire des périodes durant lesquelles les spéléothèmes poussent, ceci pour une région donnée. Pour l'Europe du Nord-Ouest (Angleterre, Nord de l'Europe continentale), la distribution statistique des âges U/Th publiés montre qu'autour de 20 ka, très peu de spéléothèmes ont poussé [2,25]. Dans le Sud-Ouest de la France, à la même latitude que celle de la grotte Chauvet, les âges U/Th (TIMS) des stalagmites de la grotte de Villars montrent un arrêt entre ca 16 et 32 ka [23,24], qui se superpose à celui observé à Chauvet. Toutes ces observations suggèrent donc qu'entre 25 et 16 ka, la croissance d'une stalagmite est peu probable dans cette région.

Vitesses de croissance. Les vitesses verticales de croissance des stalagmites sont des indicateurs paléoclimatiques indirects, puisqu'elles sont liées principalement à la teneur en calcium et au débit de l'eau. Dans la grotte Chauvet, elles varient de $0,002 \text{ mm an}^{-1}$ (base de Chau-stm6) à $0,68 \text{ mm an}^{-1}$ (Chau-stm4) (Fig. 3). Calculées à partir des âges U/Th, il s'agit de vitesses moyennes entre deux points datés. En conséquence, un événement froid situé entre deux de ces points entraîne une réduction apparente de la vitesse moyenne de croissance. C'est le cas pour la moitié supérieure de la

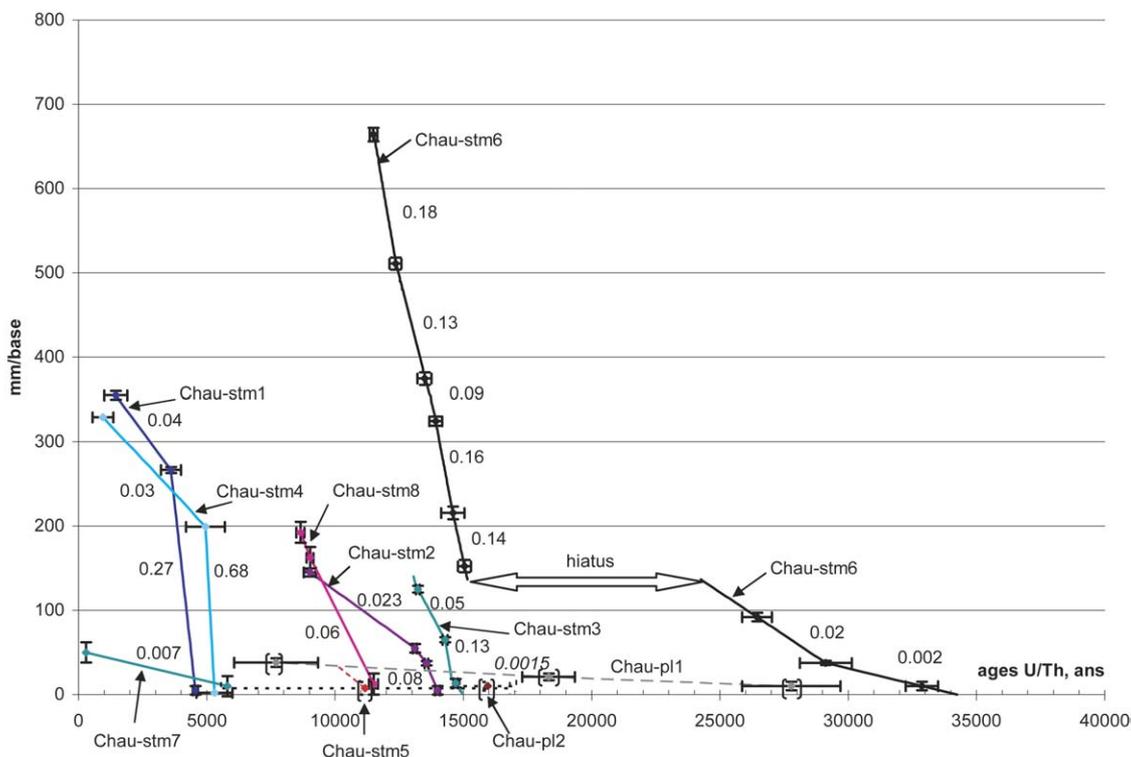


Fig. 3. Vitesses de croissance des stalagmites et des planchers stalagmitiques de la grotte Chauvet. Les valeurs indiquées sur le graphique sont en mm an^{-1} . Il s'agit de vitesses moyennes calculées avec les âges U/Th. Les erreurs relatives sur les vitesses de croissance s'échelonnent entre $\pm 10\%$ et $\pm 89\%$, cette dernière valeur concernant le plancher P11, dont la croissance est très faible.

Fig. 3. Growth rate curves of Chauvet Cave speleothems. Values indicate the growth rate between each dated point (mm yr^{-1}). These are mean values; relative errors are between $\pm 10\%$ and $\pm 89\%$, the later for the P11 sample whose growth rate is very low.

stalagmite Chau-stm2, où la vitesse moyenne est faible ($0,023 \text{ mm an}^{-1}$), probablement parce qu'elle recouvre le *Younger-Dryas* (YD), période particulièrement froide qui a entraîné des ralentissements, voire des arrêts, dans le concrétionnement des spéléothèmes (cas de la grotte de Villars, données non publiées). Cependant, le YD ne semble pas avoir affecté la croissance de Chau-stm6 où l'on observe une vitesse de $0,18 \text{ mm an}^{-1}$ (Fig. 3). Les isotopes stables effectués sur cette stalagmite (en cours de publication) confirment l'impact du YD sur le climat, malgré une vitesse de croissance toujours relativement élevée. La situation de Chau-stm6, au fond de la grotte, plus à l'intérieur du massif calcaire et donc mieux protégée du froid extérieur et peut-être uniquement alimentée par des eaux d'infiltration d'été qui régulent la température de la grotte, pourrait en partie expliquer son fonctionnement pendant cette période froide.

4.2. Âge de l'éboulis d'entrée

Afin de préciser la dynamique de mise en place de l'éboulis d'entrée (événement abrupt ou multiphasé) et son âge, deux stalagmites ont été prélevées en juin 2001 : Chau-stm7 qui provient du haut de l'éboulis et Chau-stm8 qui se trouve à environ un mètre au-dessus des derniers blocs de calcaire déposés sur le sol de la grotte. Chacune des stalagmites intègre dans sa base des blocs de calcaire de l'encaissant urgonien constitutif de l'éboulis, ce qui a permis de prélever des échantillons de calcite au niveau de leurs toutes premières phases de croissance. À la base de l'éboulis, le concrétionnement de Chau-stm8 débute à $11\,500 \pm 172$ ans et se termine après 8648 ± 155 ans (Tableau 2). En haut de l'éboulis, la base de Chau-stm7 donne un âge de 5797 ± 92 ans et 290 ± 13 à quelques millimètres du sommet, démontrant que cette dernière était active lors de son prélèvement.

Comme la grotte Chauvet, de nombreuses cavités ont leur entrée originelle colmatée par un éboulis ; citons par exemple des grottes de Dordogne comme Cussac, Lascaux, Villars etc. ou des Pyrénées (Fontanet). Il en existe de nombreuses autres, répertoriées surtout dans le Sud de la France par M. Escalon de Fonton [17] et J.-J. Blanc [6]. Diverses hypothèses ont été émises quant à la cause de ces éboulements, faisant intervenir la fissuration, le climat et la tectonique [6]. D'une façon générale, la tectonique prédispose plus ou moins favorablement une falaise à s'écrouler. Des diaclases dont la direction est proche de celle du front de falaise vont favoriser l'effondrement. La falaise où se situe la grotte Chauvet correspond à un accident \sim N20 qui, quelques kilomètres plus au sud, met en contact le Barrémien supérieur avec le Bédoulien inférieur (carte géologique de la France au 1:50 000, n° 889, BRGM). Cet accident pourrait être à l'origine d'une fracturation favorisant les éboulements. Ces derniers peuvent être déclenchés par une secousse sismique ou, plus probablement, un climat à fort contraste thermique. L'exemple relaté par Escalon De Fonton (in [6]) d'une cuesta de biocalcarénites miocène surplombante (près de Fos, Bouches du Rhône) montre, de façon remarquable, qu'un éboulement peut être polyphasé et lié à différentes phases climatiques, où chaque phase d'effondrement est ici mise en relation avec un climat froid.

L'âge le plus ancien obtenu dans cette étude, à partir des stalagmites de l'éboulis d'entrée, montre que la base de cette formation est plus ancienne que $11,5 \pm 0,17$ ka et son sommet plus ancien que $5,8 \pm 0,1$ ka. D'après les données de ces deux seules stalagmites, l'éboulis se serait donc formé avant la fin du *Younger-Dryas*. L'étude d'autres stalagmites de l'éboulis d'entrée permettra de préciser l'âge exact de cet événement. Notons, par ailleurs, que les âges ^{14}C obtenus, d'une part, sur les charbons et les peintures et, d'autre part, sur les ossements d'animaux trouvés dans la grotte, montrent qu'il n'y a pas eu d'activité humaine postérieure à 24 ka BP [34] et qu'aucun animal de grosse taille n'est entré dans la grotte après 22 ka BP [7].

4.3. Calage chronologique de l'effondrement de la salle Hillaire

Il y a au fond de la grotte, dans la salle Hillaire, un effondrement du sol archéologique et du plancher sta-

lagmitique qui le recouvre (Fig. 1). Ce trou, d'environ 10 m de diamètre, est le seul lieu dans la grotte où il soit possible d'observer la succession des dépôts sédimentaires sur une épaisseur de plus de 2 m. Ceux-ci, principalement argileux, contiennent de nombreux restes paléontologiques et sont scellés par un plancher stalagmitique d'environ 5 cm d'épaisseur [18,28]. L'âge de la base du plancher montre que l'eau a commencé à recouvrir le sol archéologique en y déposant de la calcite à la fin du stade isotopique 3, aux environs de 28 ka (Tableau 2). À 3 cm de la base du plancher, une discontinuité pétrographique bien visible (passage d'une calcite blanche et poreuse à une calcite compacte et translucide) sépare la base d'une seconde génération de dépôt de calcite, dont l'âge maximal est d'environ 9.3 ka (7,7 ka en âge corrigé, mais avec une incertitude élevée à cause de la forte contamination en détritique, Tableau 2). Il est donc probable que l'effondrement s'est produit pendant la première moitié de l'Holocène. La discontinuité correspond très probablement au Pléniglaciaire, autour de 20 ka, au cours duquel, comme sur la stalagmite Chau-stm6, il n'y a pas eu de dépôt de calcite à cause des conditions climatiques sévères.

4.4. Comparaison entre les âges U/Th des spéléothèmes et les âges ^{14}C des charbons piégés au-dessous

Des fragments de charbon résultant de l'activité de l'homme préhistorique ont été trouvés piégés sous quatre des spéléothèmes étudiés : Chau-stm2, Chau-stm3, Chau-pl1 et Chau-pl2 (Tableau 3). Les âges ^{14}C (UMS Tandétron, Gif-sur-Yvette) s'échelonnent de $31\,350 \pm 440$ ans BP à $21\,822 \pm 130$ ans BP. Ce dernier échantillon étant très petit et proche de la limite analytique est à considérer avec prudence. Ces âges ^{14}C sont conventionnels et l'âge vrai est donc plus grand, de 2 à 6 ka selon les hypothèses sur la courbe de calibration pour cette période [3,29,35]. Ces résultats informent sur l'intervalle de temps qui s'est écoulé entre les dépôts archéologiques, témoins de l'activité humaine, et le début des phases de concrétionnement : > 2200 ans pour le premier plancher de la salle Hillaire ; > 7000 ans pour la stalagmite de la galerie des Mégacéros (Chau-stm3) et > 12 600 ans pour la stalagmite du passage avant la galerie du Cierge (Chau-stm2). L'âge de la base du plancher de la salle Hillaire (Chau-pl1) est cohérent avec l'âge ^{14}C des charbons

Tableau 3

Résultats des analyses ^{14}C des charbons piégés sous les spéléothèmes et sur Chau-stm4 et le sommet de Chau-stm1. Les âges ^{14}C des stalagmites ont été corrigés d'une proportion de carbone mort de 4% (par comparaison U/Th- ^{14}C) et ensuite calibrés suivant la courbe de calibration de Stuiver et Kra [33]). Les erreurs finales prennent en compte, non seulement l'erreur analytique, mais aussi l'erreur sur la proportion de carbone mort ainsi que l'erreur de la courbe de calibration. Les charbons trouvés juste sous la base des spéléothèmes sont positionnés à -1 mm/base. Le charbon GC0028 a été prélevé dans la salle Hillaire, à 5 cm sous le plancher stalagmitique (identique à Chau-pl1 et Chau-pl2). Il appartient au même niveau archéologique que les charbons Chau-pl1-charbon et Chau-pl2-charbon. Le charbon GC0022 a été trouvé sur le sol de la galerie des Croisillons, à environ 2 m de la stalagmite Chau-stm6 qui a poussé sur ce sol.

Radiocarbon (AMS) results of the charcoal found under the studied speleothems and of Chau-stm4 and top of Chau-stm1 stalagmites. The ^{14}C ages of the stalagmites have been corrected for a dead carbon proportion (4%; from U/Th and ^{14}C comparison) then calibrated using the calibration curves of Stuiver and Kra [33]). Final errors take into account the analytical error, the dep error and the calibration error. Charcoal that have been found just under speleothems base are located at -1 mm/basis. The charcoal sample GC0028 was found in the « Salle Hillaire », 5 cm below the calcite flowstone (similar to Chau-pl1 and Chau-pl2). It belongs to the same archaeological level of the Chau-pl1-charbon and Chau-pl2-charbon samples. The GC0022 charcoal was found on the soil surface in the Croisillon gallery, about 2 m far from the Chau-stm6 stalagmite that grew on this same soil.

Non échantillon	mm/base	±	Activité mesurée, pMC	^{14}C ±(1σ)	Age Conventionel, ans BP	±(1σ)	cal. ^{14}C age/2000, (2σ)
Chau-stm1-14C-B	355	0,4	79,75	0,55	1818	56	1000-100
Chau-stm4-14C-A	2	0,4	53,87	0,45	4969	67	6000-4600
Chau-stm4-14C-B	202	0,4	55,85	0,46	4679	66	5700-4200
Chau-stm4-14C-C	205	0,4	56,27	0,35	4619	50	5700-4200
Chau-stm4-14C-Dter	335	0,4	85,9	0,80	1221	75	1350-550
Chau2-Charbon (GifA 102572)	-1	0,5	3,65	0,14	26590	300	
Chau3-Charbon	-1	0,5	6,61	0,11	21822	130	
Chau-pl1-Charbon(GifA 102573)	-1	0,5	2,38	0,11	30020	350	
GC0028 (GifA 101458)	niv. Archéol.		1,63	0,12	33093	590	
Chau-pl2-Charbon(GifA 102574)	-1	0,5	2,02	0,11	31350	440	
GC0022 (GifA 102566)	niv. Archéol.		2,23	0,11	30554	370	

trouvés au-dessous (âge ^{14}C non calibré de $30\,020 \pm 350$ ans BP ; Tableau 3). Il en est de même pour la stalagmite Chau-stm6 qui a poussé sur le sol archéologique où un charbon de bois, trouvé en surface à environ 2 m de la stalagmite, a été daté à $30\,550 \pm 370$ ans BP (GC0022, Tableau 3). Comme la base de cette stalagmite est datée par U/Th de 32870 ± 625 , cela implique que l'âge réel du charbon de ce niveau est encore plus vieux, en accord avec les dernières courbes de calibration [3]. Les autres résultats démontrent que pendant 7 à 15 millénaires, aucun dépôt n'est venu recouvrir les charbons de bois laissés par les hommes préhistoriques.

5. Conclusion

Les analyses U/Th par spectrométrie de masse des spéléothèmes de la grotte Chauvet apportent les informations suivantes sur l'histoire de la grotte. Les spéléothèmes étudiés ont poussé jusqu'à la fin du stade isotopique 3 et ont connu, ensuite, une période d'arrêt entre 25 et 16 ka environ, liée à des conditions clima-

tiques défavorables (sec et froid). La reprise du concrétionnement a lieu dès le début de la transition Pléniglaciaire/Bølling-Allerød vers $15,5 \pm 0,5$ ka. Les deux stalagmites de l'éboulis d'entrée montrent que celui-ci s'est fait avant $11,5 \pm 0,2$ ka, peut-être lors de la transition *Younger Dryas*/Préboréal, ou même avant comme le suggèrent les données archéologiques (âge de peintures, des charbons et des os d'animaux). Le plancher stalagmitique qui recouvre les dépôts de la salle Hillaire a commencé sa croissance à la fin du stade isotopique 3, vers 28 ka. L'effondrement de la salle Hillaire a eu lieu après $7,7 \pm 1,6$ ka, date maximale de la couche supérieure du plancher stalagmitique qui le scelle. Ces premiers jalons chronologiques pourront être complétés à l'avenir par de nouveaux prélèvements, en particulier au niveau de l'éboulis d'entrée, qui reste un des événements majeurs de l'histoire de la grotte Chauvet. Enfin, les datations conjointes des spéléothèmes par U/Th et des charbons préhistoriques piégés sous ces mêmes spéléothèmes sont cohérentes et confirment les âges supérieurs à 30 ka obtenus pour les charbons trouvés sous le plancher de la salle Hillaire et dans la galerie des Croisillons.

Remerciements

Merci à Bernard Gély pour son aide lors des campagnes d'échantillonnage dans la grotte ainsi qu'aux autres membres de l'équipe pour leurs conseils. Nous remercions aussi l'équipe ^{14}C pour sa collaboration pour les analyses des charbons de bois. Cette étude à été financée par le ministère de la Culture (Drac Rhône-Alpes), le CNRS (LSCE) et le CEA.

Références

- [1] R.B. Alley, The Younger Dryas cold interval as viewed from central Greenland, *Quat. Sci. Rev.* 19 (2000) 213–226.
- [2] A. Baker, P.L. Smart, D.C. Ford, Northwest European palaeoclimate as indicated by growth frequency variations of secondary calcite deposits, *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.* 100 (1993) 291–301.
- [3] E. Bard, F. Rostek, G. Ménot-Combes, A better radiocarbon clock, *Science* 303 (2004) 178–179.
- [4] J.-L. de Beaulieu, A. Pons, M. Reille, Recherches pollen analytiques sur l'histoire tardiglaciaire et holocène de la végétation des monts d'Aubrac (Massif central, France), *Rev. Palaeobot. Palynol.* 44 (1985) 37–80.
- [5] J.-L. Beaulieu de, H. Richard, P. Ruffaldi, J. Clerc, History of vegetation, climate and human action in the French Alps and the Jura over the last 15000 years, *Dissertationes Botanicae* 234 (1994) 253–275.
- [6] J.-J. Blanc, Phases d'effondrements aux grottes préhistoriques : du Würm à l'Holocène dans le Midi de la France, *Karstologia* 6 (1985) 21–28.
- [7] H. Bocherens, D. Drucker, D. Billiou, B. Gely, J.-M. Geneste, B. Kervazo, I. Moussa, M. Philippe, Grotte Chauvet : étude de la diagenèse de l'os et implications pour les études biogéochimiques (datation au radiocarbone, isotopes stables du carbone et de l'azote), *Journées de la Société préhistorique française : « La grotte Chauvet à Vallon-Pont-d'Arc : Bilan des recherches pluridisciplinaires »*, Lyon, 11–12 octobre 2003, pp. 11–12.
- [8] E.J. Brook, S. Harder, J. Severinghaus, E.J. Steig, C.M. Sucher, On the origin and timing of rapid changes in atmospheric methane during the last glacial period, *Glob. Biogeochem. Cycles* 14 (2000) 559–572.
- [9] C. Causse, J.S. Vincent, Th/U disequilibrium dating of Middle and Late Pleistocene wood and shells from Banks and Victoria islands, Arctic Canada, *Can. J. Earth Sci.* 26 (1989) 2718–2723.
- [10] J.-M. Chauvet, E. Brunel-Deschamps, C. Hillaire, *La Grotte Chauvet*, Éditions du Seuil, 1995 115 p.
- [11] J. Clottes, J.-M. Chauvet, E. Brunel-Deschamps, C. Hillaire, J.-P. Daugas, M. Arnold, H. Cachier, J. Evin, P.-H. Fortin, C. Oberlin, N. Tisnerat, H. Valladas, Les peintures paléolithiques de la grotte Chauvet–Pont-d'Arc à Vallon-Pont-d'Arc (Ardèche, France) : datations directes et indirectes par la méthode du radiocarbone, *C. R. Acad. Sci. Paris, Ser. IIA* 320 (1995) 1133–1140.
- [12] J. Clottes, *La grotte Chauvet – l'art des origines*, Éditions du Seuil, 2001 224 p.
- [13] W. Dansgaard, S.J. Johnsen, H.B. Clausen, D. Dahi-Jensen, N.S. Gubdestrup, C.U. Hammer, C.S. Hvidberg, J.P. Steffensen, A.E. Sveinbjörnsdottir, J. Jouzel, G. Bond, Evidence for general instability of past climate from a 250-ka ice-core record, *Nature* 364 (1993) 218–220.
- [14] J.-J. Delannoy, Y. Perrette, C. Debard, C. Ferrier, B. Kervazo, A.-S. Perroux, Genèse et évolution de la grotte Chauvet : bilan des études karstogéniques, *Journées de la Société préhistorique française : « La grotte Chauvet à Vallon-Pont-d'Arc : Bilan des recherches pluridisciplinaires »*, Lyon, 11–12 octobre 2003.
- [15] J.-J. Delannoy, E. Debard, C. Ferrier, B. Kervazo, Y. Perrette, Contribution de la cartographie morphologique souterraine dans l'étude spéléogénique de la grotte Chauvet. Premiers éléments spéléogéniques et implications paléogéographiques, préhistoriques et paléontologiques, *Quaternaire* 12 (2001) 235–248.
- [16] W. Dreybrodt, *Processes in Karst Systems*, Springer Verlag, 1988, 288 p.
- [17] M. Escalon De Fonton, Stratigraphies, effondrements, climatologie des gisements préhistoriques du Sud de la France du Würm III à l'Holocène, *AFEQ* 4 (1971) 199–207.
- [18] C. Ferrier, E. Debard, B. Kervazo, A.-S. Perroux, J.-J. Delannoy, Y. Perrette, Apport de l'étude des formes et des remplissages : exemple des salles Hillaire et du Crâne, *Journées de la Société préhistorique française : « La grotte Chauvet à Vallon-Pont-d'Arc : Bilan des recherches pluridisciplinaires »*, Lyon, 11–12 octobre 2003.
- [19] J.-M. Geneste, Essai de synthèse générale sur la recherche accomplie : occupations humaines et animales, cadre chronologique, problématiques, *Journées de la Société préhistorique française : « La grotte Chauvet à Vallon-Pont-d'Arc : Bilan des recherches pluridisciplinaires »*, Lyon, 11–12 octobre 2003.
- [20] D. Genty, Y. Quinif, Annually laminated sequences in the internal structure of some Belgian stalagmites: importance for paleoclimatology, *J. Sediment. Res.* 66 (1996) 275–288.
- [21] D. Genty, M. Massault, M. Gilmour, A. Baker, S. Verheyden, E. Keppens, Calculation of past dead carbon proportion and variability by the comparison of AMS ^{14}C and TIMS U/Th ages on two Holocene stalagmites, *Radiocarbon* 41 (1999) 251–270.
- [22] D. Genty, A. Baker, M. Massault, C. Procror, M. Gilmour, E. Pons-Branchu, B. Hamelin, Dead carbon in stalagmites: limestone paleodissolution versus ageing of Soil Organic Matter – Implications for ^{13}C variations in stalagmites, *Geochim. Cosmochim. Acta* 65 (2001) 3443–3457.

- [23] Genty D., Massault M., Blamart, D., Ouahdi R., Plagnes V., Causse C., Verheyden S., Kepens E., Pons-Branchu E., Hamelin B., Van-Exter S., Stable Isotope N–S transect of Holocene and Late Glacial stalagmites (Belgium, France, Morocco), PAGES-PEP3 symposium, Aix-en-Provence, France, 29 August 2001, p. 87.
- [24] D. Genty, D. Blamart, R. Ouahdi, M. Gilmour, A. Baker, J. Jouzel, S. Van-Exter, Precise dating of Dansgaard–Oeschger climate oscillations in western Europe from speleothem data, *Nature* 421 (2003) 833–837.
- [25] D. Gordon, D. Smart, D.C. Ford, J.N. Andrews, J.N. Atkinson, P.J. Rowe, N.S.J. Christopher, Dating of Late Pleistocene Interglacial and Interstadial Periods in the United Kingdom from Speleothem Growth Frequency, *Quat. Res.* 31 (1989) 14–26.
- [26] U. Grafenstein von, H. Erlenkeuser, A. Brauer, J. Jouzel, J. Johnsen, A Mid-European Decadal Isotope–Climate Record from 15 500 to 5000 years BP, *Science* 284 (1999) 1654–1657.
- [27] A.C. Kendall, P.L. Broughton, Origin of fabrics in speleothems composed of columnar calcite crystals, *J. Sediment. Petrol.* 48 (1978) 519–538.
- [28] Kervazo B., Ferrier C., Debard E., Delannoy J.-J., Perrette Y., Perroux A.-S., Grotte Chauvet (Ardèche – France) : les dépôts de la salle Hillaire et leurs relations avec les vestiges archéologiques et paléontologiques, *Bull. Soc. géol. France* (soumis).
- [29] H. Kitagawa, J. Van Der Plicht, Atmospheric radiocarbon calibration to 45000 yr BP: Late Glacial fluctuations and cosmogenic isotope production, *Science* 279 (1998) 1187–1190.
- [30] W.X. Li, J. Lundberg, A.P. Dickin, D.C. Ford, H.P. Schwarcz, R. McNutt, D. Williams, High-precision mass-spectrometric uranium-series dating of cave deposits and implications for palaeoclimate studies, *Nature* 339 (1989) 534–536.
- [31] D.G. Martinson, N.G. Pisias, J.D. Hays, J. Imbries, T.C. Moore, N.J. Shackleton, Age dating and the orbital theory of Ice Ages: development of a high-resolution 0-to-300-year chronostratigraphy, *Quat. Res.* 27 (1987) 1–29.
- [32] V. Plagnes, C. Causse, D. Genty, D. Blamart, M. Paterne, A stalagmite record from 187 to 74 ka in Clamouse Cave (South of France), *Earth Planet. Sci. Lett.* 201 (2002) 87–103.
- [33] M. Stuiver, R.S. Kra (Eds.), Calibration issue, *Proc. 12th Int. ¹⁴C Conf. Radiocarbon* 28 (2B) (1986) 805–1030.
- [34] H. Valladas, J. Clottes, J.M. Geneste, M.A. Garcia, M. Arnold, H. Cachier, N. Tisnerat-Laborde, Evolution of prehistoric cave art, *Nature* 413 (2001) 479.
- [35] H.L. Voelker, P.M. Grootes, M.J. Nadeau, M. Sarnthein, Radiocarbon levels in the Iceland sea from 25–53 ka and their link to the Earth's Magnetic Field intensity, *Radiocarbon* 42 (2000) 437–452.