

## LA RÉALITÉ VIRTUELLE: UN OUTIL POUR LA CONNAISSANCE ET LA MÉDIATION SCIENTIFIQUE. APPLICATION À LA GROTTTE CHAUVET-PONT D'ARC (ARDÈCHE, FRANCE)

### 1. INTRODUCTION

Découverte en décembre 1994, à l'entrée amont des gorges de l'Ardèche (cirque d'Estre), la grotte Chauvet-Pont d'Arc (Fig. 1) s'est imposée comme l'un des chefs d'œuvre majeurs de l'art pariétal paléolithique. Dès la publication des premières images, la communauté archéologique comme l'opinion publique a ressenti un choc émotionnel comparable à celui provoqué par la découverte de la grotte Lascaux en 1940. Ce choc a été d'autant plus important que les premiers âges obtenus sur les dessins au fusain et les restes charbonneux au sol (30.000 et 33.000 BP) ont bouleversé les référents chronologiques jusque là établis. En dehors du fait que la grotte Chauvet soit la plus ancienne cavité ornée connue à ce jour du Paléolithique, cette découverte a permis de relever l'importance de la culture aurignacienne dans la création artistique (Clottes, 2001).

Grotte majeure de l'art pariétal mais aussi grotte paléontologique exceptionnelle, seule une approche interdisciplinaire pouvait être à même d'étudier les très nombreuses facettes de la grotte Chauvet-Pont d'Arc. C'est dans cet esprit que l'équipe scientifique a été mise en place par Jean Clottes dès 1996. L'étude interdisciplinaire de la grotte Chauvet-Pont d'Arc a permis d'aller bien au-delà de la conjonction des travaux menés par les différents spécialistes (pariétalistes, préhistoriens, paléontologues, karstologues, géologues, palynologues...). Elle a permis de porter de nouveaux regards sur la grotte, d'aller bien au-delà des recherches disciplinaires classiques, et de créer les bases de ce que pourraient être les recherches à venir dans les grottes à art pariétal.

C'est dans cet esprit d'interdisciplinarité que nous avons intégré les outils de réalité virtuelle dans nos recherches en géomorphologie karstique. En effet, nous pensons qu'en plus d'apporter des éléments de réflexion fondamentaux dans la recherche de notre discipline, les outils 3D qui s'exprime *in fine* par des documents de réalité virtuelle, sont essentiels pour transmettre le fruit de nos recherches aux autres communautés disciplinaires ou vers le grand public.

Dans cet article, après avoir mis en avant l'apport des modèles 3D dans l'étude morphogénique de la grotte Chauvet, nous présenterons des documents de réalité virtuelle à destination de la communauté archéologique, documents qui nourrissent aujourd'hui cette réflexion interdisciplinaire.

## 2. LA NÉCESSITÉ D'INTÉGRER LA TROISIÈME DIMENSION DANS LES ÉTUDES GÉOMORPHOLOGIQUES: EXEMPLE DE LA GROTTTE CHAUVET-PONT D'ARC

Les questionnements relatifs à la fermeture de la grotte et à la physionomie de la zone d'entrée ont focalisé très tôt l'attention des chercheurs de l'équipe scientifique (DELANNOY *et al.* 2004). Les travaux menés en géomorphologie avaient, ici, pour objet de mieux appréhender la physionomie de la zone d'entrée, sa visibilité ou non depuis le fond des gorges, l'accès à l'intérieur de la cavité pour les hommes et les animaux de la préhistoire, la disposition des œuvres pariétales dans la première partie de la cavité, etc. Répondre à de tels questionnements nécessite plusieurs préalables. Tout d'abord, il était nécessaire de définir la nature de l'éboulis (cryoclastique, écroulement, mixte), puis la séquence de la fermeture de l'entrée préhistorique (monophasée, polyphasée) et enfin quelle est la (les) date(s) de sa mise en place.

### 2.1 *L'étude géomorphologique de l'entrée de la grotte Chauvet-Pont d'Arc: vecteur d'informations des paléo paysages*

#### 2.1.1 La géomorphologie: une entrée pertinente pour l'étude des paysages naturels en lien avec l'archéologie

Les premières études karstogéniques et géomorphologiques de la grotte Chauvet-Pont d'Arc (DELANNOY *et al.* 2001, 2003, 2004; DEBARD *et al.* 2002) ont montré l'intérêt de l'approche géomorphologique pour comprendre la disposition des objets naturels et anthropiques dans la cavité et pour traiter les problématiques d'accès à la grotte préhistorique. Par exemple, des indices archéologiques (traces au sol et répartition des peintures dans la cavité) pouvaient suggérer l'existence de plusieurs entrées. La cartographie géomorphologique couplée à la constitution d'une chronologie relative fine des dépôts endokarstiques et à des calages isotopiques ont montré que seule une entrée au Sud de la grotte permettait aux hommes et aux animaux préhistoriques d'y pénétrer. Dès lors, un intérêt fort s'est porté sur la paléo-morphologie de cette unique entrée.

### 2.2 *Les apports et résultats de l'étude géomorphologique de l'entrée de la grotte Chauvet*

Les études géomorphologiques (DELANNOY, JAILLET, SADIÉ 2007, 2008, 2009 et 2010) de la zone d'entrée de la grotte Chauvet ont permis de reconstituer la séquence morphogénique suivante:

- 1) le recoupement de la grotte Chauvet par érosion régressive: cela signifie que la paléocavité Chauvet était visible en contrebas du chemin d'accès à la grotte, au fond de la combe d'Arc;
- 2) la paléo-cavité s'apparente alors à un couloir à l'air libre; ce couloir s'apparentait vraisemblablement à une plateforme située dans le prolongement

de l'entrée préhistorique de la grotte; il a constitué par ailleurs une aire de réception suffisamment plane pour que tout l'écroulement ne descende pas le versant en direction du talweg du paléo-méandre de l'Ardèche;

3) l'écroulement de l'écaille urgonienne (pan de corniche) située juste au dessus de la paléo-entrée; les blocs écroulés viennent se loger dans le couloir (paléo-cavité) ce qui explique le caractère très localisé des blocs et leur indigence dans le versant en contrebas. L'énergie accumulée par les blocs explique les impacts de chocs sur les pendants stalagmitiques de la zone d'entrée.

### *2.3 Apports et limites de l'approche cartographique en 2D: la nécessité d'intégrer la troisième dimension*

Bien que les études géomorphologiques (DELANNOY, JAILLET, SADIÉ 2010) permettent de contraindre spatialement l'emprise de l'éboulis au sol, il n'est pas possible à ce stade de l'étude, de restituer la morphologie de la paléo-entrée de la grotte Chauvet-Pont d'Arc. En effet, à partir d'une vision cartographique en plan et en coupe de sa surface, nous ne pouvions estimer par le biais d'une cartographie superficielle, les cotes altitudinales de la surface qui préexistait à l'écroulement. Pour cela, il faudrait répondre à plusieurs questionnements et en premier lieu celui qui concerne la pente de la surface ante-écroulement, celle là même que nous voulons reconstituer avec précision pour la raison suivante: sa géométrie a joué assurément un rôle prépondérant dans la structuration au sol de la masse rocheuse (organisation spatiale) et dans sa prédisposition à accueillir un volume important de blocs détachés de la paroi.

Pour cela, il était nécessaire d'abord d'estimer le volume de la masse rocheuse issue de la corniche (écroulement) et présente au sol (masse écroulée) et ensuite de modéliser une surface permettant d'accueillir cette masse. C'est dans cette optique que nous avons développé une méthodologie croisant le laserscanning avec les données géomorphologiques.

### 3. LES APPORTS DE L'INTÉGRATION DE MODÈLES NUMÉRIQUES DE TERRAIN 3D À L'ÉTUDE GÉOMORPHOLOGIQUE

L'estimation du volume du dépôt d'écroulement est essentielle afin d'élaborer les différents scénarios possibles de fermeture de la grotte et *in fine* reconstituer la géométrie de l'entrée de la grotte.

Pour cela nous avons, dans un premier temps, calculé le volume de roche écroulé, c'est-à-dire le volume manquant dans la niche d'écroulement sur la paroi; nous l'avons ensuite comparé au volume déposé dans l'entrée de la grotte. Un modèle numérique de terrain représentant, à la fois, la paroi et la masse rocheuse écroulée présente à l'extérieur (versant) et à l'intérieur de la grotte (zone d'entrée) a été réalisé. Les moyens de cartographie classique

en 2.5D ne permettant pas une telle représentation graphique, nous avons eu recours aux moyens de numérisation laser: le Lidar terrestre.

### 3.1 Construction d'un modèle 3D: laserscanning, approche quantitative et reconstitution virtuelle

#### 3.1.1 Acquisition des données sur le terrain

Le couplage des données géomorphologiques avec un modèle 3D suppose que celui ci soit suffisamment précis pour que l'on puisse localiser les objets cartographiés. Afin de répondre au mieux à cette exigence, la technologie du laserscanning a été utilisée pour obtenir un clone numérique de l'entrée de la grotte. A l'extérieur de la cavité (escarpement et éboulis), les levés topographiques furent réalisés avec un laser scan Optech ilris 3D d'une portée de 700 mètres environ. Sa fenêtre d'acquisition de  $40^{\circ} \times 40^{\circ}$  a nécessité la multiplication de plusieurs points de vue (88 en tout).

A la fin des opérations, après la consolidation de tous les nuages de points dans un seul et même référentiel, on obtient un nuage global d'environ 20 millions de points avec une maille comprise entre 2 et 10 cm selon les secteurs et un bruit gaussien lié à la technologie du scanner (temps de vol) d'environ 4 cm. Les relevés à l'intérieur de la cavité furent réalisés avec un laserscan courte portée (Leica HDS 6000 – cabinet Perazio géomètre) plus approprié au milieu confiné et c'est un canevas topographique qui a servi de support au recalage des différents points de vue pour un ensemble d'environ 50 millions de points. En l'absence de parties communes entre l'extérieur et l'intérieur de la grotte, le géo référencement par tachéométrie, de toutes les données acquises fut nécessaire afin de les remettre dans un même système de coordonnées.

#### 3.1.2 Des données brutes à un modèle 3D global

A l'issue de ces campagnes de scannérisation, nous avons obtenu des nuages de points indépendants les uns des autres. Leur géo-référencement dans un seul référentiel est un biais indispensable pour travailler sur l'ensemble des données.

Celui de l'escarpement et de l'éboulis a été mené *via* des sphères préalablement placées dans les zones scannées, levées au GPS différentiel puis recalées en Lambert 3 après post-traitement. Des vérifications ont été faites à partir de la polygonale géométrique de la passerelle qui donne accès à l'entrée de la grotte. Avec cette opération, nous avons pu réaliser un seul nuage de points (70 millions de points) de l'ensemble de la zone étudiée.

Enfin, le maillage du nuage de points fut réalisé dans le logiciel 3DReshaper, un amilleur 3D efficace. Il en résulte un modèle 3D TIN (Triangulated Irregular Network) sur le lequel le travail de mesures, de croisement d'informations et de réflexion a été mené. De plus, il a été possible de texturer ce

modèle pour le rendre plus réaliste dans le cadre de reconstitutions paysagères, au cœur des problématiques de recherche de l'équipe scientifique de la grotte Chauvet. La Fig. 1 illustre les différentes étapes de traitement depuis le nuage de points jusqu'au texturage du modèle triangulé.

Les résultats issus de l'étude géomorphologique de l'entrée de la grotte Chauvet peuvent dès lors, être croisés avec le clone numérique de l'objet investigué. Nous allons le voir, cette approche permet 1) d'avoir une approche géomorphologique quantitative, 2) de répondre aux questionnements sur la cinétique de l'écroulement et 3) de reconstituer virtuellement l'entrée de la grotte avant l'effondrement d'un pan de la paroi.

### 3.2 *Le calcul volumétrique de l'écroulement*

#### 3.2.1 La reconstitution de l'écaille écroulée

Afin de calculer le volume du matériel aujourd'hui au sol, nous avons numériquement, à partir du modèle 3D, refermé la niche d'écroulement sur la paroi au droit de l'apex de l'éboulis. La limite externe de la corniche calcaire anté-effondrement a été guidée par la morphologie de la corniche de part et d'autre de la cicatrice d'écroulement tel le rocher d'Abraham (Fig. 2). Cela implique forcément des choix simplificateurs mais qui restent conformes à ce que l'on peut voir en milieu naturel. La configuration de l'ancienne écaille repose également sur la lithologie et le dispositif géologique. En effet, le calcaire de forte compétence à faciès urgonien couplé à un pendage relativement marqué (30°) dans la direction opposée à l'escarpement laisse supposer qu'à cet endroit devait se situer une barre rocheuse très massive et régulière, à l'image du pilier d'Abraham jouxtant cette niche d'arrachement. C'est sur la base de cette démarche que nous avons reconstitué l'ancienne écaille (Fig. 3) et calculé son volume: 4526 m<sup>3</sup>. Ce calcul volumétrique (assorti d'une marge d'erreur) constitue la base de travail pour ajuster la surface ante-écroulement.

#### 3.2.2 Cubature du dépôt écroulé au sol

A partir de l'étude et de la cartographie géomorphologique, une identification précise des limites spatiales de la paléo entrée est désormais possible (cfr. *infra*). Le report de ces indices sur le modèle 3D permet de contraindre l'extraction de la surface supérieure de l'éboulis.

L'ajustement de sa surface inférieure est plus complexe. En effet, si les limites périphériques sont bien identifiées (vieilles concrétions et anciens planchers stalagmitiques hors cavité à 183 mètres NGF; contact éboulis et plancher stalagmitique dans la cavité à 187 mètres NGF), les points correspondant à la base de l'écroulement sont plus difficiles à appréhender puisqu'ils sont localisés sous la masse écroulée! L'indigence de blocs de grande taille issus de l'écroulement en contrebas de la paléo-cavité suggère que la quasi totalité

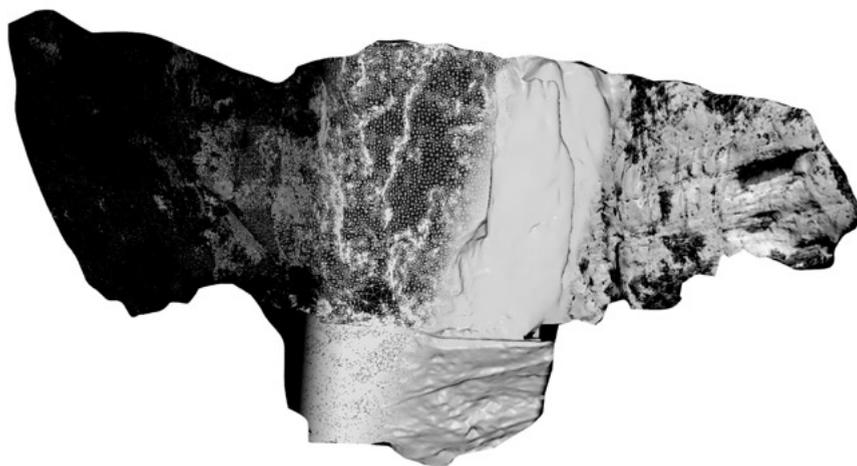


Fig. 1 – Visualisation des étapes de traitement du nuage de points, de la triangulation jusqu'au texturage à partir de photographies du modèle 3D.

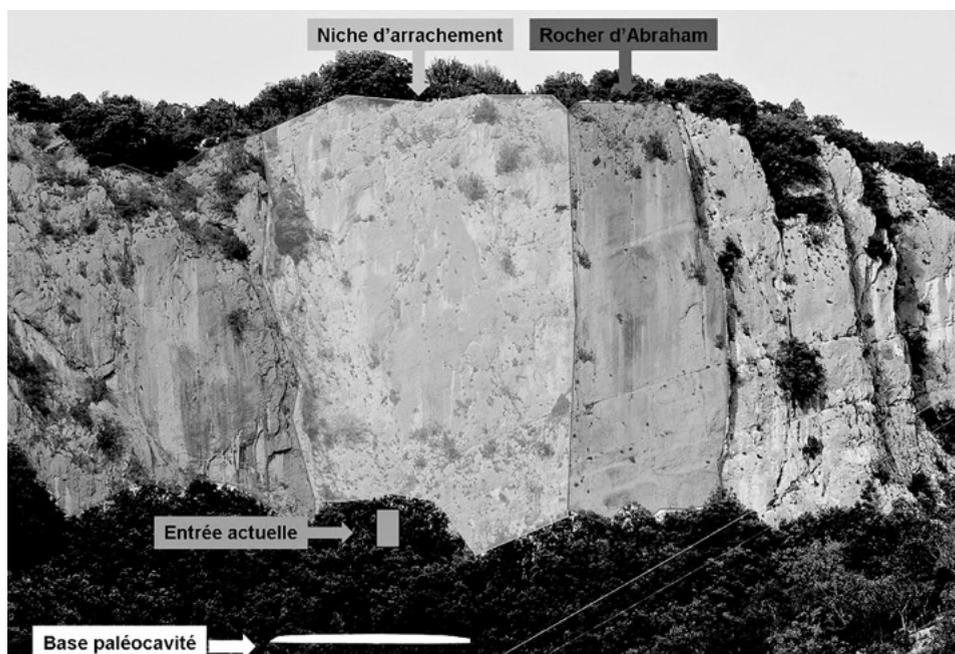


Fig. 2 – Identification de la cicatrice d'arrachement dans l'escarpement calcaire.

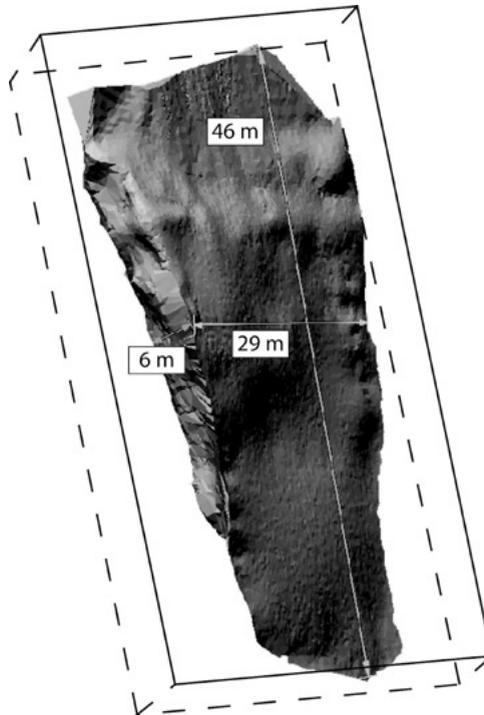


Fig. 3 – Calcul volumétrique de l'écaille écroulée.

de la masse écroulée est restée au pied de la paroi. Cette information, en la corrélant avec le volume de matériel détaché de la paroi permet d'estimer l'épaisseur de la masse rocheuse obstruant la cavité.

Afin d'appréhender la géométrie générale de l'éboulis et s'en servir comme base de reconstitution paléogéographique, nous avons attribué un cadre temporel relatif pour chacune des zones de l'éboulis. En effet, la topographie relativement simple de l'objet étudié se compose de différentes surfaces, emboîtées les unes dans les autres dont les contacts géologiques et géomorphologiques sont visibles en surface. L'identification géométrique des surfaces temporelles composant le cône d'éboulis est fondamentale pour comprendre leur dynamique de mise en place. La segmentation de l'éboulis en différentes surfaces isochrones nous a permis de faire correspondre des surfaces aux points de contacts géologiques et géomorphologiques identifiés. Cette démarche a permis de les modéliser en trois dimensions tout en respectant leur cadre géométrique (Fig. 4).

Cette étape de segmentation géomorphologique du modèle 3D a permis d'ajuster au mieux altitudinalement la surface ante-écroulement en fonction

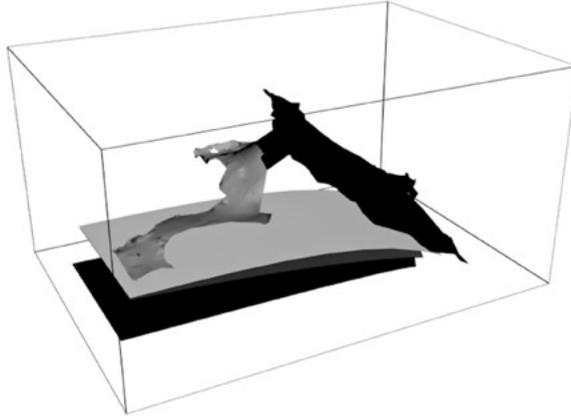


Fig. 4 – Segmentation et modélisation des surfaces isochrones identifiées à partir des contacts géologiques et géomorphologiques.

Vue en coupe de l'ajustement de la surface anté-écroulement

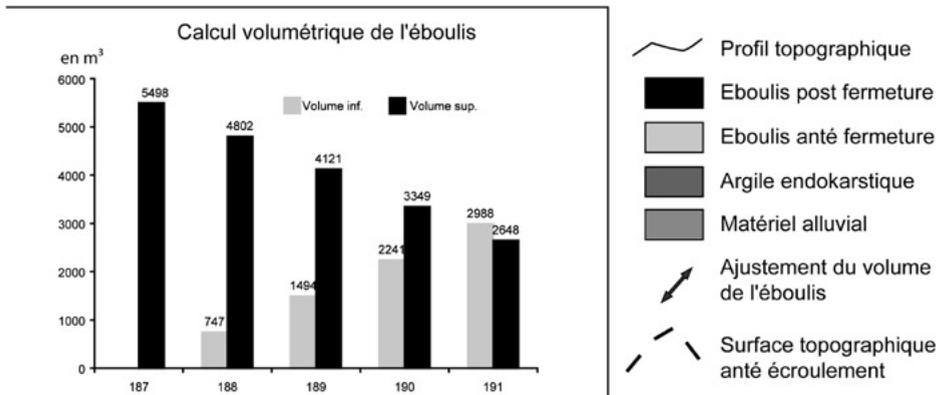
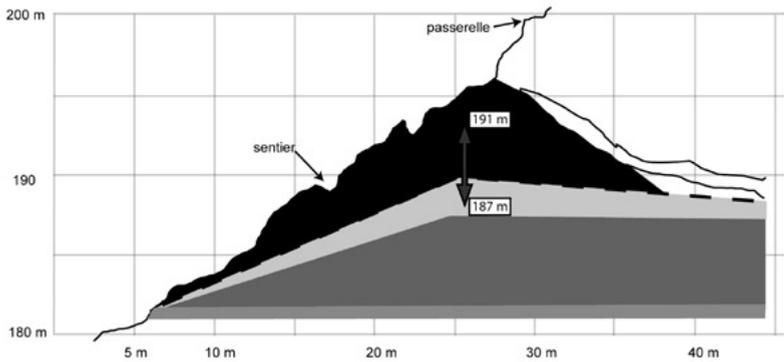


Fig. 5 – Illustration en 2D, du calcul volumétrique. Les profils topographiques sont extraits du maillage de l'éboulis interne et externe. Il est intéressant de voir qu'en tenant compte de tous les indices géomorphologiques acquis, le volume maximal ante-écroulement pouvait être d'environ 5.500 m<sup>3</sup>. Cela montre, que dans le paléo-porche était déjà accumulé du matériel provenant de la paroi. Enfin, l'ensemble des observations tend à montrer qu'il devait exister une plateforme pouvant accueillir la totalité d'un écroulement de 4500 m<sup>3</sup>.

du volume de la masse écroulée (Fig. 3). Cette étape a demandé d'ajuster la courbure et l'altitude de la surface anté-écroulement jusqu'à obtenir le volume d'environ 4.500 m<sup>3</sup> (Fig. 5). Pour cela, nous avons fait un choix *a priori* quant à la géométrie de la surface et des parois ante-écroulement.; nous avons tenu compte de l'orientation des parois actuelles visibles à l'intérieur comme à l'extérieur.

Concernant les pendants de voûte de l'entrée aujourd'hui noyés dans la masse écroulée, nous avons modélisé la géométrie de leur prolongement en fonction de la disposition des blocs les ceinturant. En effet, lorsque des blocs les entourent complètement, il est vraisemblable qu'il existait un espace suffisant pour laisser les blocs en dessous.

La géométrie du paléo porche a été modélisée selon les données suivantes:

1. La surface supérieure correspond à l'actuelle surface de la masse écroulée.
2. Les limites de l'éboulis correspondent aux prolongements des parois et des pendants actuellement visibles. L'intersection des limites et de la surface ante-écroulement est contrainte par les différents contacts géologiques.
3. La surface ante-écroulement est ajustée en altitude jusqu'à obtenir un volume de 4.500 m<sup>3</sup> environ (Fig. 7).

Les travaux de quantification volumétrique menés à partir du modèle 3D ont permis de proposer une altitude minimale à cette surface à l'aplomb de la paléo-entrée: 188,4 m. Cela veut dire que le talus qui occupait l'espace de la paléo-entrée devait se situer au moins 1,4 m au dessus du plan de référence de la salle des Bauges (à 187 m NGF). La forme de cette surface a été construite en 3D à partir de ce repère altitudinal.

### 3.2.3 Reconstitution 3D du porche d'entrée anté-écroulement

En tenant compte de ces informations, il est possible de modéliser en trois dimensions la morphologie du porche d'entrée de la grotte Chauvet-Pont d'Arc (Fig. 6).

Cette reconstitution, inédite dans le domaine de l'archéologie en préhistoire, repose sur l'utilisation de différents outils de mesures, de visualisation et de modélisation 3D. Comme les images en témoignent, ils permettent non seulement d'effectuer de nombreux calculs et "manipulations" d'objets, mais aussi de rendre compte des résultats de façon aisée. Néanmoins, la géométrie de la surface ante-écroulement reste une hypothèse de travail, très contraintes par les relevés géomorphologiques et qui restera dans l'état actuel des moyens de recherche difficile d'approcher physiquement.

Afin de renforcer un peu plus cette hypothèse, des simulations d'écroulements ont été réalisées afin de tester la validité géométrique de la surface reconstituée.

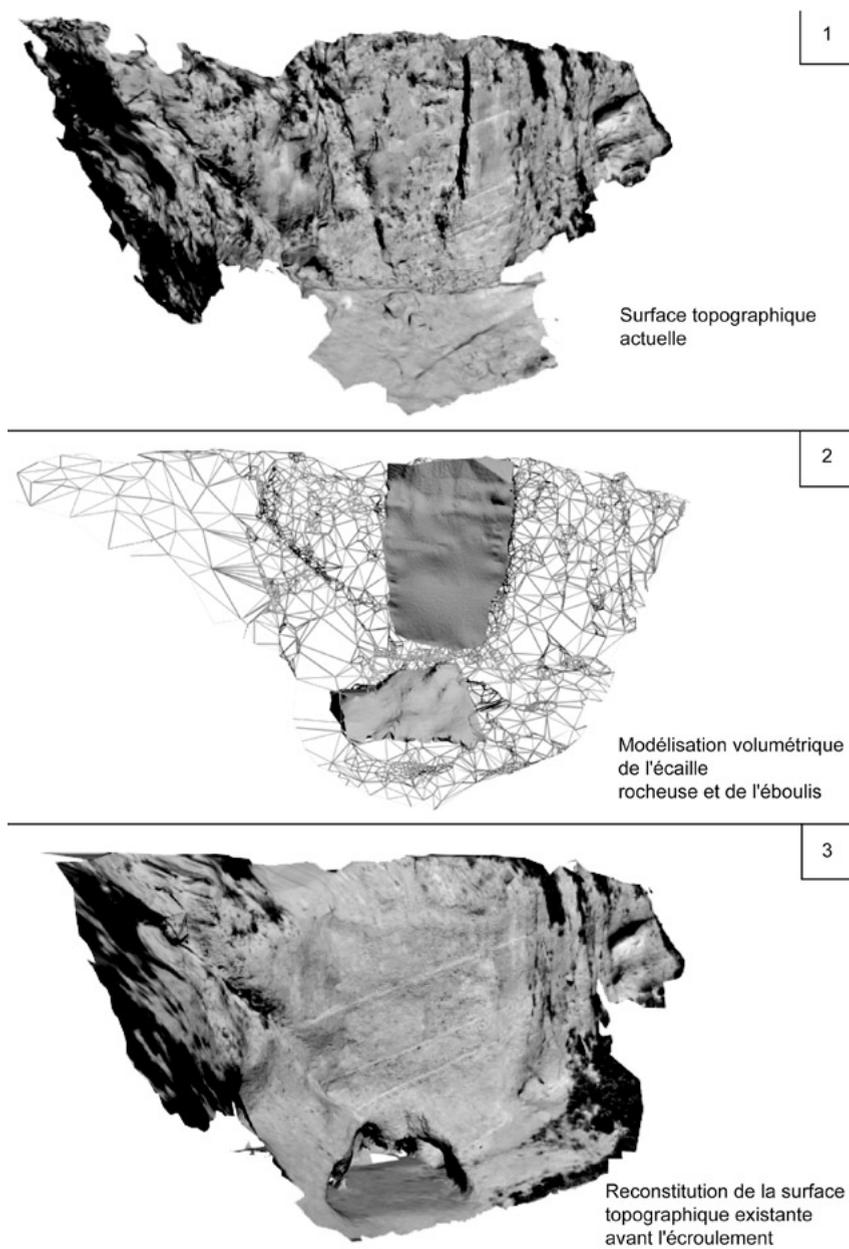


Fig. 6 – Modélisation topographique texturée du paléo porche de la grotte Chauvet avant sa fermeture par l'écroulement de l'écaille calcaire à son aplomb.

#### 4. SIMULATIONS ET RÉALITÉ VIRTUELLE: DES ÉLÉMENTS DE VALIDATION ET DE DIFFUSION DE LA RECONSTITUTION PALÉOGÉOGRAPHIQUE.

Le couplage des données géomorphologiques avec la modélisation topographique en 3D a permis de restituer une paléo-topographie probable du porche d'entrée préhistorique de la grotte Chauvet-Pont d'Arc. Ces simulations ont pour objectifs de:

1. Valider la géométrie et la position altitudinale de la surface ante-écroulement;
2. Appréhender si possible la cinématique de l'écroulement en déterminant les différentes étapes de la fermeture de la cavité.

Ainsi, en modélisant l'écroulement lui-même de l'écaille calcaire sur la paléo-topographie, il s'agit de tester le comportement trajectographique et spatial des blocs (WU 1984; GUZZETTI *et al.* 2002; STOFFEL *et al.* 2006). En fonction des résultats nous pourrions soit valider la topographie proposée précédemment, soit modifier cette proposition jusqu'à trouver un résultat qui reste cohérent avec les indices de terrain.

Les résultats présentés sont le fruit de l'utilisation conjointe de logiciels de trajectographie (Pir3D) et de réalité virtuelle (3DSmax). Afin de contraindre au mieux l'environnement du simulateur, nous avons entré les paramètres suivants:

1. La topographie initiale qui sera le modèle 3D construit à partir de l'analyse géomorphologique du site étudié. Ce modèle triangulaire, initialement composé de triangles de l'ordre de 10 cm de côté a été dégradé intelligemment (méthode de décimation en fonction de la courbure disponible dans les logiciels de rétro ingénierie tel que 3DReshaper) afin d'alléger et de rendre cohérente l'étape de calcul. En effet, les normales des triangles qui réceptionnent chaque projectile sont prises en compte dans le calcul de la trajectoire de sa course suite au rebond. Ainsi, et contrairement à ce qu'on peut croire, un modèle numérique de terrain trop détaillé n'améliore pas la justesse du calcul mais induit des erreurs dans la détermination des rebonds des blocs.
2. Les propriétés du terrain, en lien direct avec le contexte géomorphologique, permettent d'affecter des coefficients d'absorption de l'énergie cinétique des blocs s'écrasant ou roulant. En effet, un sol composé de sables absorbe plus d'énergie qu'un sol de calcaire. Ici, les relevés géomorphologiques et géologiques ont permis d'affecter sur chaque triangle du modèle ces coefficients en fonction de leur nature (calcaire, éboulis, marne). La valeur de chacun est puisée dans une «bibliothèque» à disposition dans le logiciel Pir3D.
3. Les propriétés géométriques des blocs écroulés (Fig. 7). Les blocs dont la chute est simulée ne comporte pas de formes *a priori*. C'est-à-dire que le logiciel ne prend pas en compte leur morphologie mais seulement leur point de

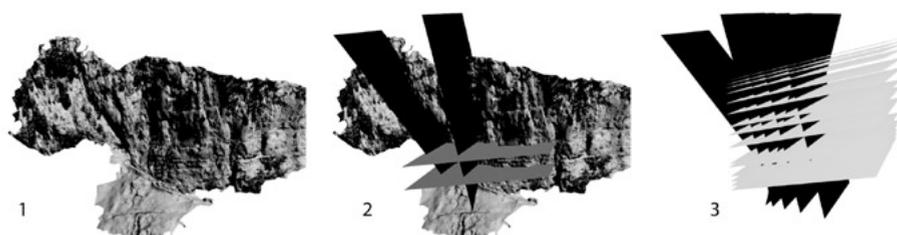


Fig. 7 – L’item 1 représente le modèle 3D texturé de topographie actuelle de l’escarpement et de l’éboulis. Sur l’item 2 fait ressortir en vert les plans de stratification et en rouge les plans majeurs de fracturation. L’item 3 représente la modélisation des zones de fragilité de la roche au niveau de l’écaïlle rocheuse qui s’est écroulée.

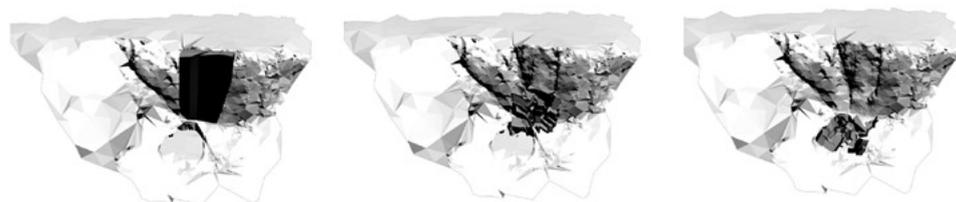


Fig. 8 – Simulation des différentes étapes de l’écroulement. Dans le modèle actuellement développé, la quasi-totalité des blocs reste en place sur la plateforme de la paléo entrée. Très peu de matériel tombe en direction de la combe d’Arc. Cela prend en compte les observations de terrain (2007 et 2008).

gravité. Ce point matériel est caractérisé par sa masse, sa position de départ, sa vitesse et son type de mouvement. Ces caractéristiques sont déduites des mesures géométriques de terrain effectuées sur les blocs rapportés a la masse volumique du calcaire dont ils sont composés (entre  $2700\text{kg/m}^3$  et  $3000\text{kg/m}^3$ ). Les collisions sont ensuite calculées en fonction de leur trajectoire respective et non de leur forme. Dès lors, connaissant la vitesse incidente, les coefficients attachés au sol permettent le calcul de la vitesse de rebond (valeur et direction); le calcul du point d’impact est alors effectué de façon itérative jusqu’à ce que la vitesse du bloc devienne inférieure au certain seuil d’arrêt.

Les résultats des ces différentes simulations (Fig. 8) montre que la modélisation du paléo-porche ante-écroulement permet d’accueillir la quasi totalité de l’écaïlle rocheuse issue de la paroi. De plus, il devait exister, devant la grotte, d’un cône d’éboulis composé d’éléments aérés et amortissant la chute de blocs rocheux permet de retenir les blocs chutant de la paroi, et cela quelque soit la zone de départ de chute. Ainsi, il est probable qu’au niveau de l’entrée de la grotte Chauvet-Pont d’Arc existait une plateforme composé d’éléments



Fig. 9 – Sur cette figure, on peut voir sur la photo du haut la vire d'accès à la grotte et l'escarpement calcaire surplombant la grotte. Sur l'image issu du modèle de réalité virtuelle, on peut retrouver la vire d'accès mais on s'aperçoit qu'à une certaine époque, la grotte devait être visible depuis le fond du méandre.

clastiques, avec une topographie légèrement bombée qui se situait à environ 1,8 mètres au dessus du niveau du sol actuel de la salle des Bauges.

Ces simulations numériques ont permis de valider les hypothèses sur la géométrie topographique de l'entrée de la grotte avant que l'écroulement n'ait lieu. Sur ces résultats, des images de réalité virtuelle de la cavité ont pu être construites dans son environnement passé avant que l'écroulement n'ait eu lieu (Fig. 9).

## 5. CONCLUSIONS

La maîtrise conjuguée de la cartographie géomorphologique et de l'imagerie 3D a permis de croiser sur de mêmes supports les informations acquises. Grâce à cette démarche originale, nous avons pu (i) contraindre tant

spatialement que formellement les informations se rapportant à l'écroulement; (ii) reporter ces informations sur l'espace concerné par la fermeture de la grotte; (iii) quantifier le volume écroulé et le volume stocké sur l'actuel cône d'éboulis (interne et externe); (iv) proposer une reconstitution 3D de l'écaille calcaire écroulée et du porche anté-écroulement de la cavité.

C'est sur la base de la cartographie géomorphologique de l'éboulis interne et externe qu'ont été construites les problématiques de recherche de cet article: la fermeture de la grotte résulte-t-elle d'un événement catastrophique ou de plusieurs phases d'écroulement? Quelle était la physionomie de la zone d'entrée (ampleur, volume) et du porche avant cet écroulement? Il n'a pas été discuté dans le présent article de l'adéquation entre ce paléo-porche et les occupations humaines. En effet, un travail de calage chronologique reste à réaliser et ces premières reconstitutions 3D en constituent déjà un premier niveau de réflexion.

La cartographie de terrain a permis de distinguer plusieurs éléments au sein de l'éboulis actuel tant à l'intérieur qu'à l'extérieur de la cavité. Puis, le croisement de ces données morphogéniques, des limites visibles du paléo-porche, de la répartition spatiale du matériel écroulé, et des données 3D acquises *via* la scannérisation de la surface topographique a permis de structurer et de quantifier l'écaille écroulée, de comparer son volume à celui de l'éboulis et ainsi d'ajuster, par différentiel, une surface correspondant à ce que devait être le porche anté-écroulement de la grotte Chauvet-Pont d'Arc.

Le support de restitution à l'aide d'images de réalité virtuelle devient pertinent pour illustrer des interprétations de terrain couplées à des mesures géométriques de terrain. Pour les recherches à venir dans la grotte Chauvet-Pont d'Arc, ce type de restitution recèle un important potentiel, encore peu exploité, qui nécessite des développements à la fois méthodologique et de connaissances croissantes les informations kartogéniques, archéologiques et paléontologiques. Dans ce cas, la réalité virtuelle permettra et facilitera, sans nul doute, la transmission des connaissances entre les diverses communautés scientifiques et au-delà en direction du grand public.

JEAN JACQUES DELANNOY, STÉPHANE JAILLET, BENJAMIN SADIÉ  
EDYTEM – UMR 5204  
Université de Savoie, CISM – Le Bourget du Lac

#### BIBLIOGRAPHIE

- CLOTTES J. (ed.) 2001, *L'art des origines*, Paris, Edition du Seuil.  
DEBARD E., 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 Arièges-Pyrénées», 57, pp. 29-52.

- DELANNOY J.J., PERRETTE Y., DEBARD E., FERRIER C., KERVAZO B., PERROUX A.S. 2005, *Genèse et évolution de la grotte Chauvet: bilan des études karstogéniques*, in *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.
- DELANNOY J.J., DEBARD E., FERRIER C., KERVAZO B., PERRETTE Y. 2001, *Contribution de la cartographie souterraine dans l'étude spéléogénique de la grotte Chauvet. Premiers éléments spéléogéniques et implications paléogéographiques, préhistoriques et paléontologiques*, «Quaternaire», 12, 235-248.
- DELANNOY J.J., JAILLET S., SADIÉ B. 2007, *Rapport des études géomorphologiques*, in J.-M. GENESTE, *Études pluridisciplinaires à la grotte Chauvet-Pont d'Arc (Ardèche)*.
- DELANNOY J.J., JAILLET S., SADIÉ B. 2008, *Rapport des études géomorphologiques*, in J.-M. GENESTE, *Études pluridisciplinaires à la grotte Chauvet-Pont d'Arc (Ardèche)*.
- DELANNOY J.J., JAILLET S., SADIÉ B. 2009, *Rapport des études géomorphologiques*, in J.-M. GENESTE, *Études pluridisciplinaires à la grotte Chauvet-Pont d'Arc (Ardèche)*.
- DELANNOY J.J., JAILLET S., SADIÉ B. 2010, *Etude géomorphologiques de l'entrée de la grotte Chauvet pont d'Arc. Reconstitutions paléogéographiques et implications archéologiques*, «Karstologia», 55, sous presse.
- DELANNOY J.J., PERRETTE Y., DEBARD E., FERRIER C., KERVAZO B., PERROUX A.S., JAILLET S., QUINIF Y. 2004, *Intérêt de l'approche morphogénique pour la compréhension globale d'une grotte à haute valeur patrimoniale: la grotte Chauvet (Ardèche)*, «Karstologia», 44, 25-42.
- DEBARD E. 1997, *Les remplissages karstiques du bas Vivarais: karstogénèse, sédimentogénèse et archéologie*, «Quaternaire», 8, 305-317.
- GUZZETTI F., CROSTA G., DETTI R., AGLIARDI F. 2002, *Stone: A computer program for the three dimensional simulation of rock-falls*, «Computer and Sciences», 28, 1079-1093.
- PFEIFFER T.J., BOWEN T.D. 1989, *Computer simulation of rockfalls*, «Bulletin of the association of engineering geologists», 26, 135-146.
- STOFFEL M., WEHRLI A., KÜHNE R., DORREN L.K.A., PERRET S., KIENHOLZ H. 2006, *Assessing the protective effect of mountains forests rockfall using a 3D simulation model*, «Forest Ecology Management», 225, 113-222.
- WU S.S. 1984, *Rockfall evaluation by computer simulation. Transportation research record*, «Transport Research Board», 1031, 1-5.

## ABSTRACT

Since laser scanning first appeared, 3D restitutions are used increasingly on decorated archaeological and rock art sites. This communication aims at presenting such restitutions (from field data collection to modeling) as applied to the Chauvet Cave. It addresses a diversified set of questions. We shall start with questions raised by karstologists, for whom 3D models represent the base of a geomorphologic pattern and are then used to model, as close to reality as possible, landscapes as they were at the time of the human occupation of the site. From then on, other fields will benefit from the model. Our challenge is to include in the final virtual reality output all the requirements of geomorphology, archaeology, and cultural mediation in order to render the extraordinary richness of the Chauvet Cave.

