



HAL
open science

Les feux de la grotte Chauvet-Pont d'Arc : approches expérimentales

Catherine Ferrier, G. Auguin, A. Aujoux, A. Bellivier, Camille Bourdier, Aurélie Brodard, Evelyne Debard, L Decoster, D. Deldicque, V. Drean, et al.

► **To cite this version:**

Catherine Ferrier, G. Auguin, A. Aujoux, A. Bellivier, Camille Bourdier, et al.. Les feux de la grotte Chauvet-Pont d'Arc : approches expérimentales. *Ardèche archéologie*, 2017, 34, pp.3-12. hal-02081487

HAL Id: hal-02081487

<https://hal.science/hal-02081487>

Submitted on 16 Jan 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Les feux de la grotte Chauvet-Pont d'Arc

Approches expérimentales

C. Ferrier¹, G. Auguin², A. Aujoux³, A. Bellivier³,
C. Bourdier⁴, A. Brodard⁵, E. Debard⁶,
L. Decoster³, D. Deldicque⁷, V. Dréan²,
V. Feruglio¹, P. Guibert⁵, B. Kervazo⁸,
D. Lacanette⁹, J.-C. Leblanc⁴, J.-C. Mindeguia⁹,
N. Fourier³, A. Queffelec¹, J.-N. Rouzaud⁷,
F. Salmon⁹, M. Suzanne³, I. Théry-Parisot¹⁰,
A. Traoré³, T. Truong³



Résumé

Depuis sa découverte en 1994, la grotte Chauvet-Pont d'Arc fait l'objet d'études portant sur les dispositifs pariétaux, la spéléogénèse, les spéléothèmes ainsi que sur la taphonomie des sols et des parois. Sur ces dernières, un faciès de thermo-altération a été identifié, se présentant sous la forme de colorations grise et rose de la paroi, mais aussi d'un écaillage de la roche et d'un dépôt de suies. Deux programmes de recherche récents ont permis d'acquies des données pour préciser les conditions de réalisation et la fonction des feux, à partir d'expérimentations en milieu confiné, d'essais en laboratoire et d'analyses de la roche avant et après transformation.

Mots-clefs

Grotte Chauvet-Pont d'Arc, taphonomie, foyer, thermo-altération, expérimentation, simulation numérique, suies, art pariétal.

Introduction

L'ensemble de ces travaux conduira Ph. Renault à proposer un modèle d'étude des parois ornées tenant compte des caractéristiques du support mais aussi des conditions environnementales telles que la température, la ventilation, les matières en suspension, l'humidité (Renault, 1989).

Dans le cadre de l'étude taphonomique des parois ornées de la grotte Chauvet-Pont d'Arc, un faciès de thermo-altérations,

lié à l'impact de feux a retenu notre attention. Déjà identifié par les découvreurs de la grotte et confirmé par l'expertise menée par J. Clottes (Chauvet *et al.*, 1995), il a ensuite été mentionné comme résultant d'activités anthropiques (Geneste, 2005). Son étude détaillée, à partir de 2008, a permis de le reconnaître dans différents secteurs de la grotte, de le décrire, d'estimer les superficies concernées (Ferrier *et al.*, 2014) et d'identifier des dépôts de suie associés.

¹ Université de Bordeaux, UMR CNRS 5199 PACEA.

² Efectis France

³ Laboratoire Central de la Préfecture de Police, Paris.

⁴ Université Toulouse Jean Jaurès, UMR CNRS 5608 TRACES.

⁵ Université Bordeaux Montaigne, UMR CNRS 5060 IRAMAT-CRP2A

⁶ Université de Lyon, UMR CNRS 5276 LGLTPE

⁷ Laboratoire de Géologie de l'ENS, UMR CNRS 8538

⁸ 6 rue du Serment - 24 000 Périgueux

⁹ Université de Bordeaux, UMR CNRS 5295 I2M

¹⁰ Université Côte d'Azur, UMR CNRS 7264 CEPAM

Les thermo-altérations : caractéristiques, répartition et chronologie

Les thermo-altérations visibles sur les parois et les plafonds de la grotte (Fig. 1) se caractérisent par des teintes roses (rubéfaction) ou grises pénétrant la roche sur plusieurs

millimètres d'épaisseur et par un écaillage qui s'étend sur des surfaces pouvant atteindre plus d'un mètre carré, produisant des clastes de longueur pluricentimétrique et d'épaisseur inférieure à 2 cm. Dans certains secteurs, ces altérations sont accompagnées par des liserés noirs majoritairement subhorizontaux, de largeur millimétrique, situés sur les aspérités de la roche (Ferrier *et al.*, 2014 ; Debard *et al.*, 2015).

L'analyse par spectroscopie Raman d'un prélèvement provenant de la paroi gauche de la Galerie des Mégacéros révèle la présence de carbone (Fig. 2), confirmant la présence de suies. Ce faciès thermique est présent à plusieurs endroits (Fig. 3), depuis l'entrée paléolithique jusqu'aux parties profondes de la cavité. Il se trouve souvent dans des zones relativement étroites, comme dans la Galerie des Mégacéros et le Diverticule des Ours, et/ou basses de plafond. En revanche, dans la Salle des Bauges où les volumes sont plus importants, il affecte des plafonds situés jusqu'à 4 m de hauteur. À cet endroit, les impacts thermiques sont très nombreux et proches les uns des autres. Il est possible que d'autres secteurs aient aussi été affectés, mais ils ne sont pas observables en raison des contraintes de cheminement imposées par la conservation ou d'un recouvrement par des concrétions récentes.

La caractérisation thermique par thermoluminescence de fragments de calcaire rubéfiés provenant du Secteur de l'Entrée et de la Galerie des Mégacéros a révélé des températures comprises entre 325° et 400°C (Brodard *et al.*, 2014). Leur datation par thermoluminescence de, respectivement $34\ 300 \pm 2900$ ans et $36\ 900 \pm 2\ 300$ ans avant le présent, rattache la chauffe à la période aurignacienne (Guibert *et al.*, 2015). Cette datation est en accord avec les observations faites dans la Galerie des Mégacéros où plusieurs représentations attribuées à l'Aurignacien ont été réalisées sur parois déjà rubéfiées (Ferrier *et al.*, 2014). Suivant la nature des marques thermiques, deux types de feux peuvent être distingués :

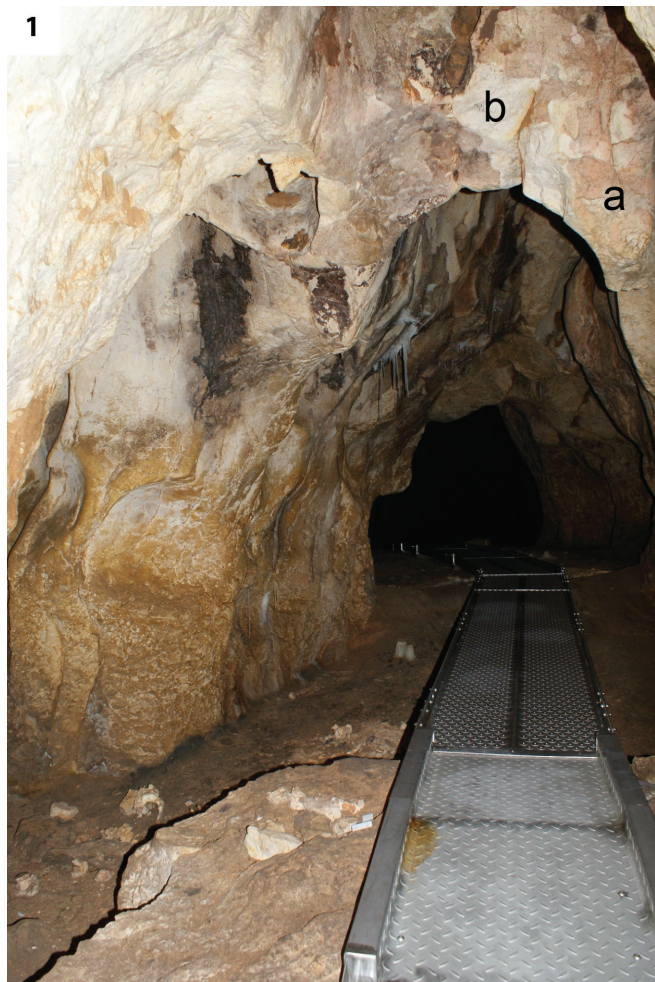


Fig. 1- Faciès thermique de la Grotte Chauvet-Pont d'Arc (Galerie des Mégacéros) : au sommet des parois et au plafond, le calcaire a acquis une coloration rose et grise et a subi un écaillage superficiel. De minces liserés noirs constitués de carbone correspondent à des carbonisats, probablement des suies.

1 : faciès thermique au plafond, à l'entrée de la galerie (cliché C. Ferrier). a : rubéfaction, b : écaillage. 2 : détail de la rubéfaction (cliché B. Kervazo).

3 : détail d'une des zones écaillées (cliché B. Kervazo). 4 : liserés noirs constitués de carbone (cliché B. Kervazo)

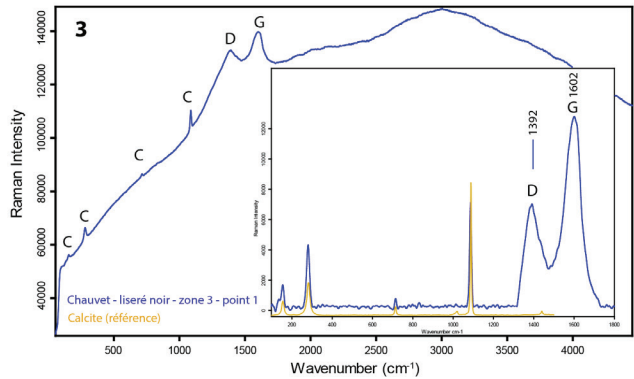
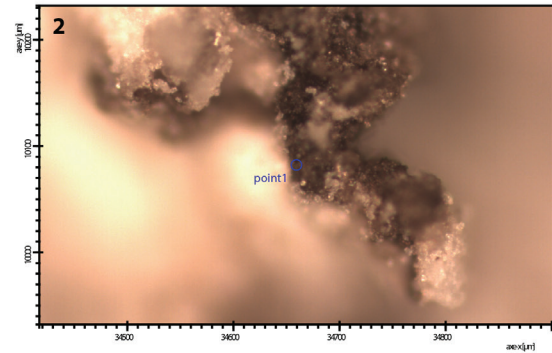
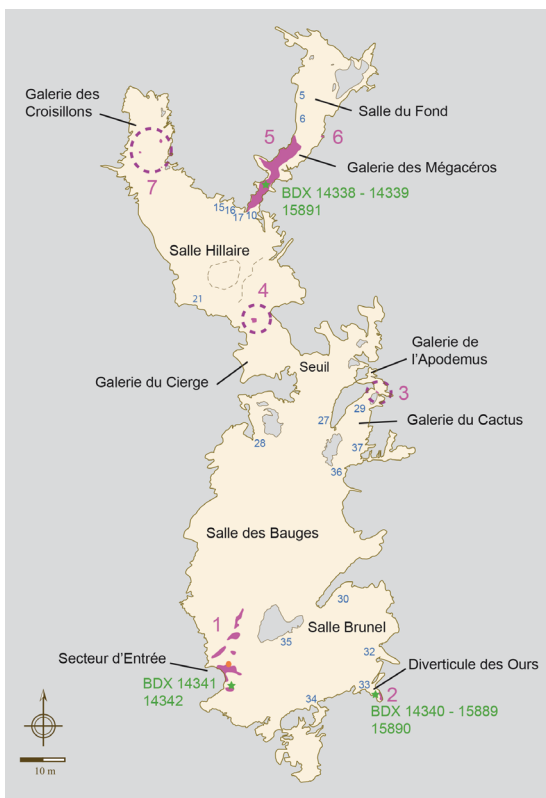


Fig. 2 - Analyse Raman des liserés noirs présents sur les parois de la Galerie des Mégacéros, révélant la présence de carbone (D : carbone Désordonné, G : Graphite, d'après Tuinstra et Koenig 1970 ; C : Calcite). 1 : localisation du prélèvement (cliché C. Ferrier). 2 : Localisation du point d'analyse (cliché A. Queffelec). 3 : Spectre Raman.



- Principaux panneaux ornés
- 5 - Panneau des Rhinocéros
 - 6 - Panneau des Grands Lions
 - 10 - Panneau du Mégacéros
 - 15 - Panneau des Chevaux
 - 16 - Alcôve des Lions
 - 17 - Panneau des Rennes
 - 21 - Panneau du Cheval gravé
 - 27 - Panneau des Signes
 - 28 - Panneau de la Panthère
 - 29 - Panneau de l'Ours rouge
 - 30 - Panneau des Dominos
 - 32 - Panneau des Points Mains
 - 33 - Diverticule des Ours
 - 34 - Bénitier
 - 35 - Panneau du Sacré Coeur
 - 36 - Panneau du Rhinocéros segmenté
 - 37 - Petit Ours rouge

Secteurs concernés par le faciès thermique (coloration rose et grise, écaillage, thermoclastes et noir de fumée)

- 1 - Secteur d'Entrée et Salle des Bauges
- 2 - Diverticule des Ours
- 3 - Passage de la Galerie du Cactus à la Galerie de l'Apodemus
- 4 - Galerie du Cierge
- 5 - Galerie des Mégacéros
- 6 - Salle du Fond
- 7 - Galerie des Croisillons
- ★ Prélèvement pour analyse thermique

- Sondage GE1 (Secteur d'Entrée)

Fig. 3 - Localisation des secteurs concernés par le faciès thermique, du sondage GE1 situé dans le secteur d'Entrée, des prélèvements pour l'étude thermique et des principaux panneaux ornés de la grotte (d'après C. Ferrier et al. 2014).



Fig. 4 - Thermo-altérations de la grotte Chauvet-Pont d'Arc.

A gauche : marques thermiques évoquant des feux puissants dans la Salle des Bauges (clichés E. Debard). 1 : Colorations roses et grises, écaillage, localisés au plafond, sur des surfaces étendues. 2 : détail des altérations dans une coupole du plafond.

A droite : marques thermiques plus discrètes, attribuables à des feux de taille plus modeste (clichés C. Ferrier). 3 : Plages rubéfiées marquant le passage entre la Galerie du Cactus et la Galerie de l'Apodemus. 4 : Galerie des Mégacéros. Plages rubéfiées à la base des parois, immédiatement en avant d'un ressaut.

Le premier type correspond à des rubéfiations, à des colorations grises et à de l'écaillage. Il témoigne de feux puissants. Dans le Secteur de l'Entrée, la Salle des Bauges et la Galerie des Mégacéros, il est fréquent et affecte des surfaces cumulées importantes (de 10 et 20 m² environ) ainsi que des plafonds situés à plusieurs mètres de hauteur (Fig. 4). Dans le sondage GE1, ouvert dans le secteur de l'Entrée, l'épaisseur de la couche 3, riche en charbons de bois et datée de l'Aurignacien, témoigne de l'importance des aires de combustion. Les données stratigraphiques ainsi que l'organisation de ce niveau à l'échelle microscopique indiquent que ces aires ont été remaniées par solifluxion puis enfouies sous des dépôts gravitaires (Debard *et al.*, 2016). Dans ce secteur proche de l'entrée paléolithique, il peut aussi bien s'agir de foyers étendus et contemporains que de feux réalisés à différents moments. Pour la Galerie des Mégacéros, compte tenu de l'étroitesse du passage, ce sont des feux répétés qui sont le plus probable. Ailleurs, dans le Diverticule des Ours, dans les Galeries du Cierge et des Croisillons, les altérations sont plus ponctuelles et situées à des hauteurs plus faibles. Les feux ont alors probablement été moins puissants et/ou moins fréquents.

En raison de la puissance des feux, les fonctions classiquement évoquées dans les autres grottes ornées semblent peu probables : éclairage, balisage du chemin, ravivage de torche, production du colorant, foyer domestique. D'autres hypothèses ont ainsi été proposées (Ferrier *et al.* 2014) :

une protection contre les animaux, l'ours des cavernes par exemple qui a occupé la grotte pendant l'intervalle de fréquentation aurignacienne. Un assainissement des sols en liaison avec la fréquentation animale. Une modification volontaire de l'état de surface des parois et des plafonds. Une production de fumée, de chaleur ou de lumière sans nécessité pratique autre que celle liée à un geste symbolique ou rituel.

Le second type de feu se rapporte à des rubéfiations de faible superficie, évoquant des dimensions et des puissances modestes. De telles traces sont visibles localement dans le Diverticule des Ours et la Galerie des Mégacéros (Fig. 4) ainsi qu'à l'extrémité de la Galerie du Cactus. Leurs caractéristiques peuvent s'accorder avec l'hypothèse de foyers destinés au balisage du cheminement ou avec celle de dispositifs de type lampe posé au sol ou calé en hauteur sur les parois.

Les expérimentations

Objectifs

Les questions posées par ces faciès de thermo-altérations et la puissance inhabituelle de certains feux (type 1) ont suscité l'élaboration de deux programmes de recherche, ayant pour but d'acquérir des données pour alimenter la discussion sur les conditions de réalisation et la fonction de ces foyers. La démarche s'appuie sur des expérimentations en domaine confiné, des essais en laboratoire, des analyses de la roche

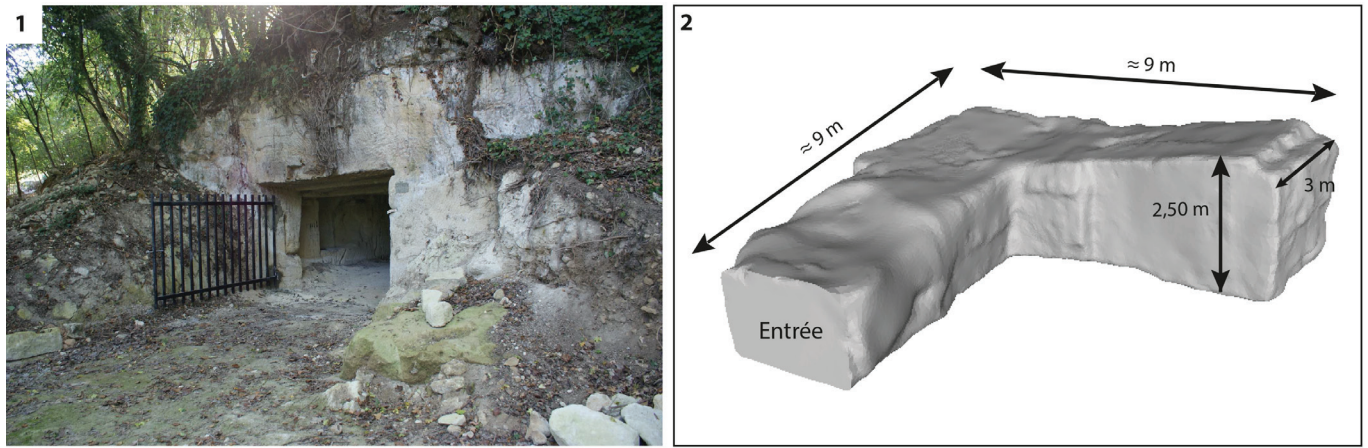


Fig. 5 - Carrière de Lugasson où ont été réalisées les expérimentations. 1 : Entrée de la carrière (cliché C. Ferrier) ; 2 : vue 3D et dimensions de la carrière (relevé D. Lacanette).

avant et après transformation ainsi que sur des simulations numériques aéro-thermo-mécaniques.

Les objectifs sont de dimensionner les feux de la grotte Chauvet-Pont d'Arc à partir de la reproduction des thermo-altérations, d'estimer les températures correspondant aux changements de coloration, de caractériser la nanostructure et la signature chimique des suies pour alimenter une base de données des produits de combustion issus de combustibles utilisés au Paléolithique (bois, os), de mener à bien un couplage aéro-thermo-mécanique pour simuler l'impact des feux sur les parois, et d'identifier les processus conduisant aux transformations de la roche.

Les expérimentations sont menées dans une carrière souterraine située dans l'Entre-deux-Mers (commune de Lugasson, Gironde). Celle-ci est constituée de deux galeries de 9 m de longueur, disposées à angle droit. À l'emplacement du feu, les dimensions sont de 3 m de largeur pour 2,50 m de hauteur (Fig. 5).

Estimation des températures correspondant aux changements de coloration

Les températures responsables des changements de coloration de la roche ont été estimées par des essais en laboratoire, dans le cadre du programme IThEM². Le protocole de chauffe a été appliqué à des échantillons de calcaire urgonien (Barrémien terminal, Bédoulien basal) provenant des bancs affleurant à l'extérieur de la grotte Chauvet-Pont d'Arc et de calcaire du Rupélien, issu de la carrière où ont été réalisées les expérimentations. Le cycle de chauffe en laboratoire a été effectué dans un four à moufle programmable en atmosphère naturelle. Il comprend une montée en température de 20°C/min, puis un palier d'une heure à température de consigne et enfin un refroidissement d'environ 5°C/min. Pour les deux types de calcaire, les changements de coloration, estimés visuellement, s'opèrent à 250°C pour la rubéfaction et à 375°C pour la coloration grise (Brodard *et al.*, 2014).

Reproduction des thermo-altérations

Des expérimentations pour altérer les parois

Lors des expérimentations réalisées en 2012 dans le cadre du programme IThEM, le feu a été établi à 20 cm de la paroi, sur une sole d'argile. Il a été alimenté toutes les 7 à 13 min



Fig. 7 - Expérimentation du programme IThEM. Après le feu, une coloration grise a été acquise par le calcaire, là où les températures ont été les plus élevées. La rubéfaction est périphérique (cliché C. Ferrier).

¹ Le programme IThEM « Les traces de feu de la grotte Chauvet : Des Impacts Thermiques sur les parois à la caractérisation des feux, Expérimentations et Modélisation », porté par P. Guibert (UMR 5060 IRAMAT-CRP2A) et C. Ferrier (UMR 5199 PACEA), financé via le LabEx LaScArBx, a bénéficié d'une aide de l'État gérée par l'Agence Nationale de la Recherche au titre du programme Investissements d'avenir portant la référence ANR-10-LABX-52.

pendant 5h 36 avec des fagots de bois de pin sylvestre disposés en tipi (Fig. 6. Cliché C. Ferrier en-tête d'article. *Expérimentation du programme IThEM. Les thermocouples sont disposés en surface de la paroi et sont implantés dans l'épaisseur de la roche, à différentes hauteurs*). Cette espèce végétale est analogue à celle identifiée par l'analyse anthracologique des charbons de bois associés aux structures de combustion ou localisés en amas sur les sols de la grotte Chauvet-Pont d'Arc (Théry-Parisot et Thiébault, 2005). La longueur des branches utilisées est de 40 cm pour des diamètres compris entre 8 et 66 mm. Le poids total de bois brûlé est de 94,9 kg. Les spectres Raman enregistrés sur les charbons de bois indiquent que les températures maximales ont été d'environ $800 \pm 50^\circ\text{C}$ (Deldicque *et al.*, 2016).

Quatre thermocouples ont été disposés à la surface de la paroi, à 52 cm, 97 cm, 117 cm et 217 cm au-dessus de la sole, afin de mesurer les températures de l'air au contact de la roche (Fig. 6). À chacun de ces emplacements, des capteurs de températures ont été implantés dans l'épaisseur de la paroi à des profondeurs de 3, 5, 8, 11 et 15 cm.

Après le feu, la paroi montre des thermo-altérations situées dans les parties exposées aux températures les plus élevées (Fig. 7) : une coloration grise est présente au contact et aux environs immédiats de la braise issue de la combustion du bois. Le thermocouple situé en surface à 52 cm du sol a enregistré des températures maximales de l'ordre de 500°C , avec des pics à 700°C (Fig. 8). Celui implanté à 3 cm de profondeur montre une élévation maximale à 300°C . Ces données sont compatibles avec les changements de coloration obtenus par les essais en four réalisés en laboratoire. Une carotte, réalisée immédiatement en dessous des thermocouples, révèle que la coloration grise est superficielle (un millimètre d'épaisseur environ) et masque une rubéfaction qui a progressé de 2,5 cm dans la roche.

Une rubéfaction périphérique est visible jusqu'à 120 cm au-dessus de la sole. Le thermocouple, situé en surface à 117 cm de hauteur, a enregistré des températures de 300°C - 350°C avec des pics à 400°C . Une carotte prélevée à proximité montre que l'épaisseur affectée par la rubéfaction est de 0,5 cm.

Une fissuration s'est produite en bas de paroi, à l'origine d'écaillés de 2 cm d'épaisseur maximum, détachées au sein de la partie rubéfiée. Des simulations thermomécaniques, tenant compte des propriétés mesurées de la roche et calées

sur la diffusion thermique expérimentale, indiquent que ces desquamations sont liées à des contraintes de compressions élevées, en pied de paroi (Mindeguia *et al.*, 2013).

Sur la paroi opposée au feu, située à 3 m du foyer, un changement de texture de la partie superficielle du calcaire a été observé : la roche devient suffisamment plastique, sur une épaisseur d'environ 3 mm, pour que des traits similaires à des tracés digitaux puissent être réalisés. Il s'agit d'une observation qualitative, aucune mesure de la dureté n'ayant pu être effectuée au cours de cette expérience. Dans la grotte Chauvet-Pont d'Arc, une distribution similaire des thermo-altérations s'observe à l'entrée de la Galerie des Mégacéros : en paroi droite, l'étude du Panneau du Mégacéros a montré une évolution de la texture de la roche entre la réalisation de dessins correspondant à des tracés au fusain sur une paroi dure et celle d'un signe en gerbe réalisé en gravure digitale, sur une paroi devenue plastique (Feruglio et Baffier, 2005). En face, à 3,5 m, le Panneau du Rhinocéros porte des traces de chauffe : rubéfaction et coloration grise, écaillage recoupant un autre signe en gerbe gravé selon la même technique, revêtement noir pouvant correspondre à un dépôt de suies. À titre d'hypothèse, nous relierons le changement d'état de surface observé en paroi droite au feu dont les impacts thermiques sont visibles sur la paroi opposée. La discussion de cette proposition nécessite la réalisation d'un référentiel à l'échelle macro et microscopique afin de distinguer les états de surface d'origine thermique de ceux issus de processus naturels, fréquents dans les cavités, en relation par exemple avec la formation du *mondmilch*.

Les images de MET Haute Résolution, obtenues lors des premiers examens des dépôts noirs présents sur les parois après le feu, montrent qu'il s'agit bien de nanoparticules « en oignon », typique des suies (Deldicque *et al.*, 2016). Leur dépôt s'est principalement produit sur le tiers supérieur des parois, c'est-à-dire dans la zone occupée par les fumées chaudes dégagées par la combustion du bois. Lors de chaque alimentation, ces fumées ont formé un nuage évacué vers la sortie de la carrière, au niveau du plafond, dès que les températures ont été suffisantes pour amorcer la convection. La simulation numérique d'un feu dans la Galerie des Mégacéros, utilisant le code FDS (*Fire Dynamics Simulator*), sur la base d'un modèle 3D simplifié, a reproduit cette disposition, également observée dans la grotte (Lacanette *et al.*, 2016).

Des expérimentations pour altérer les plafonds

Les expérimentations menées en 2016 dans le cadre du programme *CarMoThaP* ont permis de reproduire des feux assez puissants pour recréer les thermo-altérations visibles, à plusieurs mètres de hauteur, au plafond de la Salle des Bauges. Elles ont été réalisées dans la carrière de Lugasson, dont le plafond se trouve à 2,50 m du sol.

La démarche utilisée a comporté plusieurs étapes. Dans un premier temps, le dimensionnement du feu a été établi à partir d'essais en extérieur qui avaient pour but de définir et de valider le foyer type, en déterminant la quantité et le conditionnement du bois. Comme lors du programme IThEM, nous avons utilisé du bois d'élagage de pin sylvestre, conditionné en fagots de branches de 80 cm de longueur et de diamètres inférieurs à 4 cm (Fig. 9). Le poids moyen d'un fagot est de 5,5 kg.

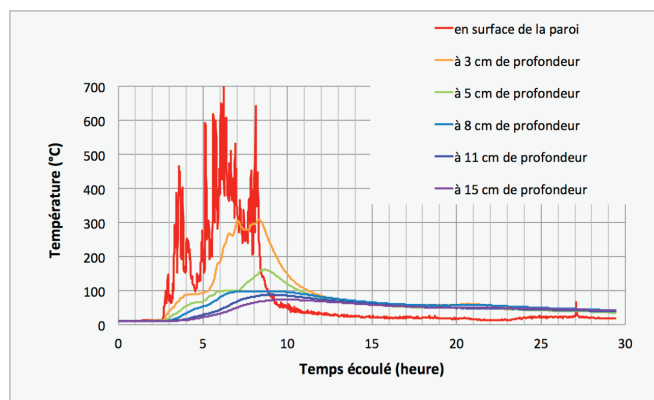


Fig. 8 - Expérimentation du programme IThEM. Températures enregistrées en surface et à différentes profondeurs dans la paroi.

Diamètre	Nombre de brins
> 1 cm	20
1 à 2 cm	12
2 à 3 cm	8
3 à 4 cm	1

Fig. 9 - Expérimentations du programme CarMoThaP. Constitution de chaque fagot : nombre de brins pour chaque calibre. Chaque brin a une longueur de 80 cm.

Ensuite, le feu a été caractérisé grâce à un essai sous hotte calorimétrique de grandes dimensions (laboratoire Efectis France, Maizières-Lès-Metz, Moselle). Il a été allumé à l'aide de 4 fagots puis alimenté avec la même quantité de bois toutes les 3 à 6 min, afin de maintenir la flamme à une hauteur de 2,50 à 3 m. 30 fagots ont été brûlés, ce qui correspond à un poids total de bois de 125 kg. Une balance de pesée située sous le foyer a mesuré la perte de masse au cours de la combustion. Des analyseurs de gaz ont enregistré la consommation en O₂ et la production de CO et CO₂. Les mesures ont permis le calcul de la puissance du foyer (débit calorifique ou HRR-Heat Release Rate), égale à 1,3 MW au maximum. Neuf thermocouples ont par ailleurs enregistré les températures de 1 m à 3 m de hauteur au-dessus du foyer. Dix autres ont été disposés dans l'environnement.

Ces données ont été utilisées pour réaliser une simulation numérique du feu dans le volume 3D de la carrière, avec le code de calcul FDS (Dréan *et al.*, 2017). Celle-ci a conduit à reconsidérer le mode d'alimentation en diminuant à 2 fagots la quantité de bois apportée, afin de maintenir constante la hauteur des flammes. De plus, elle a montré la nécessité de prendre des mesures de sécurité. Les expérimentations ultérieures, dans la carrière de Lugasson, ont pu être réalisées grâce à une collaboration avec les équipes spécialisées du SDIS 33, équipées d'ARI (Appareil Respiratoire Isolant). Enfin, le feu a été reproduit à trois reprises dans la carrière

afin d'étudier la reproductibilité des résultats. Le foyer a été allumé à l'aide de 4 fagots disposés en tipi puis a été alimenté toutes les 3 mn en moyenne avec 2 fagots (Fig. 10). L'hygrométrie du bois a été mesurée par résistivité électrique sur un échantillonnage représentatif de chaque fagot. Les feux ont duré environ 70 mn, puis le bac contenant les braises a été extrait de la carrière. La masse de bois brûlé est de 134 kg en moyenne. Lors du premier feu, le rythme de l'alimentation, conçu pour maintenir une flamme d'une hauteur constante d'au moins 2,50 m, a été piloté depuis l'extérieur grâce à une acquisition vidéo (caméra CCD) située au sol dans la carrière. Le même protocole a été appliqué pour les deux feux suivants.

Le site a été équipé de capteurs qui ont enregistré les températures à différentes hauteurs et distances par rapport au foyer. Une balance a enregistré la perte de masse lors de la combustion. Plusieurs analyseurs de gaz (O₂, CO et CO₂) de type Servomex ont été implantés sur le trajet emprunté par les circulations d'air, du foyer vers l'entrée de la carrière. Les suies se sont déposées par gravité et ont été piégées par thermophorèse sur des plaques d'aluminium (15 x 15 cm) posées verticalement et horizontalement. Leur concentration dans l'écoulement de fumée a été mesurée en plusieurs endroits grâce à des dispositifs PPS (*Pegasor Particle Sensor*) et par des opacimètres différentiels. Enfin, la vitesse d'entrée des gaz frais a été estimée par une sonde Mac Caffrey en partie haute et un anémomètre à ultrason en partie basse.

Les impacts thermiques obtenus sur le plafond correspondent à ceux observés dans la grotte Chauvet, pour des hauteurs comparables, dans la partie sud de la Salle des Bauges et localement dans la Galerie des Mégacéros (Fig. 11). Lors du premier essai, une coloration grise, localisée dans la zone de contact des flammes avec le plafond à l'aplomb du foyer ainsi qu'une rubéfaction affectant une surface impactée par les gaz chauds sur une superficie de l'ordre de 2 m² ont été constatées. Ces altérations sont accompagnées du détachement d'une mince plaquette thermique (5 x 5 x 0,5 cm environ). À l'issue des deux autres feux, la zone rubéfiée s'est



Fig. 10 - Expérimentations du programme CarMoThaP. 1 : Allumage du foyer avec 4 fagots disposés en tipi. 2 : Etat du feu après 50 mn de combustion. Les flammes atteignent le plafond. La partie claire correspond à la coloration grise acquise par la surface du calcaire (extraits d'une vidéo, LCPP).

considérablement élargie sur la partie supérieure des parois, soumise à la circulation des gaz chauds, et les thermoclastes sont plus nombreux. Certains sont tombés plusieurs heures à plusieurs jours après l'expérimentation. Le faible intervalle de temps entre les trois feux, en empêchant un retour à la température initiale du matériau, pourrait expliquer l'importance de ce phénomène, par cumul des contraintes. Les dépôts noirs recouvrant le plafond et les parties hautes de parois correspondent à des suies.

Conclusions et perspectives

Ces données expérimentales attestent que l'acquisition de la coloration grise nécessite un contact prolongé de la roche avec la flamme, à une température minimale de 475°C. Elles montrent également que la coloration rose peut être due à la chauffe du calcaire par les gaz de combustion, à des températures comprises entre 250 et 475°C. Ceci nous donne des indications sur la position et l'intensité des feux dans la grotte Chauvet-Pont d'Arc. Par exemple, dans la Galerie des Mégacéros, les thermo-altérations ne sont jamais visibles en bas des parois, attestant que les feux n'étaient pas adossés à celles-ci mais installés dans l'axe du conduit. La puissance thermique requise pour l'obtention de la coloration grise

et pour l'écaillage, évaluée à partir des expérimentations du programme CarMoThaP, confirme que certains feux ont interdit la circulation humaine d'une extrémité à l'autre de la galerie, en raison de l'étroitesse de cette dernière. À défaut d'identifier la fonction précise de ces feux puissants, ces nouveaux éléments semblent écarter définitivement les hypothèses de balisage et d'éclairage. Reste bien entendu l'hypothèse de la production de fusains, qui devaient être abondants pour réaliser l'ensemble des fresques des salles profondes, mais qui ne peut correspondre aux foyers de forte puissance.

Si la coloration rose acquise par la paroi dans le Diverticule des Ours est étonnamment associée aux dessins d'animaux réalisés avec de l'hématite (rouge), elle n'a pas toujours été intégrée à l'ornementation. Cependant, un résultat inattendu de ces expérimentations – l'acquisition d'une texture plastique de la surface de la roche – soulève plus fortement que pensé jusqu'alors la question d'une modification intentionnelle des parois, dont les changements de coloration sont un autre aspect, visuel cette fois-ci. Qu'elle ait été volontaire ou non, cette modification a permis la réalisation d'un décor en gravures digitales, qui a entraîné la quasi-disparition d'un premier ensemble pariétal de dessins noirs. Quel que soit le

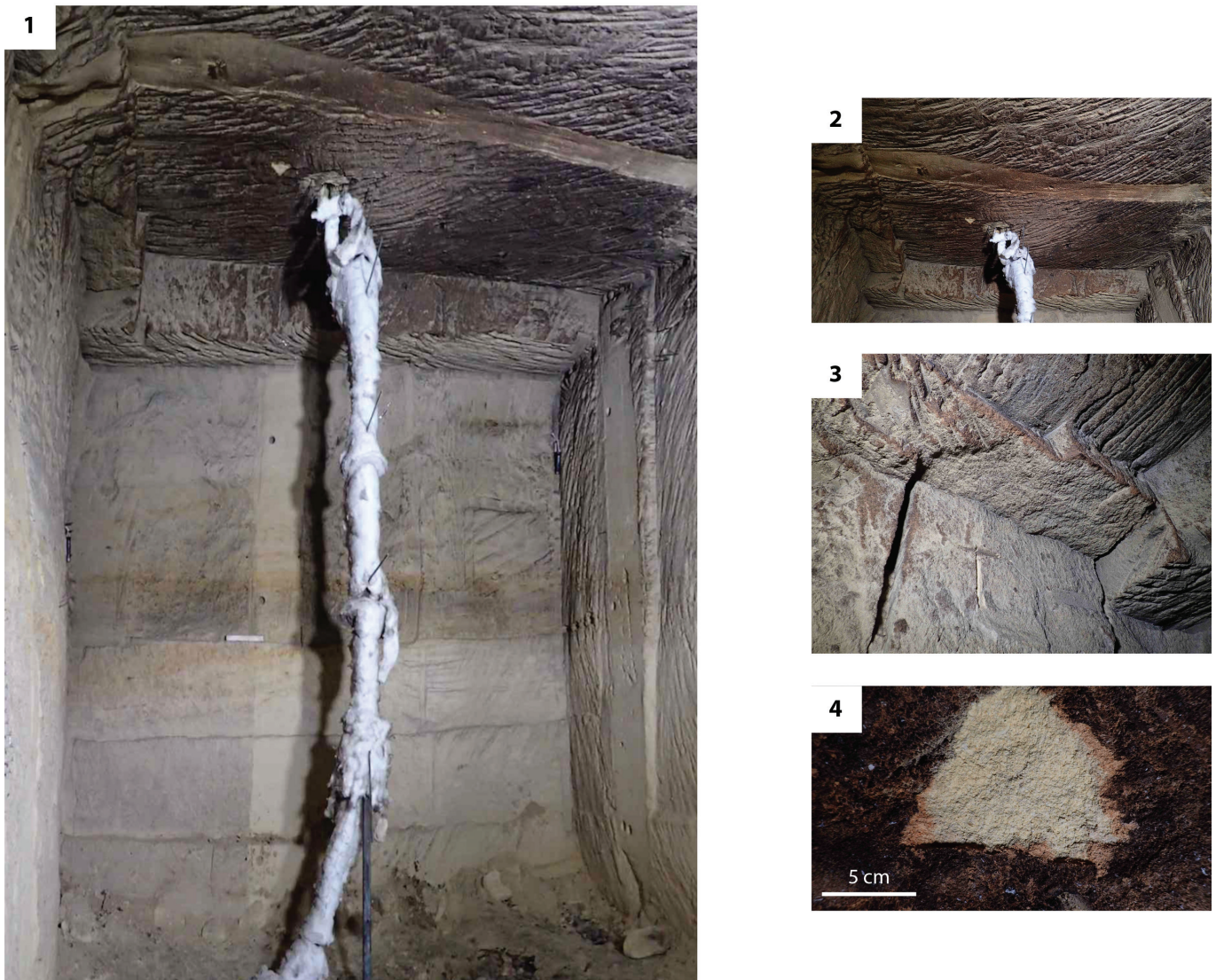


Fig. 11 - Expérimentation du programme CarMoThaP. 1 et 2 : Après les feux, le plafond présente une coloration grise à l'aplomb des flammes. 2 : En périphérie, s'est développée une rubéfaction qui affecte également la partie supérieure des parois. 3 : De fines écailles se sont détachées immédiatement et plusieurs jours après les feux (clichés C. Ferrier).

degré d'intentionnalité des effets des feux, ils ont participé à la dynamique graphique qui caractérise cette zone ornée de la grotte Chauvet-Pont d'Arc.

Les résultats obtenus vont également permettre d'évaluer la quantité de bois minimale nécessaire pour reproduire ces thermo-altérations. Les premières données laissent déjà entrevoir d'importantes quantités de combustible. De tels volumes amènent de nombreuses questions quant à l'acquisition et au transport jusqu'à la grotte mais également à l'intérieur de la cavité, la Galerie des Mégacéros nécessitant un cheminement de plus d'une centaine de mètres sous terre et le franchissement d'un passage bas (le Seuil). Les possibilités d'alimentation du feu, compte tenu des températures et du dégagement des gaz toxiques, pourront être discutées à partir des simulations numériques. L'étude de la nanostructure et de la composition physico-chimique des suies va alimenter un référentiel intégré à une base de données sur les carbonisats issus de combustibles utilisés au Paléolithique.

Les processus responsables des transformations minéralogiques à l'origine des changements de coloration du calcaire et de l'évolution de sa dureté seront étudiés à partir d'échantillons prélevés avant et après les feux. Les résultats d'un suivi *in situ* de tomographie de résistivité électrique permettront de mieux cerner l'implication des variations de teneur en eau de la roche pendant et après la chauffe. Enfin, un couplage aéro-thermo-mécanique pour simuler

l'impact des feux sur les parois et les plafonds est en cours d'élaboration sur la base du code *open source* de combustion *Open Foam* avec le module *Fire Foam*.

Une dernière interrogation concerne la durée pendant laquelle la texture plastique acquise par la paroi sous l'effet de la chaleur perdure. Son estimation permettrait d'évaluer le temps écoulé entre les feux et la réalisation des gravures digitales, et ainsi d'affiner la dynamique de fréquentation de la grotte Chauvet-Pont d'Arc et des diverses activités dont elle fut le théâtre. ■

Remerciements

Les recherches dans la grotte Chauvet-Pont d'Arc ont bénéficié d'une aide financière spécifique du Ministère de la Culture et de la Communication. Par ailleurs, les institutions suivantes nous ont apporté leur soutien : CNRS, Conseil régional d'Aquitaine et de la Nouvelle Aquitaine, Université de Bordeaux, Université Bordeaux Montaigne.

Nous remercions C. Bouchet, propriétaire de la carrière de Fauroux à Lugasson et M. Vidal pour la mise à disposition du bois de pin sylvestre, ainsi que le personnel du SDIS 33 pour leur participation aux expérimentations du programme CarMoThaP. Nos remerciements vont également à M. Corbé, L. Bassel, M. Bosq, E. Florensan, J. Sabidussi et C. Verdet pour leur aide précieuse lors du conditionnement du bois et leur participation aux expérimentations du mois de novembre 2016.

Références bibliographiques

- BRODARD A., GUIBERT P., FERRIER C., DEBARD E., KERVAZO B., GENESTE J.M. (2014) – Les rubéfections des parois de la grotte Chauvet : une histoire de chauffe ? *Actes du colloque MADAPCA, Micro Analyses et Datations de l'Art Préhistorique dans son Contexte Archéologique*, MNHN-C2RMF, 16-18 novembre 2011, PALEO, special issue, 2014, p. 233-235.
- CHAUVET J.-M., BRUNEL-DESCHAMP É., HILLAIRE C. (1995) – La grotte Chauvet à Vallon-Pont-d'Arc, Paris, *Éditions du Seuil*, coll. Arts rupestres, 118 p.
- DEBARD É., DELANNOY J.-J., FERRIER C., KERVAZO B., PERRETTE Y., PERROUX A.-S. (2002) – Les études karstogéniques menées dans la grotte Chauvet. Premiers résultats et implications paléoenvironnementales, *Bulletin de la Société Préhistorique Ariège-Pyrénées*, LVII, 29-52.
- DEBARD É., DELANNOY J.-J., FERRIER C., JAILLET S., KERVAZO B., SADIÉ B. (2015) – L'apport des géosciences, *Les Dossiers de l'Archéologie*, n° spécial « La grotte Chauvet-Pont d'Arc, vingt ans après » (Clottes J. et Geneste J.-M., coord), p. 24-29.
- DEBARD É., FERRIER C., KERVAZO B. (2016) – Grotte Chauvet-Pont d'Arc (Ardèche) : évolution morphosédimentaire de l'entrée. Implication sur les occupations et sur la conservation des vestiges, *Quaternaire*, 27, 1, p. 3-14.
- DELANNOY J.-J., DEBARD É., FERRIER C., KERVAZO B. et PERRETTE Y. (2001) – La cartographie morphologique souterraine : apports aux reconstitutions paléogéographiques et paléo-environnementales. Application à la grotte Chauvet (Ardèche, France), *Quaternaire*, Paris, 12, 4, p. 235-248.
- DELDICQUE D., ROUZAUD J.-N., VELDE B. (2016) – A Raman – HRTEM study of the carbonization of wood; A new Raman-based paleothermometer dedicated to archaeometry. *Carbon*, 102, p. 319-329.
- DREAN V., AUGUIN G., SARFATI S., LEBLANC J.-C., LACANETTE D., MINDEGUIA J.-C., BELLIVIER A., FERRIER C. (2017) – Numerical modelling of thermal conditions during fires in cave-like geometry, *15th International Conference Fire and Materials 2017*, 6-8 February 2017, San Francisco (USA).
- FERRIER C., DEBARD É., KERVAZO B., PERROUX A.-S., DELANNOY J.-J., PERRETTE Y. (2005) – Grotte Chauvet - Salle Hillaire et salle du Crâne : contexte sédimentologique des vestiges d'origine humaine et animale, in J.-M. Geneste dir., *La grotte Chauvet à Vallon-Pont-d'Arc : un bilan des recherches pluridisciplinaires, Actes de la séance de la Société préhistorique française*, Lyon 2003, Paris : Édition Société préhistorique française (Travaux 6)
- FERRIER C., DEBARD É., KERVAZO B., BRODARD A., GUIBERT P., BAFFIER D., FERUGLIO V., GÉLY B., GENESTE J.-M., MAKSUD F. (2014) – Les parois chauffées de la grotte Chauvet-Pont d'Arc (Ardèche, France) : caractérisation et chronologie, *Paléo*, 25, p. 59-78.

FERUGLIO V., BAFFIER D. (2005) – Les dessins noirs des salles Hillaire et du Crâne, une chronologie relative, in J.-M. Geneste dir., La grotte Chauvet à Vallon-Pont-d'Arc : un bilan des recherches pluridisciplinaires, *Actes de la séance de la Société préhistorique française*, Lyon 2003, Paris : Édition Société préhistorique française (Travaux 6)

GENESTE J.-M. (2005) – L'archéologie des vestiges matériels dans la grotte Chauvet : paléobiologie et anthropozoologie, in J.-M. Geneste dir., La grotte Chauvet à Vallon-Pont-d'Arc : un bilan des recherches pluridisciplinaires, *Actes de la séance de la Société préhistorique française*, Lyon 2003, Paris : Édition Société préhistorique française (Travaux 6)

GENTY D. (2012) – Les spéléothèmes de la grotte Chauvet-Pont d'Arc. Apports chronologiques et paléoclimatologiques. Synthèse des travaux publiés, in : J.-J., Delannoy, S. Jaillet, B. Sadier (eds.) Karsts, Paysages et Préhistoire, collection *EDYTEM*, 13, p. 79-88.

GUIBERT P., BRODARD A., QUILES A., GENESTE J.-M., BAFFIER D., DEBARD É., FERRIER C. (2015) – When were the walls of the Chauvet-Pont d'Arc Cave heated? A chronological approach by thermoluminescence, *Quaternary Geochronology*, 29, p. 36-47.

KERVAZO B., FERUGLIO V., BAFFIER D., DEBARD É., FERRIER C., PERROUX A.-S., AUJOLAT N., DELANNOY J.-J., PERRETTE Y. (2010) – Parois et art pariétal : approche taphonomique. L'exemple de la grotte Chauvet (Pont d'Arc), in : Mise en commun des approches en taphonomie, actes du workshop n°16, *XV^e congrès international de l'UISPP*, Lisbonne, septembre 2006, *Paleo*, supplément 3, p. 43-52.

LACANETTE D., MINDEGUIA J.C., FERRIER C., DEBARD É., KERVAZO B. (2016) – Three-dimensional simulation of a fire in a simplified gallery of the Chauvet-Pont d'Arc cave, in : The three dimensions of Archaeology, proceedings of the XVII UISPP World Congress (1-7 September 2014, Burgos, Spain), *Archaeopress Archaeology*, Volume 7/Sessions A4b and 12, 49-60.

MINDEGUIA J.-C., SIRIEUX C., BRODARD A., GUIBERT P., FERRIER C., MALAURENT P., LACANETTE D. (2013) – Simulation de l'impact thermomécanique d'un feu en carrière calcaire souterraine. Implications pour l'étude des feux paléolithiques de la grotte Chauvet-Pont d'Arc (Ardèche), *Congrès Français de Mécanique*, 26-30 août 2013, Bordeaux, <http://hdl.handle.net/2042/52766>.

RENAULT Ph. (1989) – Étude micromorphologique des parois décorées, in : L'art pariétal paléolithique, *actes des colloques de la Direction du Patrimoine*, Périgueux – Le Thot, novembre 1984, p. 203-205.

SADIER B., DELANNOY J.-J., BENEDETTI L., BOURLES L., JAILLET S., GENESTE J.-M., LEBATARD A.-E., ARNOLD M. (2012) – Further constraints on the Chauvet cave artwork elaboration, *PNAS*, USA, 109, p. 8002-8006.

THÉRY-PARISOT I., THIÉBAULT S. (2005) – Le pin (*Pinus sylvestris*) : préférence d'un taxon ou contrainte de l'environnement ? Étude des charbons de bois de la grotte Chauvet, in : J.-M. Geneste dir., La grotte Chauvet à Vallon-Pont d'Arc : un bilan des recherches pluridisciplinaires, *Actes de la séance de la Société préhistorique française*, Lyon 2003, Paris : Édition Société préhistorique française (Travaux 6)



Allumage du foyer dans la carrière (photo C. Ferrier).

a : combustible disposé en tipi ; b : plaques d'aluminium pour le piégeage des suies ; c : dispositif de maintien des thermocouples mesurant la température de l'air à différentes hauteurs ; d : balance pour l'enregistrement de la perte de masse ; e : dispositif de suivi de tomographie de résistivité électrique.

Sommaire général

Edito	Nicolas Lateur	1
Première partie : articles		
Les feux de la grotte Chauvet-Pont d'Arc	C. Ferrier <i>et al.</i>	3
La baume du Guetteur à Vallon-Pont-d'Arc	R. Furestier <i>et al.</i>	13
▼ Regards croisés sur les dolmens ardéchois		21
Jules Ollier de Marichard, Léopold Chirons.	S. Stocchetti, L. Devillard	21
Les mégalithes de Saint-Laurent-sous-Coiron	G. Duchez	28
Étude anthropologique et spatiale du dolmen des Abrits n°2 à Beaulieu	C. Bouffies <i>et al.</i>	31
Une perle exceptionnelle découverte dans un dolmen de Barjac (Gard)	O. et A.-Ch. Gros et J. Combier	40
Les cartes postales anciennes des dolmens de l'Ardèche	Ph. Drouin	44
Billes chasséennes en roche polie	J.-P. Vénobre	47
Le Serre de Boidon (Grospierres)	R. Furestier <i>et al.</i>	52
Le mobilier métallique du versant sud-oriental du Massif Central	G. Guillaume	54
La stèle de <i>Caius Petronius Junior</i>	R. Lauxerrois et A. Poinot	57
Sous la place du Champ-de-Mars, le couvent des Cordeliers	A. Saison	63
La Commanderie de Jalès (Berrias-et-Casteljau)	L. D'Agostino, E. Régagnon	68
Deuxième partie : informations		
L'activité archéologique en Ardèche en 2016	A. Blin	76
L'activité de la Mission archéologique du département de l'Ardèche	A. Saison	81
Rendez-vous Archéo de l'Ardèche	N. Lateur et A. Saison	83
Cité de la Préhistoire d'Ornac	P. Guillermin <i>et al.</i>	85
Projet de valorisation et de protection des dolmens	S. Stocchetti	89
MuséAl	A. Poinot	91
Soyons, site archéologique, grottes, musée	F. Derym	92
Musée des Vans	T. Chemin	94
Antenne CNRS d'Archéorient à Jalès	O. Barge	95
Pays d'art et d'histoire du Vivarais méridional	J. Lesgourgues	97
Chroniques de CARTA	J.-Cl. Courtial	98
Michel Rouvière	J. et D. Dupraz	99
Randa Ardesca	Randa Ardesca	101
Jean-Louis Roudil	X. Guthertz <i>et al.</i>	102
Vie de la FARPA et des Associations	E. Tschertter <i>et al.</i>	105
Lectures et documentation	L. Ayzac <i>et al.</i>	112

Le contenu des articles, les illustrations et les opinions exprimées engagent la seule responsabilité de leurs auteurs. N.D.L.R.

ARDÈCHE ARCHÉOLOGIE



▼ regards croisés
sur les dolmens de l'Ardèche