



HAL
open science

Analyse 3D des volumes et remplissages souterrains de la grotte aux Points au temps des fréquentations paléolithiques (Aiguèze, Gard)

Stéphane Jaillet, Julien Monney

► **To cite this version:**

Stéphane Jaillet, Julien Monney. Analyse 3D des volumes et remplissages souterrains de la grotte aux Points au temps des fréquentations paléolithiques (Aiguèze, Gard). *Karstologia*, 2018, La grotte aux Points d'Aiguèze: petite soeur de la grotte Chauvet (1), 72, pp.27-36. hal-01878453

HAL Id: hal-01878453

<https://sde.hal.science/hal-01878453v1>

Submitted on 18 Oct 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.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial 4.0 International License

Stéphane JAILLET¹
et Julien MONNEY²

(1) Laboratoire EDYTEM,
Université de Savoie, CNRS,
Pôle Montagne, 73376
Le Bourget-du-Lac, France
stephane.jaillet@univ-smb.fr

(2) Projet « Datations Grottes
Ornées », EDYTEM –
Université de Savoie, CNRS
(Chambéry, France)
julien.monney@univ-smb.fr

Analyse 3D des volumes et des remplissages souterrains de la grotte aux Points au temps des fréquentations paléolithiques (Aiguèze, Gard)

RÉSUMÉ : L'analyse proposée ici à la grotte aux Points répond à l'objectif simple de rendre compte d'un état plausible de la grotte au temps des fréquentations humaines paléolithiques. La démarche repose sur l'utilisation de relevés scanners (lasergrammétrie terrestre), sur des observations géomorphologiques, ichnologiques et sédimentologiques, et sur l'assemblage de tous ces éléments dans un modèle 3D unifié. Celui-ci constitue alors le support de modélisation des paléo-surfaces investiguées et *in fine* permet l'édition de cartes topographiques synthétisant l'ensemble des données d'observation actuelles et facilitant ainsi l'appréhension

de surfaces aujourd'hui disparues. Au final, l'approche réalisée constitue un support à une analyse géographique et géométrique des fréquentations et de l'art pariétal paléolithique dans l'espace de la cavité.

MOTS-CLEFS : analyse 3D, lasergrammétrie terrestre, modélisation, grotte ornée, art paléolithique.

ABSTRACT: 3D ANALYSIS OF THE VOLUMES AND FILLINGS OF POINTS CAVE AT THE TIME OF ITS PALAEO-LITHIC USES (AIGUÈZE, GARD, FRANCE). The analysis proposed here at Points cave is aiming at giving a plausible state of the cave at the time of Palaeolithic human uses. The approach

is based on terrestrial lasergrammetry, geomorphological observations, ichnologies and sediments, and the assembly of all elements in a unified 3D model. This model constitutes the support for the paleo-surfaces studied and, *in fine*, allows the editing of topographical maps synthesizing all the current observation data. This project gives an image of surfaces that have since disappeared. In the end, the approach realized is a support for a geographic and geometric analysis of the Palaeolithic parietal art in the cave.

KEYWORDS: 3D analysis, terrestrial lasergrammetry, modelisation, cave art, palaeolithic rock-art.

Introduction

En accompagnement des diverses études disciplinaires entreprises (ce numéro), la grotte aux Points d'Aiguèze (Gard) a fait l'objet d'un travail de recherche à vocation géomorphologique. Ainsi, parallèlement aux recherches archéologiques relatives à l'art pariétal et aux fouilles des sols, un effort important a été consacré à l'analyse géomorphologique et géométrique des surfaces endokarstiques en vue de mieux comprendre l'évolution de la cavité avant, pendant et après les fréquentations paléolithiques. En effet, les parois les mieux préservées laissent entrevoir un art pariétal relativement discret, attribuable au Paléolithique supérieur [Brunel & al., 2008 ; Monney, *ce numéro*] dont les nombreux points communs avec certains

des motifs de la grotte Chauvet n'ont pas manqué d'être soulignés à maintes reprises [Chauvet & al., 1995 ; Gély, 2005 ; Gély & al., 2002]. Les remplissages et les parois de la grotte ont, quant à eux, subi depuis une série de perturbations majeures. Ainsi, sur la totalité de son développement, il ne reste guère d'espace où la topographie contemporaine de l'ornementation paléolithique soit encore discernable aujourd'hui. Partout, ce n'est que le paysage d'un sol remué, perturbé, fait d'excavations et de remblais donnant çà et là une impression étrange d'artificialisation profonde du milieu souterrain (photo 1).

Si les tenants et les aboutissants de ce démantèlement des sols restent pour l'heure encore difficiles à cerner (extraction de terre en vue d'amender

les champs le long des gorges de l'Ar-dèche?), ces perturbations se placent probablement quelque part entre le Haut Moyen-Âge et la seconde moitié du XIX^e siècle [Monney et Jaillet, *numéro suivant*]. Cela dit, pour historiques qu'elles puissent être, celles-ci ne sont pas sans se placer au cœur d'un certain nombre d'enjeux quant à la compréhension des phénomènes de fréquentation et d'ornementation de la cavité. Quelle pouvait être la morphologie des lieux au moment de la réalisation des motifs pariétaux ? Quels sont, à l'heure actuelle, les secteurs en place où des niveaux archéologiques stratifiés pourraient encore être conservés ? Mais aussi, quelle part du dispositif pariétal est susceptible d'avoir disparu du fait de l'éclatement des parois et du dépôt de remblais contre ces dernières ?

C'est afin de disposer d'éléments de discussion concernant les modalités de fréquentation et d'ornementation de la cavité au Paléolithique supérieur que l'étude géomorphologique de la cavité a été entreprise à partir de 2012. Cette étude s'est développée autour d'une analyse des modifications « post-dépositionnelles » – ou plus exactement dans le cas présent « post-fréquentations paléolithiques » – subies par les sols et les parois de la cavité, ces modifications impliquant à la fois des phénomènes naturels (concrétionnement, ravinement et autres) et des activités humaines (en premier lieu les activités d'extraction de sédiment) susceptibles d'avoir eu une incidence sur la géométrie actuelle des surfaces du sol et l'accès aux parois.

I. Une approche terrain et numérique des surfaces géométriques actuelles et passées

Pour analyser correctement le contexte souterrain et offrir une représentation cohérente de sa possible morphologie au moment des fréquentations paléolithiques, il convenait de disposer au préalable d'une connais-

sance correcte de la géométrie actuelle du volume souterrain. C'est en effet seulement ainsi qu'il devient possible de modéliser la géométrie de surfaces aujourd'hui disparues et en particulier du « Niveau Pré-Exploitation », de la « Zone Exploitée », de la zone de « Remblais historiques » et du « Niveau de Fréquentation paléolithique ».

Par définition, nous appellerons ici « Niveau Pré-Exploitation » ou NPE la surface qui devait être celle du sol de la grotte avant les activités d'extraction. Tandis que ZE désignera la « Zone Exploitée », c'est-à-dire le volume réellement décaissé lors des activités d'extraction historiques. Par extension et simplification ZE désignera aussi ici la surface de fond de cette extraction, c'est-à-dire le mur (au sens géologique du terme) de la couche exploitée. Quant à la zone R, elle correspond à la zone « Remblayée historiquement », c'est-à-dire au dépôt de cailloux et de blocs rejetés sur place qui se trouvent aujourd'hui accumulés sur le sol. Autrement dit, il s'agit des stériles de l'extraction qui n'ont pas été évacués au moment de l'exploitation et qui sont restés dans la cavité, constituant ainsi de spectaculaires talus (photo 1). Enfin, nous appellerons NF le « Niveau

de Fréquentation », c'est-à-dire la surface virtuelle sur laquelle les circulations ont potentiellement eu lieu au Paléolithique supérieur. Cette surface géométrique reste délicate à identifier et surtout extrêmement proche de NPE, dont on peut supposer qu'elle est séparée seulement par quelques modifications naturelles subies par la grotte entre le Paléolithique supérieur et la période historique (souvent un scellement par un plancher stalagmitique et par la décompression des parois). Si ces deux surfaces sont mentionnées de manière distincte seul NPE fera l'objet d'une modélisation, valant en première approximation pour NF.

A. Relevés de terrain et traitements informatiques

Le travail s'est organisé selon une succession d'étapes qui a permis, d'aller de la grotte actuelle (figure 1) – objet naturel investigué – jusqu'à la proposition, sous forme cartographique, d'une morphologie potentielle de la paléo-grotte au temps des fréquentations paléolithiques. Il est à souligner que des démarches similaires associant analyse géomorphologique et modélisation 3D ont été entreprises par ailleurs avec succès, et avec un niveau de finalisation plus ou moins important selon les sites, à la grotte Chauvet [Delannoy & al., 2010; Sadier, 2013], aux Deux-Ouvertures en Ardèche [Monney & al., 2014a], à la grotte des Gorges dans le Jura [Cailhol, 2011], ainsi qu'à la grotte des Fraux en Dordogne [Jaillet & al., 2014]. Dans le cas de la grotte aux Points, l'approche s'est plus spécifiquement tournée vers l'appréhension de la géométrie des différentes surfaces recherchées telles qu'elles étaient susceptibles de se présenter antérieurement aux perturbations historiques. Pour ce faire, l'analyse géomorphologique a été déclinée en trois temps : (1) relevé scanner exhaustif de la cavité, (2) analyse et caractérisation des témoins géomorphologiques, ichnologiques et sédimentologiques d'anciens niveaux de remplissage et (3) assemblage et positionnement de ces deux types d'informations – topographiques et qualitatives – au sein d'un modèle géométrique commun. La première des opérations a été réalisée sur le terrain en 2012 tandis que l'assemblage des scènes 3D a été effectué en laboratoire en 2013. Quant aux deux dernières opérations, elles ont été amorcées sur le terrain en 2013 et finalisées en 2014.

Photo 1: La grotte aux Points est un conduit dont le sol est encombré de débris et de remblais constituant des talus importants qui traduisent la profonde artificialisation du volume souterrain à l'époque historique (quelque part entre le Haut Moyen-Âge et la seconde moitié du XIX^e siècle). Les activités d'extraction ayant généré ces déblais ont ainsi fortement contribué à modifier la morphologie des volumes souterrains préexistants et à complexifier la compréhension du dispositif pariétal paléolithique et de son contexte archéologique. Cliché S. Jaillet.

Points cave is characterized by traces of excavation and backfill which reflect the deep artificialization of the underground volume. This modification occurs somewhere between the early Middle Age and the second half of the 19th. Due to these perturbations, Palaeolithic rock-art and archaeological context are difficult to understand.



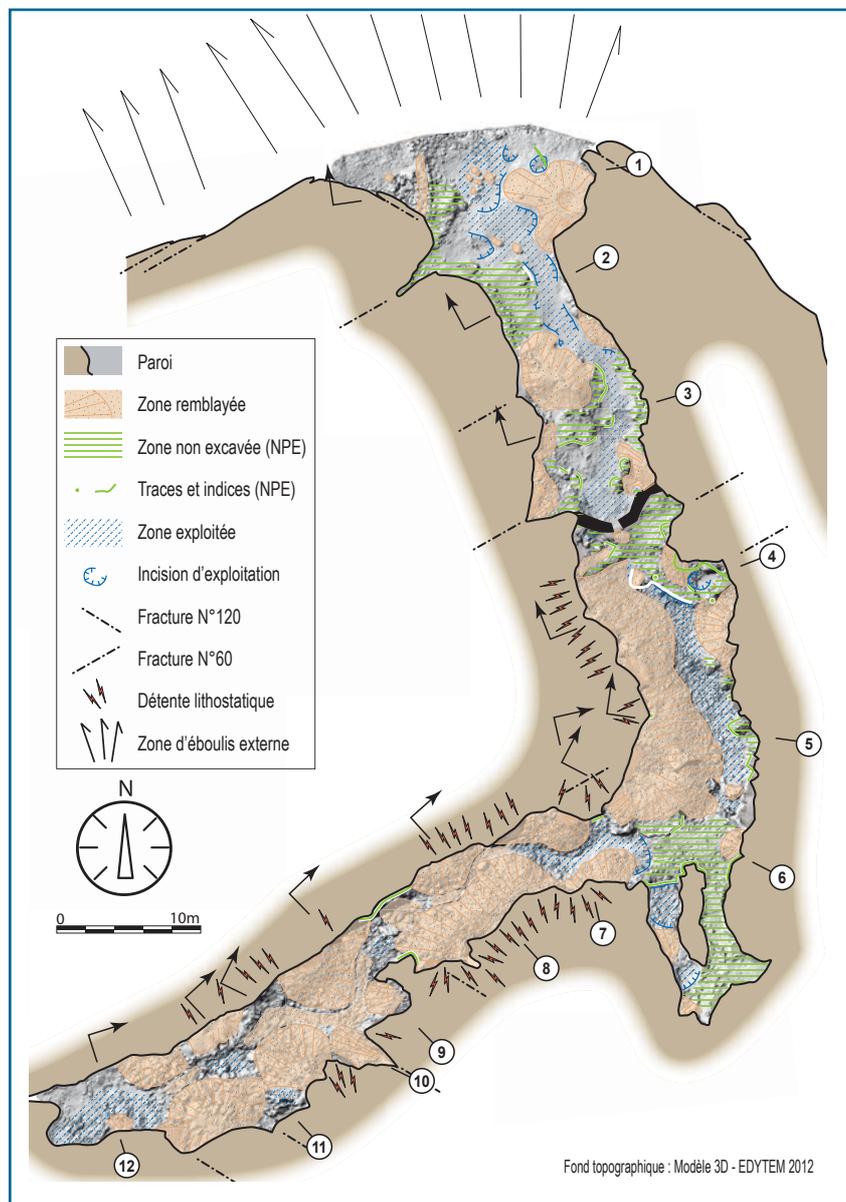
B. Relevé 3D des volumes souterrains actuels

La grotte a tout d'abord été scannée par lasergrammétrie dans sa totalité; ce qui s'est traduit par l'acquisition sur le terrain de 43 scènes de scan, consolidées par la méthode des sphères [Jaillet & al., 2011]. Le nuage ainsi obtenu a ensuite été traité à 1/16 des points pour l'obtention d'un modèle de 112 millions de points, lequel a été décimé et nettoyé jusqu'à atteindre environ 20 millions de points. Ce nuage a enfin été découpé afin de séparer le sol et le plafond. Lors de cette dernière étape, les parois ont, par convention, été rattachées au plafond alors que la limite latérale du sol a été considérée comme constituant la limite basse de la paroi. Ce choix, parfaitement adapté dans le cas de la grotte aux Points, s'avère généralement commode dans la plupart des cavités où le niveau de remplissage est important et les parois légèrement « surplombantes ». Cependant, dans d'autres cavités, des solutions différentes peuvent parfois s'imposer. De même, il faut rester conscient que cette segmentation manuelle des sols et des plafonds ne relève bien évidemment pas de critères foncièrement « objectifs » mais dépend essentiellement des choix que l'opérateur effectue à chaque étape.

Douze coupes transversales ont ensuite été extraites du modèle en sélectionnant des secteurs stratégiques; c'est-à-dire des endroits offrant une certaine représentativité à l'échelle du tronçon de conduit investigué et suffisamment intéressants pour servir de support aux informations relevées par la suite sur le terrain (figure 2). Deux coupes longitudinales distinctes ont également été réalisées: l'une sur le tronçon septentrional de la cavité, et l'autre sur le tronçon méridional (figure 3). En effet, la grotte étant calée sur deux segments tectoniques, son tracé présente un angle droit à mi-parcours (figure 1). Par conséquent, il paraissait plus efficient de rester dans la logique de cette organisation spatiale du volume souterrain et de proposer deux coupes s'articulant au niveau du virage. Ces coupes, ainsi que le fond topographique détaillé des sols, constituent les supports géométriques fins sur lesquels ont été reportées les observations qualitatives relevées sur les sols et les parois.

C. Identification des témoins géomorphologiques, ichtnologiques et sédimentologiques

Une fois muni de ces documents, un retour dans la cavité a été effectué afin de les habiller avec des informations de terrain marquant la présence d'anciens niveaux de remplissage, lesquelles ont été recherchées et pointées sur ces coupes dans une géomé-



trie correspondant ainsi d'emblée à celle du modèle 3D.

Cette étape a consisté à identifier à la fois (a) les processus de modification subis par la grotte et (b) les indices susceptibles de marquer des niveaux de sol contemporains des phases de fréquentation et d'ornementation au Paléolithique supérieur (photos 2 et 3). Du point de vue des processus, deux types de perturbations subies par la cavité ont été distingués, à savoir :

- (i) Les perturbations majeures que constitue l'exploitation humaine de la grotte aux périodes historiques ;
- (ii) Les perturbations mineures que constituent les remobilisations naturelles locales (petits planchers stalagmitiques, ravinements...).

Quant aux différents types d'indices de terrain retenus pour permettre de circonscrire quelque peu la géométrie des surfaces antérieurement à la phase d'exploitation historique,

Figure 1: Plan morphologique de la grotte aux Points avec cartographie des zones décaissées et des zones remblayées. Les surfaces identifiées (zones remblayées R, zones non excavées ou niveau pré-exploitation NPE, zones excavées ZE) ont un code couleur identique à celui employé sur les coupes longitudinales et transversales (cf. figures 2 et 3).

Morphological map of Points cave with mapping of the excavated areas and the backfilled areas. The identified surfaces (filled zones R, non-excavated areas NPE, excavated areas ZE) have a color chart identical to that used on the longitudinal and transverse sections (see fig. 2 and 3).

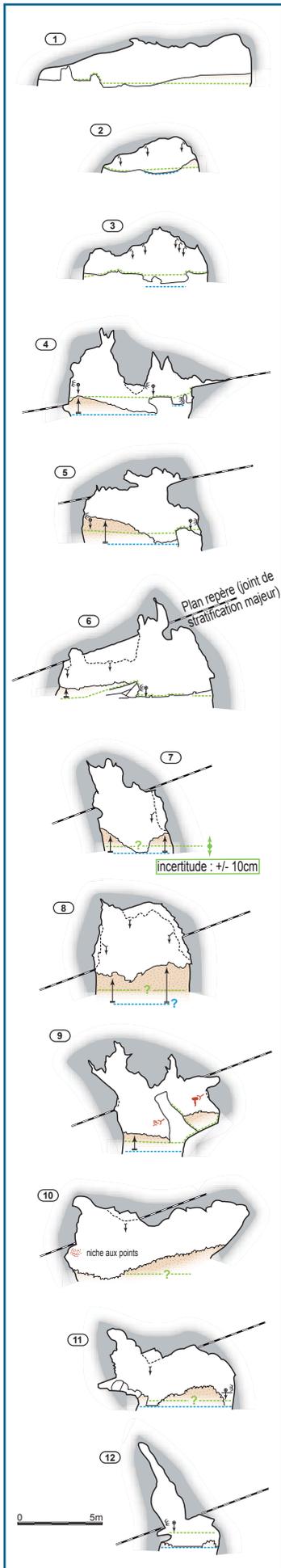


Figure 2: Coupes transversales levées le long de la grotte aux Points avec interprétation des indices géomorphologiques et ichnologiques permettant de modéliser la géométrie de la surface pré-exploitation (NPE) en vert et de la surface possible de décaissement (ZE) en bleu.

Cross-sections along Points cave with interpretation of the geomorphological and ichnological indices allowing to model the geometry of the pre-exploitation surface (NPE) in green and the possible areas of excavated (ZE) in blue.

Photo 2: Sur le côté de la galerie, lorsque l'accumulation des débris ne le cache pas, il est possible de reconnaître les restes de l'ancien remplissage argileux, par une coloration pariétale et par des reliefs discrets lorsque ce remplissage était scellé par la calcite.

On the side of the gallery, when the accumulation of the debris does not hide it, it is possible to recognize the remains of the old clay filling. We note a parietal coloration and some reliefs. This coating was sealed by calcite. The identification of these discontinuous indices is at the basis of the 3D modeling work carried out here.



il convient d'en souligner la diversité (figure 4) : planchers stalagmitiques sur sédiments meubles, nappes de gélifraacts scellées, films argileux en placage sur paroi calcaire, surfaces calcaires directement scellées par les remblais historiques, traces charbonneuses sur parois écaillées ou encore polis de parois [cf. Philippe & al., *numéro suivant*]. Ces indices, s'ils sont nombreux et variés, n'en restent pas moins parcellaires et discontinus. Bien que l'on puisse en faire une description littérale, c'est plus, sur le terrain, la combinaison de ces indices entre eux, l'identification de témoins parfois très tenus et la compréhension des processus en jeu qui permettent véritablement leur reconnaissance et leur utilisation.

La présence de polis de paroi a notamment constitué un indice-clé. En effet de tels polis, souvent situés sur des protubérances rocheuses, constituent une indication claire du passage répété des animaux (ours ou ovicaprinés dont le gabarit peut-être relativement bien estimé; cf. Philippe & al., *numéro suivant*). Par déduction, lorsqu'ils se trouvent aujourd'hui « suspendus » très en hauteur au-dessus du sol actuel, ceci permet de supposer l'existence d'anciens niveaux de sol stabilisés environ 60 à 80 cm en dessous. En effet, quand le poli est associé à des restes de planchers stalagmitiques ou à ceux de niveaux de fréquentation eux-mêmes scellés, la concordance des indices permet d'en déduire, au moins à l'échelle de la cavité, la hauteur au-dessus du sol à laquelle les polis ont raisonnablement pu se former à l'origine.

Il est entendu ici que ces informations ont été recueillies sur le terrain sans aucune intervention ni sur les parois, ni sur les dépôts. Il ne s'agit que d'observations correctement replacées dans le cadre de la géométrie du modèle 3D. Des sondages judicieusement placés ou une exploration contrôlée des remblais historiques pourraient sans aucun doute permettre d'affiner quelque peu ces données sans pour autant changer profondément l'esprit et les résultats de l'analyse effectuée ici dont on peut estimer que ces observations ont une validité spatiale et altitudinale de l'ordre de 10 à 20 cm. Même si ponctuellement sur le terrain, il est possible de reconnaître finement les surfaces NF ou NPE, par la présence



Photos 3: Exemples d'indices de terrain utilisés pour modéliser la surface pré-exploitation NPE. A: Plancher stalagmitique scellant les sédiments argilo-limoneux à blocs et à os. B: Poli de parois sur une proéminence. C: Restes de remplissage plus ou moins calcifiés. Clichés S. Jaillet.

Examples of field evidences used to model the NPE pre-exploitation surface. A: Stalagmitic floor sealing clay-loam sediments comprising blocks and bones. B: Smoothed wall surface on a prominence. C: Remains of filling more or less calcified.

d'un niveau de sédiments meubles scellés par un plancher stalagmitique par exemple; la plupart du temps, les altitudes ont toutes été appréciées à +/- 10 cm (position d'un poli, d'un reste de dépôt argileux sur une paroi...) et c'est donc en tenant compte de cette incertitude de 20 cm que les résultats obtenus au final se doivent d'être considérés.

D. Assemblage des observations au sein d'un modèle géométrique unifié

Par la suite, le retour sur station de travail a permis de draper (matching) dans le modèle 3D, chacune des coupes transversales et longitudinales. Il a alors été possible de digitaliser, points à points, les deux surfaces précédemment reconnues de manière parcellaire sur le terrain (NPE – Niveau pré-

exploitation et ZE – Zone exploitée). Ce travail a été affiné entre les coupes 8 et 9, par l'adjonction de deux coupes intermédiaires (8b et 8t) dont les surfaces NPE et ZE ont été calées par rapport aux relevés réalisés sur les coupes longitudinales (figure 3). Cette digitalisation de toutes les coupes a permis de générer un nuage de 303 points pour NPE et de 233 points pour ZE. Dans le même temps, le nuage de points du sol (ST – surface topographique) a été décimé pour être réduit à un nuage de 10 028 points. Les 3 nuages de points ainsi obtenus correspondent aux trois surfaces étudiées:

- ST, la surface topographique actuelle, la mieux documentée (10 028 points) par l'opération de relevé scanner dont elle a fait l'objet;

Figure 3: Coupes longitudinales de la grotte aux Points avec interprétation des indices géomorphologiques permettant de modéliser la géométrie de la surface pré-exploitation (NPE) en vert et de la surface possible de décaissement (ZE) en bleu. Les deux coupes s'articulent au niveau de l'angle à 90° que forme la galerie à mi-parcours. Longitudinal cuts of Points cave with interpretation of the geomorphological evidences allowing to model the geometry of the pre-exploitation surface (NPE) in green and the possible excavated area (ZE) in blue. The two sections are cut at the 90° angle which forms the gallery at the halfway point.

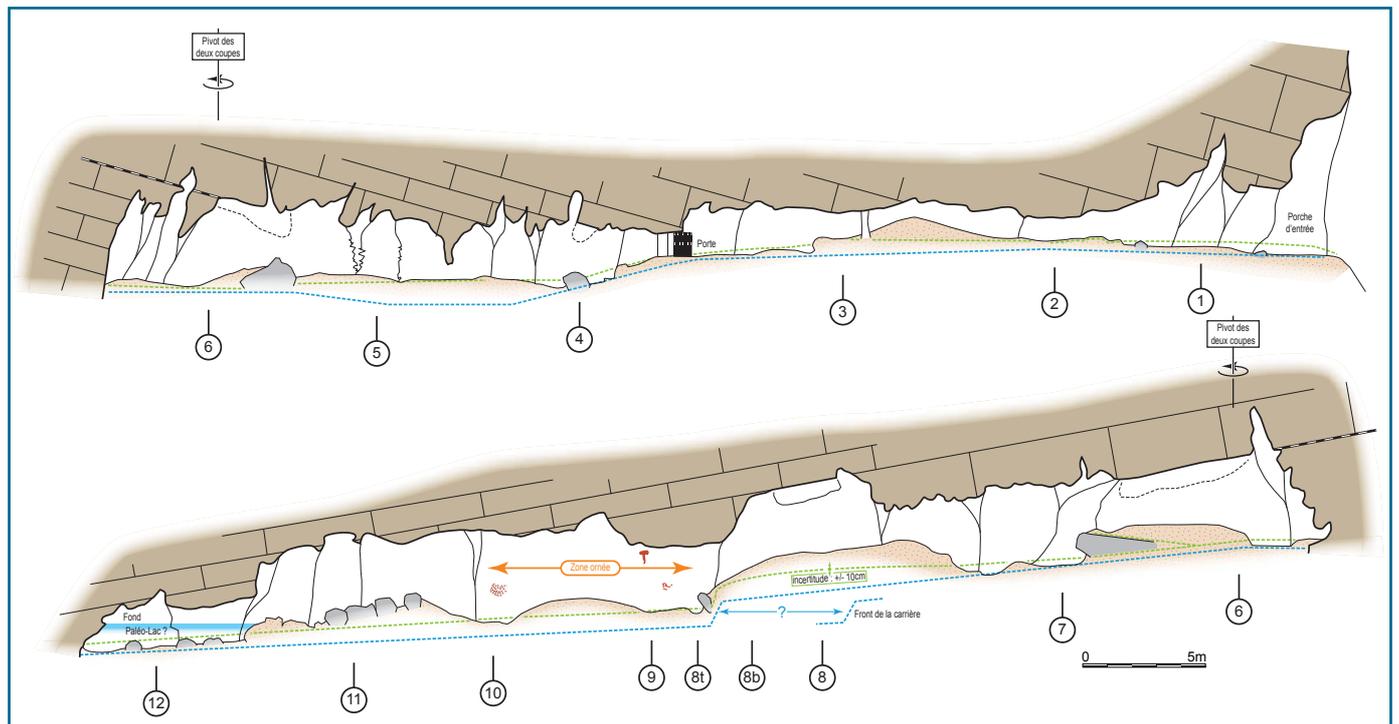
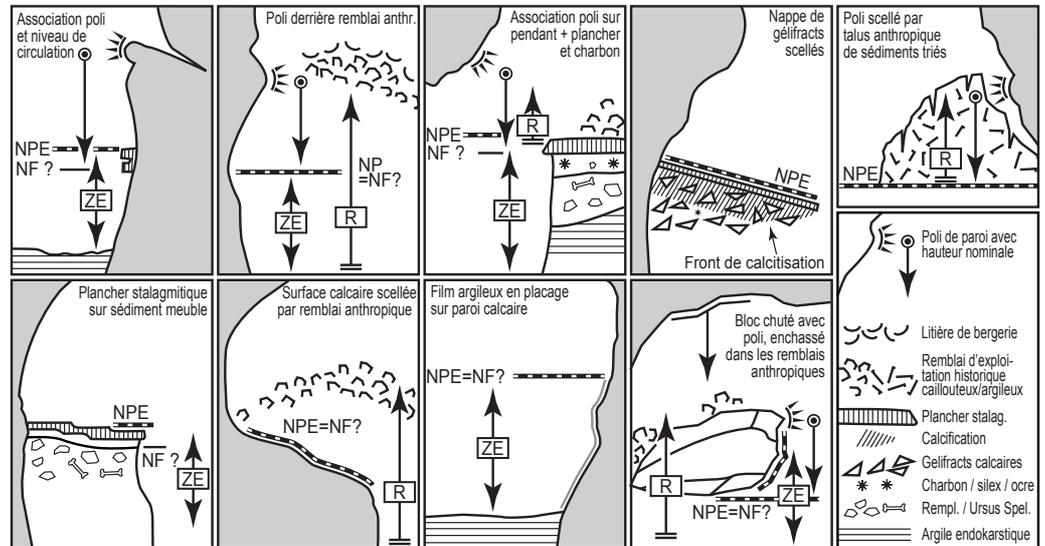


Figure 4 : Exemples de clés de lecture employées sur le terrain pour identifier les indices géomorphologiques permettant de reconstituer la géométrie de la surface pré-exploitation historique et parfois la surface de circulation préhistorique. NPE: Niveau Pré-Exploitation historique, NF: Niveau de fréquentation préhistorique, ZE: Zone exploitée historiquement, R: Zone remblayée historiquement. *Examples of field reading keys for identifying geomorphological evidences allowing to reconstruct the geometry of the pre-exploitation surface.* NPE: pre-exploitation surface, NF: Palaeolithic level, ZE: Historically exploited area, R: Historical fill area.



- NPE, la surface du niveau pré-exploitation (303 points) dont la géométrie est correcte au droit des coupes et plus incertaines entre ces coupes;
- ZE, la surface basale de la zone exploitée (233 points) dont la géométrie est correctement reconnue au droit de la plupart des coupes mais plus incertaine entre ces coupes.

La série de points extraite de cette opération de digitalisation a ensuite été exportée vers Surfer. Chacun de ces trois nuages de points s'est alors vu appliquer une interpolation (modélisation 2,5D) par la méthode du krigage¹. Les fichiers de sorties sont des grilles raster à maille carrée de 20 cm de côté. C'est la résolution des MNT (Modèles Numériques de Terrain) ainsi générés soit pour l'ensemble de la grotte 276 colonnes et 376 lignes. Cette maille de 20 cm a volontairement été choisie car elle a semblé la plus compatible avec la résolution des relevés de terrain (valide en z à +/- 10 cm). Une carte en courbes de niveau, avec une équidistance de 10 cm, a finalement été réalisée pour chacune des trois surfaces. Cette modélisation a ainsi permis de produire des fichiers de points plus denses, à même de constituer des supports adéquats pour l'édition de cartes topographiques (courbes de niveau, ombrage, etc.).

II. Résultats cartographiques et volumétriques

L'objectif est une estimation de la géométrie des surfaces NPE et ZE en croisant les informations qui ont été relevées sur le terrain avec le modèle 3D. La plus intéressante est la carte NPE (figure 5) car elle offre une image en relief de la topographie de la grotte avant les activités d'extraction et est donc très proche dans sa géométrie au moment des fréquentations humaines et animales au Paléolithique.

A. Proposition d'une topographie de la cavité au temps des fréquentations paléolithiques

Bien que la proposition de cette paléo-topographie de la cavité sous forme de carte soit sans doute perfectible dans ses détails géométriques, elle constitue déjà en l'état un support satisfaisant pour l'analyse de la grotte au temps des fréquentations préhistoriques. Les éléments géomorphologiques essentiels, apparaissant comme pertinents en ce qui concerne le moment où ces fréquentations ont eu lieu, ont été reportés ici sur la carte topographique avec une équidistance de 10 cm. Il est alors possible de proposer une description de la cavité (figure 5) qui, de l'entrée au fond, se subdivisait en plusieurs espaces successifs:

- (1) Une zone d'entrée caractérisée par des sols relativement plans constitués de limons et de clastes et dont la géométrie générale était sans doute très proche de l'actuel. Dans ce secteur soumis aux fluctuations climatiques extérieures, le recul des parois peut avoir été localement important.
- (2) Zone de talus. Au bout d'une vingtaine de mètres, les sols de la galerie constitués tout d'abord par les gelifracts calcaires provenant de la zone d'entrée amorçaient une légère pente vers l'intérieur de la cavité. Cette déclivité faible et régulière permettait de s'avancer dans un conduit où les difficultés topographiques étaient avant tout liées à la présence de quelques pendants de voûtes et de concrétions anciennes. Dans ce secteur il convenait, tout comme aujourd'hui, de se baisser un peu tandis que la limite d'éclairément était atteinte au niveau de ce petit rétrécissement.
- (3) Au bout d'une trentaine de mètres, le sol redevenait plat jusqu'à l'angle de la galerie. Un bloc d'effondrement important, peut-être déjà présent au Paléolithique supérieur

1. Cette méthode a été choisie car la modélisation générée tient compte des points les plus éloignés et lisse le modèle contrairement à la méthode de modélisation par triangulation qui est plus proche des points « terrain ». Dans le cas présent, ces points « terrain » étant discutables, il nous paraissait plus judicieux de choisir une méthode moins « dure », tenant compte non pas des voisins immédiats, mais d'un ensemble de points plus éloignés. Lors du traitement informatique des trois nuages de points, les paramètres de krigage ont délibérément été conservés à l'identique afin d'obtenir trois fichiers raster (*.grd) parfaitement superposables: variogramme par défaut = linéaire, slope = 1, aniso = 0, axe des X = 55 m, axe des Y = 75 m, pas en X = 0,2 m, pas en Y = 0,2 m.

(cf. Monney et Jaillet, *numéro suivant*) trônait au milieu de la galerie. En face, une petite galerie pouvait apporter un écoulement qui générant une cristallisation sur l'ensemble du sol localement redevenu plat. Tout comme à l'heure actuelle, il s'agissait ici du dernier endroit où le point du jour était encore visible.

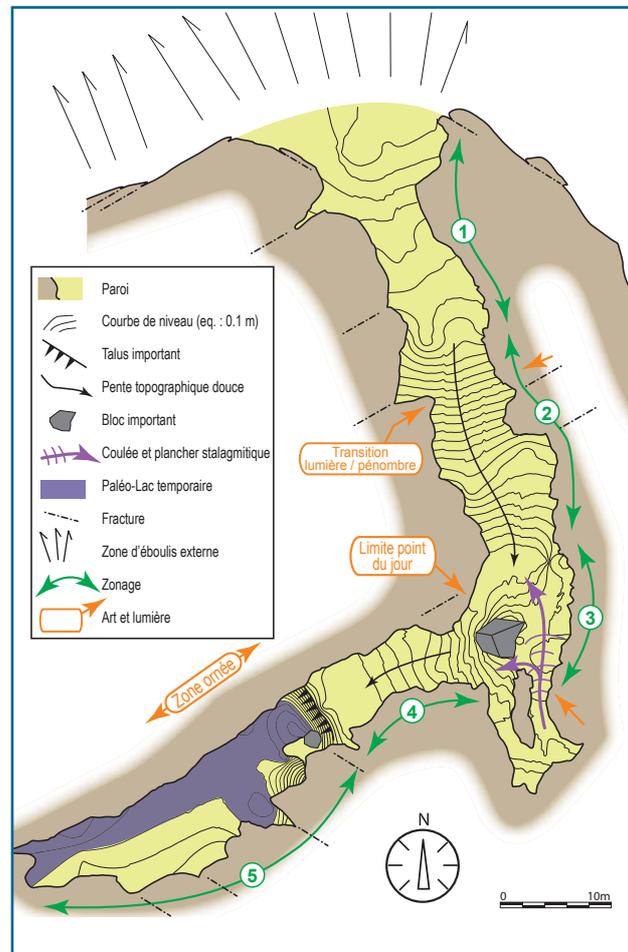
(4) Au-delà du virage, la galerie poursuivait une lente déclivité sur environ 20 m. avant d'atteindre une rupture de pente de 1 à 1,5 m. de dénivellation. Ce court ressaut descendant marquait la transition vers la dernière partie de la cavité.

(5) Tronçon terminal. Une fois le ressaut franchi, ceci permettait d'atteindre un vaste espace plus ou moins plan d'une vingtaine de mètres de longueur pour environ 5 m de large. Au cours de la Préhistoire, cet espace a épisodiquement été ennoyé ce qui a eu tendance à la fois à saper les sédiments argilo-limoneux (générant le ressaut) et à déposer une accumulation sédimentaire présentant une très légère pente depuis ce talus jusqu'au fond de la cavité. Ce très léger glacis d'accumulation s'explique aisément, en contexte temporairement ennoyé, si on admet un écoulement très faible depuis le nord-est, vers le sud-ouest de la galerie. C'est justement dans cette zone, qui devait donc présenter une ampleur plus importante que le paysage actuel et immédiatement après la rupture de pente que débute la zone ornée principale de la cavité (cf. coupe longitudinale figure 3).

De cette organisation spatiale, commandée par la géographie des sols, il semble donc possible d'identifier quelques clés de compréhension de l'organisation du dispositif pariétal. Il apparaît ainsi que pour un visiteur paléolithique circulant sur un sol sensiblement plus bas que l'actuel, la niche aux Points et la galerie des Points située en vis-à-vis, de même que les Grands Signes bilobés devaient se présenter en position légèrement surélevée et offrir ainsi une vision plus prégnante que ce n'est le cas aujourd'hui depuis les remblais historiques.

B. Analyse volumétrique de la grotte aux Points

Les perspectives offertes par le modèle 3D et les trois surfaces étudiées permettent de pousser plus loin encore l'analyse. En effet, il est possible



à partir de ces surfaces d'évaluer, avec une certaine finesse, les volumes qui les séparent. Chacune de ces évaluations volumétriques a pu être réalisée sur Surfer en appliquant la méthode trapézoïdale et en séparant les volumes positifs des volumes négatifs (figure 6). Pour chaque cas, la surface haute est la surface géométriquement la plus élevée et la plus basse est celle qui est la plus profonde. Le premier de ces calculs est l'évaluation du volume séparant la surface NPE (ici surface haute) de la surface ZE (ici surface basse). C'est l'évaluation du volume mobilisé aux temps historiques lors des activités extractrices: 400 m³. Il convient de noter que la surface ZE (base de la zone exploitée) est une surface diachrone, c'est-à-dire dont les différents espaces qui la composent n'ont pas tous le même âge puisque, au moment de sa mise en place, certains espaces de ZE étaient déjà scellés de remblais alors que d'autres n'étaient pas décaissés. Le volume évalué ici correspond au volume mobilisé par les Hommes sur la durée de leurs travaux, dans la limite des incertitudes de modélisation de ces deux surfaces.

L'évaluation du volume séparant ST (surface topographique actuelle,

haute) de ZE (surface basse) conduit à un volume de 560 m³, en apparence paradoxalement supérieur aux 400 m³ évalué précédemment (figure 6). Ceci est lié à la conjonction de trois phénomènes: (i) la non-connaissance du volume X écroulé des parois pendant et après les activités extractrices et (ii) la non-connaissance du coefficient de foisonnement des remblais. En effet ces derniers comportent un pourcentage de vide très important (sans doute supérieur à 20 %), associé à leur non-compaction et à leur désorganisation. À ces données quantifiées difficilement évaluables, il convient d'ajouter (iii) les incertitudes importantes, sans doute de l'ordre de 10 à 20 %, des volumes exploités liés à la géométrie incertaines des surfaces NPE et ZE. Seul ST – correspondant à la surface topographique actuelle, entièrement scannée – présente une géométrie qui nous soit parfaitement connue. La connaissance de la valeur Z, le rendement de l'exploitation, c'est-à-dire le pourcentage de remplissage sédimentaire effectivement exploité et le pourcentage de blocs et blocailles abandonnés, nous aiderait dans l'évaluation de ces volumes et la validation de la géométrie de ces

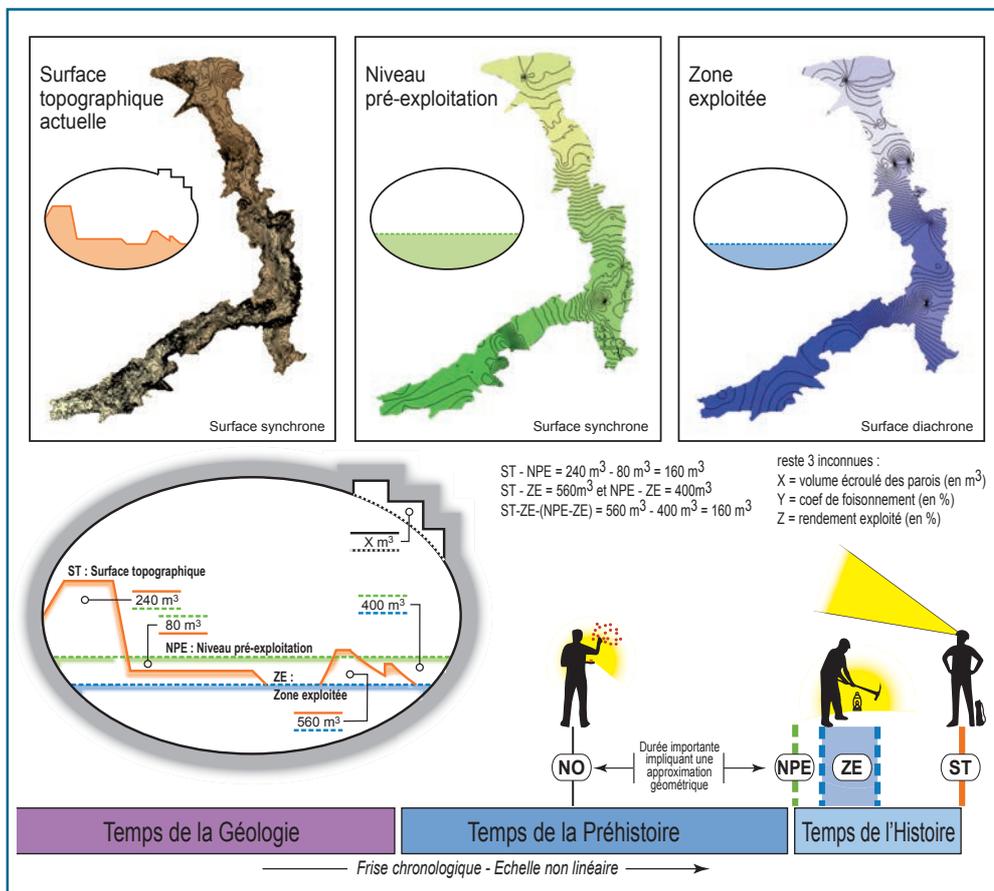


Figure 6 : Évaluation quantifiée des volumes compris entre les différentes surfaces ST, NPE et ZE. Il est ainsi possible d'évaluer les volumes mobilisés au cours des activités d'extraction historiques ainsi que les retouches et réajustements postérieurs ou synchrones à ces activités.

Quantified volume estimation between the ST, NPE and ZE surfaces. It is possible to evaluate the volumes mobilized during or after historical mining activities.

2. Ces données ont été traitées avec le logiciel ImageJ après conversion en image bitmap, la surface du profil en long de la grotte et la surface maximalisée sur une paroi des espaces écaillés. C'est-à-dire que nous avons rapporté ces surfaces à une paroi unique. Sur ImageJ, avec des images rééchantillonnées à 470 pixels en abscisse, soit un pixel tous les 20 cm, c'est un profil linéaire de 94 m qui a pu être analysé.

surfaces. En effet, une inconnue importante subsiste dans le secteur du talus (coupe 8, figure 3), c'est la position finale du front de taille ZE qu'il n'est pas possible pour l'heure de connaître exactement. Nous l'avons placé *a minima* dans la modélisation de ZE ce qui tend à minimiser les volumes calculés. Si ce front de taille était positionné plus loin, les deux volumes (NPE-ZE et ST-ZE) augmenteraient chacun d'autant et donc la proportion de l'un à l'autre, qui paraît actuellement surévaluée, diminuerait en conséquence. Ce point milite en faveur d'une position du front de taille plus au fond que ce que nous avons évalué *a minima*.

Au final, il est possible de dire qu'aux temps historiques les personnes qui exploitaient la grotte ont mobilisé un minimum de 400 m³ pour extraire un volume moindre de sédiment limono-argileux (sans doute une petite moitié de ce volume). Leurs activités extractrices ont en revanche généré la constitution de remblais importants, complétés par la chute d'éléments de parois (volume X, figure 6).

C. Localisation des zones de remplissage sédimentaire préservées

En dehors de la zone d'entrée où les fouilles archéologiques ont été implantées, peu de secteurs de la cavité sont restés intouchés par les activités historiques d'extraction de sédiment (figure 6). Tant et si bien qu'en dehors d'éventuels niveaux de remplissage qui seraient

aujourd'hui masqués sous les remblais de blocaille, les zones où des niveaux archéologiques stratifiés antérieurs à la phase d'exploitation pourraient être préservés se révèlent extrêmement limitées. Elles se trouvent principalement juste après le mur de fermeture actuel de la grotte, soit au niveau du talus de gélifraacts, ainsi que dans l'angle de la galerie. Dans ce dernier secteur, on peut se demander si les sols n'ont pas été épargnés par les activités historiques d'extraction en raison des difficultés qu'aurait présentées le travail. En effet, cette zone est marquée par la présence de gros blocs d'effondrement, ainsi que par un important concrétionnement des sols lié à des arrivées d'eau régulières depuis la galerie en U, ce qui a sans doute découragé la mise en œuvre de travaux d'extraction des sédiments à cet endroit.

D. L'écaillage des parois

Bien que ce volume X n'ait pu être évalué (il aurait fallu pour cela pouvoir reconstituer la géométrie des parois de la grotte avant ce phénomène d'écaillage), ce processus d'altération des parois a pu être cartographié. Cette cartographie a été conduite sur la base des profils en long (figure 3) dédoublés pour chacune des deux « rives » de la grotte. Une coupe de synthèse reprend les deux parois en les superposant sur un unique profil (figure 7). Il est ainsi possible d'évaluer la variation dans le profil en long du pourcentage de zones écaillées par rapport aux parois saines. On représente alors la variation des hauteurs de la galerie et le pourcentage d'écaillage par tronçon linéaire de 20 cm. Cet écaillage oscille entre 0 et 100 % et est maximal dans les secteurs des coupes 8 et 9 (figure 7). Au final, sur une surface unitaire de 242 m² (une paroi) et sur un profil linéaire de 94 m, un total de 85 m² s'est écaillé (soit 35 %)². Ce calcul est fait sur une paroi maximalisée, c'est-à-dire sur une paroi assemblant les maximums des deux rives de la grotte. L'intérêt d'un tel travail est triple :

(i) il permet de montrer l'ampleur du phénomène à l'échelle de la cavité. Ceci confirme que le volume X précédemment évoqué (figure 6) est sans doute assez important et reste encore à contraindre plus finement ce qui ne sera possible qu'après une évaluation de l'épaisseur moyenne, même approximative de cet écaillage ;

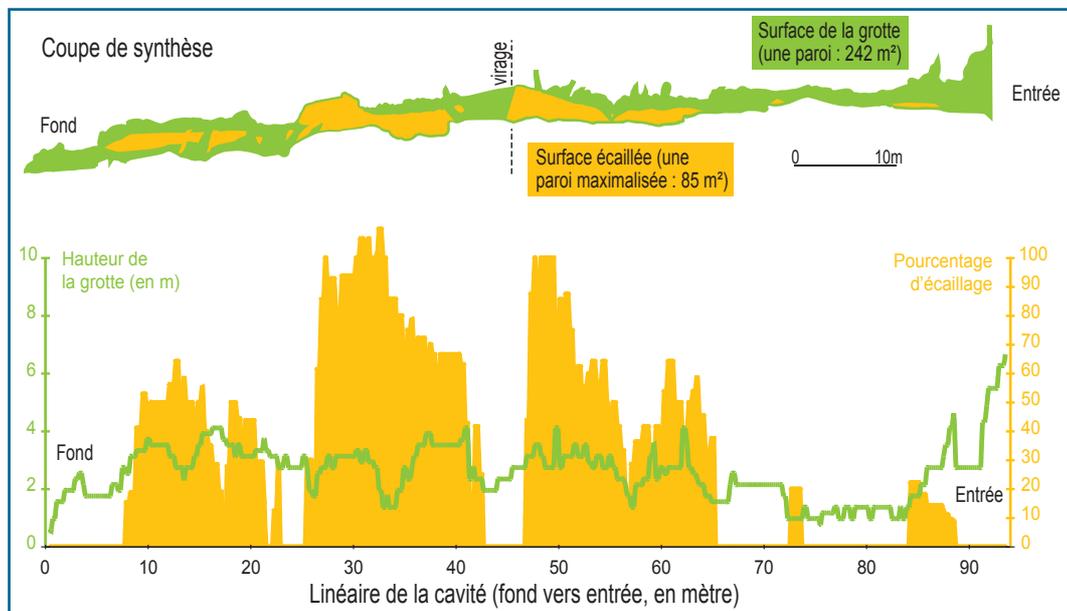


Figure 7 : Coupe de synthèse permettant d'apprécier l'ampleur du phénomène d'écaillage sur l'ensemble de la grotte. Il est possible d'évaluer la variation dans le profil en long du pourcentage de zones écaillées par rapport aux parois saines. Sur une surface unitaire de 242 m², un total de 85 m² s'est écaillé, soit 35 %.

Synthetic section allowing to appreciate the extent of the flaking phenomenon on the whole cave. It is possible to evaluate the variation in the percentage of flaking zones relative to the healthy walls. With a unit area of 242 m², a total of 85 m² shows traces of flaking (35%).

(ii) une rapide analyse de la géographie de l'écaillage permet de reconnaître l'importance du phénomène dans la zone profonde et sa concentration dans les parties basses du conduit dans la zone d'entrée. S'il est clair qu'une part de l'écaillage a eu lieu antérieurement à l'exploitation des sols (cf. Monney et Jaillet, *numéro suivant*), cette observation peut être aussi mise en lien avec les modalités de circulation aérologique dans la cavité au cours des activités extractrices. Il serait intéressant de savoir si l'on trouve ces écaillages sous la surface NPE, donc sur les parois exhumées lors de l'excavation ou derrière les tas de remblais historiques, ce qui indiquerait alors que ce phénomène a été, au moins en partie, contemporain de l'exploitation, et non postérieur. Ce travail n'a pas été conduit. Mais il est clair que cette extraction a dû s'accompagner de la mise en place d'éclairages au niveau des chantiers, sans doute préférentiellement dans le secteur des coupes 8 et 9 (figures 2 et 3). Ces éclairages auraient alors pu amorcer et faire perdurer un certain temps une circulation d'air dans les galeries. Plus précisément, il est envisageable qu'ils aient généré une entrée d'air froid dans la partie basse de la galerie et l'évacuation d'air plus chaud au long des plafonds. L'observation d'un écaillage concentré dans la partie la plus basse du conduit de la zone d'entrée, et prenant une importance croissante à mesure que l'on s'enfonce dans la cavité, pourrait militer en faveur de cette interprétation. Les très importantes zones écaillées

dans le secteur des coupes 8 et 9 sont peut-être aussi à mettre sur le compte de l'importance du chantier dans cette zone qui aurait pu provoquer un écaillage par le feu, comme les simulations réalisées en carrière à propos de feu de la grotte Chauvet l'ont clairement montré [Ferrier & al., 2014]. Une analyse de traces de rubéfaction permettrait de le confirmer. On note dans ce secteur un écaillage atteignant 100 % de la paroi. Enfin, et cela n'est qu'une hypothèse, si l'on envisage que ces activités extractrices étaient le fait de paysans souhaitant amender leur sol, on peut raisonnablement penser que c'est durant l'hiver qu'ils réalisaient ces travaux. La grotte, située à l'ubac, devait alors accueillir un air d'autant plus froid. Le caractère saisonnier, et donc cyclique, des périodes d'extraction (associé aux activités diurnes des carriers) a pu constituer un facteur intensifiant d'autant l'impact de la gélifraction sur les parois ;

(iii) il est enfin possible de mesurer combien la disparition d'un pourcentage important des parois originelles peut avoir une importance sur l'analyse du dispositif pariétal et sur sa répartition. Sans doute des œuvres manquent-elles et il n'est guère possible d'en faire aisément l'évaluation sauf à reprendre un à un chaque bloc rocheux, évaluer s'il provient de la paroi (écaillage) ou du tri consécutif aux activités extractrices et ensuite tenter dans le premier cas d'y retrouver quelques traces fugaces d'ocre ou de peinture. Ceci constituerait une tâche de grande ampleur tant

les remblais semblent avoir subi de modifications et tant la géographie de leur accumulation ne saurait être celle de leur zone d'origine.

Conclusions

Tout projet de modélisation d'un espace disparu, comme la surface NPE ou la surface ZE, implique dans les faits plusieurs approximations impondérables au rang desquelles (a) l'incertitude géométrique, (b) le problème de la granularité temporelle et (c) l'implication géométrique des hiatus temporels. Ainsi l'incertitude géométrique inhérente au projet n'est pas représentée. Il est des données qui sont plus robustes que d'autres et l'interpolation réalisée tend à produire un résultat homogène ou du moins évalué et présenté comme tel. S'ajoute à cette incertitude spatiale le problème de la représentation du temps. En effet, il n'existe pas encore de solution efficace pour représenter la temporalité d'un point de vue spatial [Cheylan, 2007 ; Kaddouri, 2008] ce que les outils de la time-geography cherchent à résoudre [Miller, 2005]. Ici les surfaces proposées s'étalent sur une temporalité discontinue. C'est-à-dire que la granularité temporelle varie avec le temps. Le temps entre les surfaces ST et ZE n'est sans doute que de quelques centaines d'années au maximum (bien que ZE soit diachrone). Le temps entre NPE et ZE est nul. Dans les faits, NPE (surface synchrone) est en fait confondu avec le début de la surface ZE (diachrone). Le temps de ZE est une durée (sans doute quelques décennies au maxi-

mum, mais rien ne permet pour l'heure de le démontrer). Enfin le temps entre NF et NPE est sans doute de plusieurs dizaines de milliers d'années. Or nous avons fait ici l'hypothèse que la surface NPE (avant les activités extractrices) pouvait être confondue avec NF, la surface qui marque le niveau de fréquentation paléolithique. Ce hiatus de plusieurs milliers d'années constitue un raccourci géométrique important qui tend à évacuer les processus post-dépositionnels ou à en minimiser l'importance au regard de la crise que constitue l'exploitation historique de la cavité.

Pour autant, sans évacuer ces incertitudes inhérentes à la méthode, la démarche développée ici (numérisation 3D, relevé d'indices jugés pertinents et interpolation géométrique) permet la proposition d'une image de la grotte telle qu'elle aurait pu être à un état antérieur de son existence. Par ailleurs, bien que cherchant uniquement à approcher la géométrie de la surface ayant pu précéder les activités extractrices historiques, cette image cartographique, qui synthétise l'ensemble des données d'observation (géométrie, indices sédimentaires et ichnologiques, etc.), constitue également, une image plausible de la grotte au temps

des fréquentations paléolithiques. Il est ainsi possible de mieux appréhender dans leurs grandes lignes, les éléments essentiels de la topographie et de la géomorphologie de la grotte durant cette phase ancienne de fréquentation de la cavité. Une organisation topographique en cinq zones semble avoir marqué la géographie interne de la grotte ce dont il s'agit de tenir compte lors de toute analyse de la structuration du dispositif pariétal tout comme des phénomènes tardifs d'écaillage des parois qui ont pu entraîner la disparition d'un nombre d'œuvres important.

Au-delà de la modélisation de la surface NPE, l'analyse géomorphologique en 3D des surfaces a permis de renseigner les modalités de l'exploitation des sols durant la période historique. En effet, bien que l'objectif initial ait été de proposer une géométrie plausible de la grotte au Paléolithique supérieur, l'analyse des remblais et des surfaces décaissées a permis de mieux contraindre la géométrie de l'extraction. La surface ZE qui constitue la base de la zone exploitée est une surface diachrone dont l'organisation géométrique renseigne sur les conditions de sa mise en place. Selon toute vraisemblance, ces activités

extractrices ont probablement débuté dans le fond de la cavité (extraction mineure) et ont continué par l'ouverture d'un front de taille (extraction majeure) au niveau du talus naturel qui préexistait à l'exploitation des sols. Depuis ce talus, constituant une zone « d'attaque » préférentielle des sédiments, le front de taille aurait pu progresser vers la zone d'entrée et atteindre plus ou moins le virage de la grotte. Cependant, une telle assertion n'est pas soutenue par des observations archéologiques, ne cadre pas avec le chemin central préservé au sein des déblais et n'est pas en accord avec ce qui est reconnu par ailleurs, comme par exemple à la grotte d'Aldène (Philippe Galant, com. perso.). Les sédiments devaient être triés sur place et les stériles (blocs et blocailles), rejetés en arrière du front de taille, vers le fond de la cavité. La modélisation de la surface ZE permet ainsi de formuler des hypothèses quant à la progression du front d'extraction, les conditions d'exploitation ainsi que les choix qui ont pu présider à cette exploitation des sols. Les volumes extraits (sans doute au final de l'ordre de 160 m³), laissent supposer une activité de moindre envergure, sans doute à destination locale (amendement des sols ?).

Bibliographie

BRUNEL É., CHAILLOUX D., CHAUVET J.-M., DUGAS A., HILLAIRE Ch., RAIMBAULT M., RENDA M. et TERRES S., 2008 - La grotte aux Points (commune d'Aiguèze, Gard). *Ardèche Archéologie*, 25, p. 23-28.

CAILHOL D., 2011 - Observations et notes concernant des aspects de géomorphologies à la grotte des Gorges à Amanges (39). *Rapport de fouille programmée* (dir. S. David) 2011, p. 29-49.

CHAUVET J.-M., BRUNEL-DESCHAMPS É. et HILLAIRE C., 1995 - *La Grotte Chauvet à Vallon Pont-d'Arc*. Paris: Seuil. 120 p.

CHEYLAN J.-P., 2007 - Les processus spatio-temporels: quelques notions et concepts préalables à leur représentation. *Mappemonde* n°87, 21 p., <http://mappemonde-archivage.mgm.fr/num15/articles/art07303.html>

DELANNOY J.-J., SADIÉ B., JAILLET S., PLOYON E. et GENESTE J.-M., 2010 - Reconstitution de l'entrée préhistorique de la grotte Chauvet-Pont d'Arc (Ardèche, France): les apports de l'analyse géomorphologique et de la modélisation 3D. *Karstologia* n° 56, p.17-34.

FERRIER C., DEBARD E., KERVAZO B., BRODARD A., GUIBERT P., BAFFIER D., FERUGLIO V., GÉLY B., GENESTE J.-M. et MAKSDUD F., 2014 - Les parois chauffées de la grotte Chauvet-Pont d'Arc (Ardèche, France): caractérisation et chronologie. *Paléo* n°25, p. 59-78.

GÉLY B., 2005 - La grotte Chauvet à Vallon-Pont-d'Arc (Ardèche): Le contexte régional paléolithique. In: Geneste J.-M. (dir) *Recherches pluridisciplinaires dans la grotte Chauvet* - Journées SPF, Lyon, 11-12 octobre 2003. Bulletin de la Société Préhistorique Française, 102(1)-Karstologia-Mémoires n° 11, p. 17-33.

GÉLY B., CHAUVET J.-M. et GALANT P., 2002 - Les grottes ornées paléolithiques des gorges de l'Ardèche. Bulletin de l'École Antique de Nîmes, 25, p. 13-28.

JAILLET S., SADIÉ B., HAJRI S., PLOYON E. et DELANNOY J.-J., 2011 - Une analyse 3D de l'endokarst: applications lasergramétriques sur l'aven d'Orgnac (Ardèche, France). *Géomorphologie: Relief. Processus. Environnement*, n° 4, p. 379-394.

JAILLET S., BILLAUD Y., BURENS A., PONS-BRANCHU E. et CAROZZA L., 2014 - Géomorphologie à la grotte des Fraux. Incision des réseaux hydrographique, karstification et obstruction des volumes souterrains. *Rapport de fouille programmée triennale: l'âge du Bronze de la grotte des Fraux. Saint-Martin-de-Fressengeas (Dordogne)*. p. 21-39.

KADDOURI L., 2008 - Réflexion sur la sémiologie graphique animée des flux. *Mappemonde* n° 89, 12 p. <http://mappemonde-archivage.mgm.fr/num17/articles/art08104.html>

MILLER H.-J., 2005 - A Measurement Theory for Time Geography. *Geographical Analysis*. Vol. 37, Issue 1, p. 17-45.

MONNEY J., DELANNOY J.-J., GENTY D., HELLSTROM J., JAILLET S., KALTNECKER E., LATEUR N., MOREAU C., PHILIPPE M., SADIÉ B., STOCCHETTI S. et VALLADAS H., 2014a - La grotte des Deux-Ouvertures à Saint-Martin-d'Ardèche: approches chronométriques croisées de la mise en place du massif stalagmitique (U/Th et ¹⁴C AMS): Implications quant aux fréquentations humaines de la cavité et à la présence ursine dans la région. In: Paillet P. (dir.) *Les arts de la Préhistoire: micro-analyses, mises en contextes et conservation*. Actes du colloque « Micro-analyses et datations de l'art préhistorique dans son contexte archéologique », MADAPCA - Paris, 16-18 novembre 2011. Paléo, numéro spécial, p. 41-50.

MONNEY J., COMBIER J., KALTNECKER E., LATEUR N., MOREAU C., STOCCHETTI S. et VALLADAS H., 2014b - Nouveaux éléments de discussion chronologique dans le paysage des grottes ornées de l'Ardèche: Oulen, Chabot et Tête-du-Lion. In: PAILLET P. (dir.) *Les arts de la Préhistoire: micro-analyses, mises en contextes et conservation*. Actes du colloque « Micro-analyses et datations de l'art préhistorique dans son contexte archéologique », MADAPCA - Paris, 16-18 novembre 2011. Paléo, numéro spécial, p. 271-284.

SADIÉ B., 2013 - *3D et géomorphologie karstique: La grotte Chauvet et les cavités des Gorges de l'Ardèche*. Thèse géographie Phys. Univ. Savoie, 484 p.