

Relevés de la grotte Cosquer (partie 1) la grotte, les premiers relevés, un monument et une histoire chaotiques

■ Bertrand CHAZALY

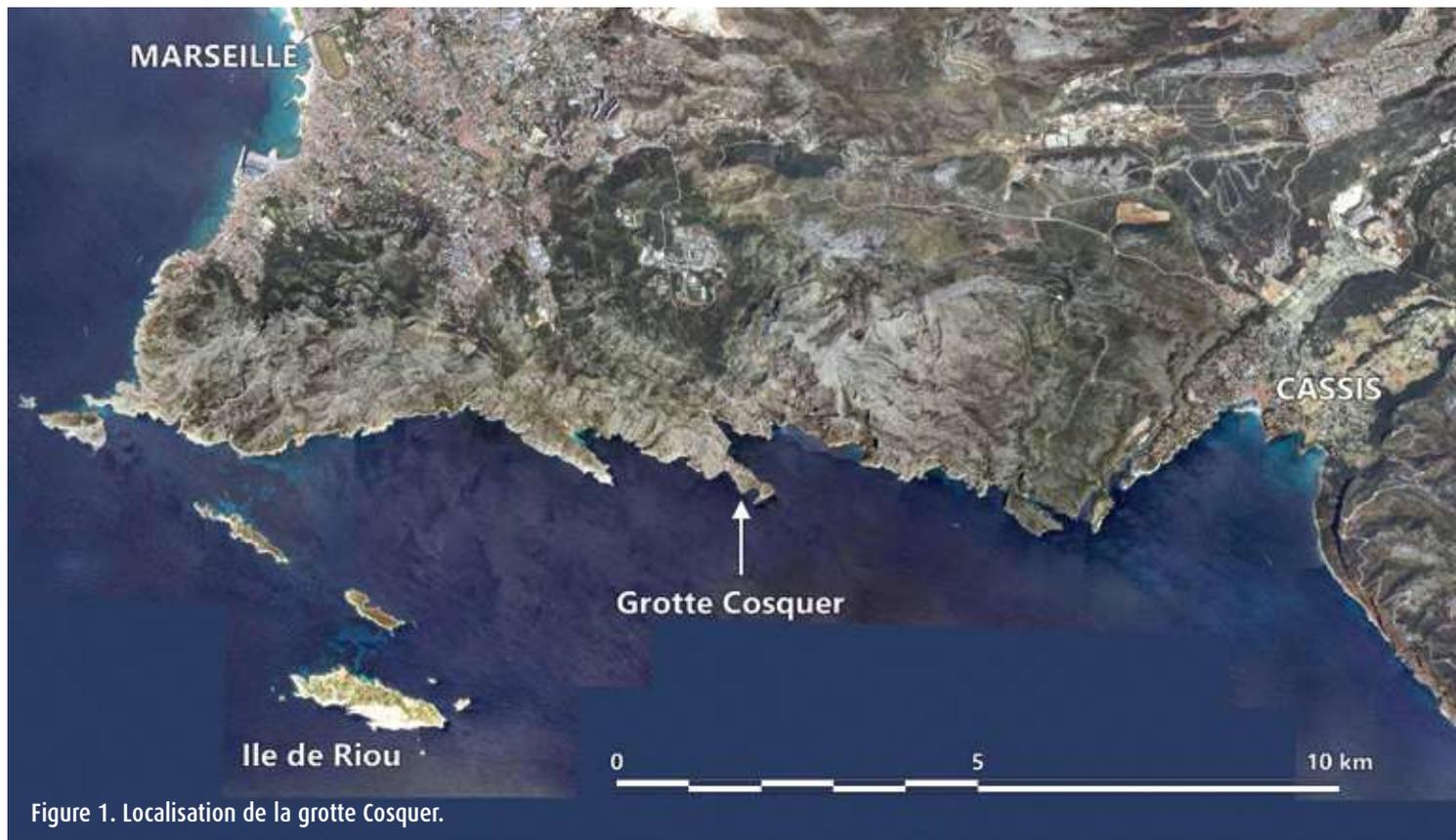


Figure 1. Localisation de la grotte Cosquer.

La grotte Cosquer est un monument complexe, qui renferme l'un des plus beaux trésors de l'art pariétal en Europe. L'évolution des méthodes de relevé a ponctué son histoire singulière, notamment les 25 ans qui ont suivi sa découverte officielle en 1991.

■ MOTS-CLÉS

archéologie, art pariétal, grotte ornée, numérisation 3D, photogrammétrie, scanner 3D, spéléologie, topographie.

Le dimanche 1^{er} septembre 1991, trois plongeurs grenoblois trouvent la mort dans une grotte sous-marine située dans les Calanques de Marseille, à proximité du cap Morgiou. Ayant soulevé un nuage de particules dense et opaque à leur passage, les plongeurs sont désorientés, se perdent et finissent par se noyer, probablement pris de panique. Les dépouilles sont remontées par les secours avec encore 40 à 50 bars de pression d'air dans les

bouteilles. Deux jours plus tard, Henri Cosquer se rend au Quartier des affaires maritimes de Marseille pour déclarer la grotte qu'il explorait depuis 1985. Cet épisode funeste ponctue l'histoire mouvementée du monument. Pendant les premières années de son étude, des moyens exceptionnels sont mis en œuvre, dont le tout premier scanner laser 3D. Mais fin 1994, Jean-Marie Chauvet découvre à Vallon-Pont-d'Arc la grotte qui porte aujourd'hui son

nom. Les efforts s'y concentrent et la grotte Cosquer est mise en sommeil. Malgré des moyens limités, un travail d'inventaire approfondi est cependant mené dans Cosquer dans les années 2000 sous la responsabilité scientifique de Luc Vanrell, accompagné d'une première cartographie précise de la cavité. Au début des années 2010, de nouveaux relevés 3D sont expérimentés. L'accélération de la montée du niveau des mers condamne certaines des œuvres présentes dans la grotte à une disparition inexorable. C'est en 2016 qu'une numérisation 3D dense et complète est commandée par le ministère de la Culture, qui décrète en 2020 son étude "opération archéologique nationale". À l'été 2021, les travaux de

▶ numérisation se poursuivent et sont étendus aux volumes situés sous l'eau.

La grotte

La grotte Cosquer est un monument historique situé sur la commune de Marseille dans le parc national des Calanques, au cap Morgiou à 12 km au sud-est du Vieux-Port. Elle s'est formée dans le massif karstique surplombant la pointe de la Voile, immédiatement à l'ouest de la calanque de la Triperie (figure 1). Sa position est pointée sur les fonds cartographiques de l'IGN et sur Openstreetmap.

■ Contexte géographique

La première particularité de la cavité est son accès. Son entrée est située aujourd'hui à 37 m sous le niveau de la mer. Il faut plonger pour rejoindre son porche, puis remonter un siphon noyé sur plus d'une centaine de mètres de long, débouchant à l'air libre dans la première des deux salles de la grotte (figure 2). L'entrée surplombe légèrement le plateau continental, une étendue de plusieurs kilomètres de large séparant les Calanques d'un talus plongeant dans les fosses abyssales du bassin algéro-provençal. Il faut noter la présence de la fosse de Cassidaigne, un canyon sous-marin pénétrant le plateau en direction du nord face à la grotte et dont la bordure supérieure est située à 115 m sous le niveau actuel de la mer. Cette fosse rejoint la plaine abyssale à plus de 1 000 m de profondeur (figure 3).

Au maximum de la dernière ère glaciaire, le niveau de la mer était 130 m plus bas, sous celui du plateau continental. Le littoral était alors situé à plus de six kilomètres au sud et l'entrée de la grotte dominait une vaste plaine que l'on imagine herbeuse et riche en faune, resserrée au droit de la grotte par le bras de mer formé par Cassidaigne. Les hommes y ont certainement observé et chassé les animaux représentés dans Cosquer, dont des animaux marins.

■ Le volume souterrain

Le porche d'entrée est étroit, mesurant 3 m de large pour un peu moins

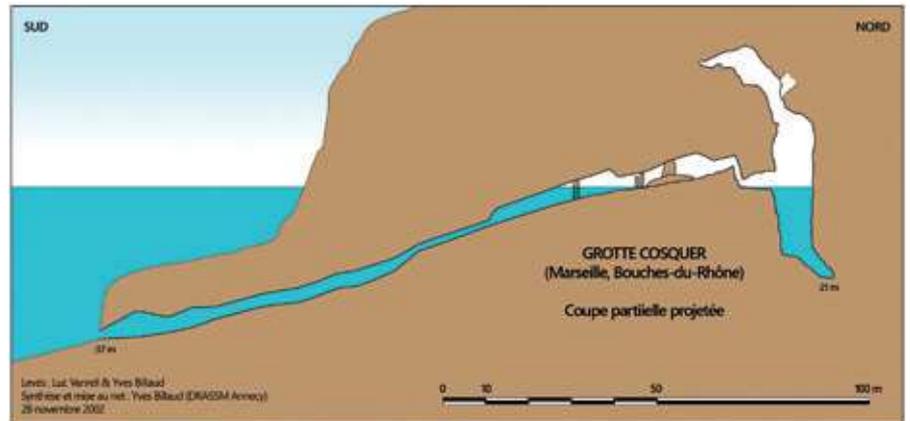


Figure 2. L'accès à la grotte.

de 2 m de haut. Il ouvre sur un vestibule constituant un abri sous roche de 4 m de large et 5 m de haut, s'enfonçant sur environ 15 m de profondeur. De cette petite salle part une longue galerie rectiligne remontant en suivant une pente de 15°. Jusqu'à 70 m de l'entrée, la section en forme de trou de serrure fait 2 m de haut pour 1,50 m de large. La hauteur se resserre ensuite à moins d'un mètre tandis que la pente augmente à environ 35° et que la largeur se développe sur plusieurs mètres pour rejoindre des volumes

très écrasés qui se connectent à la première salle. Le plafond retrouve l'air à 120 m de l'entrée dans un volume qui s'agrandit : il faut nager encore 20 m entre les massifs stalagmitiques pour rejoindre le rivage, appelé "la plage". Depuis l'entrée, on progresse lentement pendant tout le parcours à portée de main d'un fil d'Ariane, au-dessus d'un sol couvert d'une épaisse couche de dépôt sédimentaire : un coup de palme mal maîtrisé soulève aussitôt les sédiments qui réduisent la visibilité à néant pendant plusieurs heures.



Figure 3. Le relief terrestre et sous-marin dans la région de Marseille.

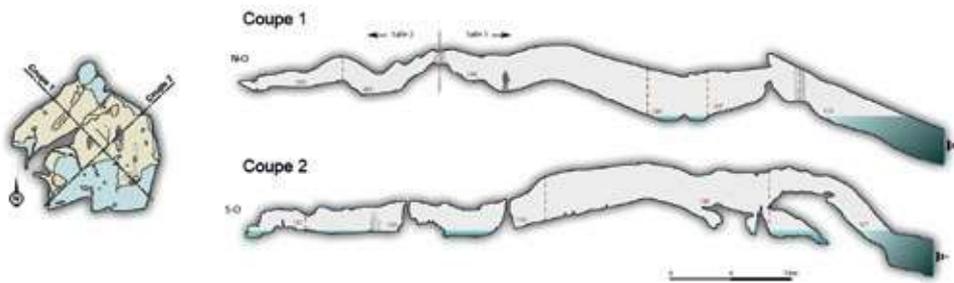


Figure 4. Plan et coupes de la grotte issus des relevés de 2004 par Yves Billaud et Luc Vanrell (source : <http://grottecosquer.fr>).

On se libère des équipements de plongée sur la plage avant d'explorer la grotte, qui s'étend sur 60 m de long et de large. Le point le plus haut des plafonds culmine à 7 m au-dessus du niveau de l'eau. Le volume se divise en deux salles.

Au sud, la première salle, la salle 1, est la plus vaste et représente les deux tiers de la volumétrie. Plus de la moitié de sa surface projetée est occupée par l'eau. Ses sols et ses plafonds présentent un pendage de 20° dans la direction du sud-est (figure 4). Au centre, la salle est assez vaste, avec une hauteur sous plafond de près de 5 m. À l'ouest, les volumes sont plus étriqués, en grande partie noyés, la hauteur baissant progressivement jusqu'à rejoindre les sols ou l'eau. À l'est, les sols sont très chaotiques, remontant au nord vers un espace lui aussi étriqué qui plonge soudain vers l'eau à proximité et parallèlement au plafond. Au nord, on accède à la deuxième salle par un passage étroit appelé le hublot. C'est le point le plus haut des sols de la grotte.

La salle 2 est moins large et moins haute. Le hublot accède à la partie la plus haute de la salle, dans un couloir perpendiculaire orienté est-ouest dans lequel on tient debout en partie centrale. En face du hublot, le plafond s'écrase rapidement vers le nord sur un sol lui aussi très chaotique, où il est possible de progresser en rampant. À l'ouest, le couloir descend vers le petit puits, une zone étroite riche de colonnes stalagmitiques et où l'eau est profonde de quelques dizaines de centimètres. À l'est, il descend en se resserrant jusqu'à l'eau, avant de s'ouvrir sur un grand puits d'une dizaine de mètres de diamètre, noyé sur plus de 20 m de profondeur, et s'élevant sur 35 m de haut.

■ Une richesse patrimoniale menacée

La grotte Cosquer est avec Lascaux et Chauvet l'une des cavités ornées majeures en France et compte parmi les quatre monuments les plus emblématiques de l'art pariétal en Europe en ajoutant la grotte d'Altamira en Espagne. Sur les 25 sites d'art pariétal les plus significatifs du continent, elle a la particularité d'être la seule située à l'est de la vallée du Rhône, la majorité des sites ornés étant concentrés sur le nord de l'Espagne et le sud-ouest de la France. L'Homme y a réalisé de nombreuses peintures et gravures dont l'agencement n'est pas aussi magistral qu'à Lascaux ou Chauvet, mais dont la densité est exceptionnelle : les 513 entités graphiques recensées comptent 194 animaux, 73 mains et 225 signes géométriques [CLOTTE et al., 2005]. En plus des peintures et gravures, l'Homme a couvert la quasi-totalité des surfaces accessibles de tracés digités, des traits réalisés à plusieurs doigts

dans la paroi molle de la cavité, témoins d'une ardente activité dans les lieux.

Parmi les représentations d'animaux répertoriées en 2014 figurent 80 chevaux, 28 bouquetins, 24 bovidés, 15 cerfs et biches, 11 phoques, 5 chamois, 3 poissons, 3 pingouins, 3 mégacéros, 2 antilopes saïga et un félin, mais aucun raton laveur. Les pingouins et les phoques dessinés et gravés dans la cavité sont à ce jour les seules représentations préhistoriques connues de ces animaux (figure 5).

Certaines œuvres sont situées à moins d'un mètre au-dessus du niveau moyen de l'eau dans la grotte. Or un phénomène associant porosité du massif karstique, hygrométrie et amplitude de la houle battant le tombant du massif induit une mise en pression du volume intérieur : l'eau est généralement plus basse dans la grotte qu'à l'extérieur, ce qui a permis de préserver les œuvres proches de l'eau jusqu'à maintenant [ARFIB et al., 2018]. Malheureusement, on constate une amplification des événements météorologiques, liée au changement climatique. Elle provoque une variation de plus en plus fréquente de la pression intérieure et les œuvres les plus basses sont régulièrement noyées (figure 6). Chaque submersion entraîne un délitement des peintures et gravures qui disparaissent petit à petit. La prise de conscience générale que la grotte est menacée à très court terme a lieu dans le courant des années 2000.



Figure 5. Les pingouins de la grotte Cosquer.



Figure 6. Le panneau des chevaux, entre mise en pression (à gauche) et dépressurisation (à droite) de la grotte.

Les premiers relevés

Les premières restitutions cartographiques de la grotte accompagnent les articles publiés dans l'année qui suit la déclaration de la découverte [BELTRAN et al., 1992]. Ce sont des représentations schématiques sans doute réalisées à partir de quelques mesures au décimètre, voire au jugé. Elles permettent de rendre compte de l'organisation générale de la grotte et de l'emplacement approximatif des principales œuvres, mais les géométries et les proportions sont très fortement déformées. Les auteurs n'ont pas de compétences particulières en topographie et à leur décharge, il faut reconnaître qu'ils n'ont pas été aidés par les fortes pentes des planchers et plafonds, rencontrant un niveau d'eau variant régulièrement de plusieurs dizaines de centimètres.

Ces représentations ont pourtant été utilisées et déclinées même après la production de rendus plus fidèles, certaines étant encore exploitées par les

équipes impliquées dans la réalisation de la réplique de la grotte (figure 7).

Les pionniers de la numérisation 3D

En novembre 1994 a lieu une grande première dans la grotte Cosquer : la numérisation 3D de certains panneaux ornés au scanner laser 3D [PARAMYTHIOTI, 1996]. La lasergrammétrie est à l'époque une technologie innovante encore au stade de la recherche et du développement, et seuls deux capteurs dans le monde sont capables de produire des nuages de points 3D denses : le scanner Cyrax développé par la société américaine fondée par Ben Kacyra (rachetée plus tard par Leica Geosystems) et le capteur Soisic S10 de la société française Mensi (qui intègrera Trimble).

C'est le Soisic qui est mis en œuvre dans la grotte Cosquer, grâce au mécénat technologique d'EDF et au support technique de ses ingénieurs et chercheurs

(figure 8). C'est un capteur volumineux pesant 13 kg, qui se présente sous la forme d'un cylindre de 20 cm de diamètre et 75 cm de long, monté sur trépied. Il numérise par triangulation [LANDES & GRUSSENMEYER, 2011] : un émetteur laser fixé à une extrémité du tube balaye l'objet à numériser, pendant qu'un capteur CCD situé à l'autre extrémité enregistre régulièrement l'image des points laser projetés. La mesure des angles horizontaux et verticaux du rayon laser et la calibration de la position relative de l'émetteur laser et du capteur CCD permettent le calcul de la coordonnée 3D des points dans le système cartésien propre au capteur. Le Soisic numérise son environnement à un rythme de 500 points par seconde, dans un champ de $46^\circ \times 320^\circ$, à une portée de 0,8 à 10 m et une précision de 0,6 mm à 5 m.

L'opération est très lourde. Elle nécessite d'alimenter et de piloter le capteur depuis l'extérieur de la cavité. Les moyens logistiques du DRASSM (Département des recherches archéologiques subaquatiques et sous-marines) sont sollicités dont l'Archéonaute, un navire d'exploration qui est mouillé devant les falaises du cap Morgiou durant toute la durée des opérations. Un local est aussi installé sur le toit du massif karstique et abrite des ordinateurs et moyens audio et vidéo en liaison directe avec des caméras et micros installés dans la grotte. Un câble ombilical de 300 m de long relie les moyens en surface aux équipes envoyées dans la grotte et alimente les capteurs en électricité. La numérisation est ainsi pilotée depuis l'extérieur, les ingénieurs d'EDF guidant à distance les plongeurs formés à la manipulation du

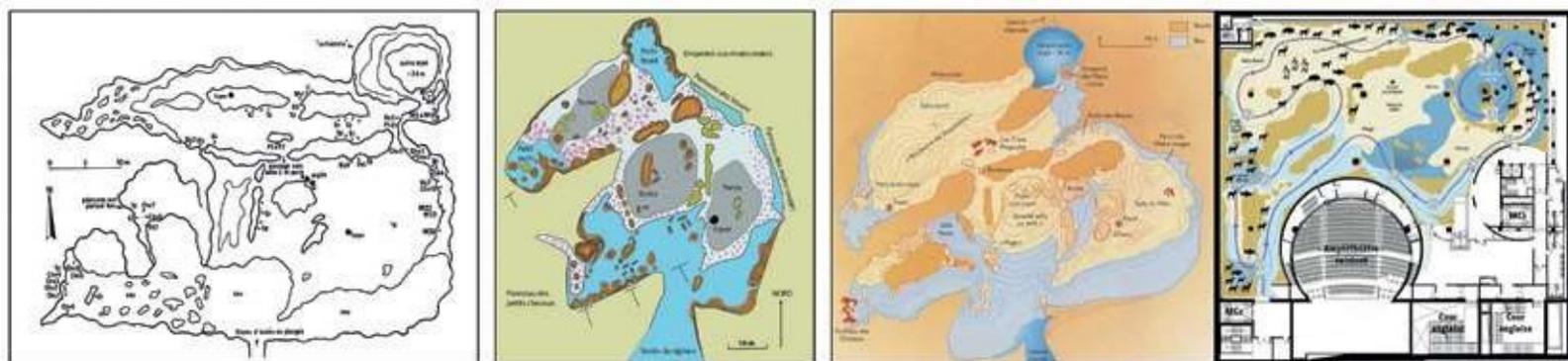


Figure 7. Restitutions schématiques de la grotte Cosquer (3 images de gauche) et projet de réplique de la grotte dans les sous-sols de la Maison de la Méditerranée à Marseille (image de droite).

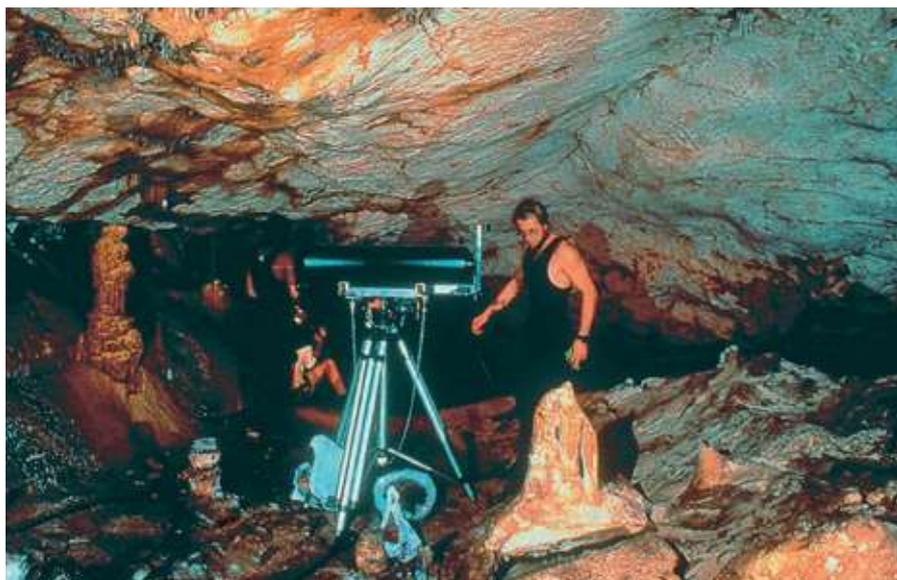


Figure 8. Le capteur Soisic, développé par la société Mensi en partenariat avec les chercheurs d'EDF.

capteur 3D. On comptabilise 67 h de numérisation 3D, permettant l'enregistrement de 4,7 millions de points 3D depuis 28 positions. Cela semble très faible quand on compare ce volume de mesures aux capacités des capteurs 3D utilisés aujourd'hui, mais en 1994, c'est un chiffre exceptionnel.

Les relevés 3D sont aussi couplés à une couverture photogrammétrique des parois, assurée par la société SETP : plus de 1 100 clichés argentiques sont réalisés par deux chambres et deux appareils photographiques calibrés [BLAUSTEIN, 1996]. Près de 500 points de calage sont relevés au tachéomètre pour assurer le calage des prises de vues et des mesures laser 3D, dont une soixantaine sont communs aux deux types de relevés. Un nuage de 3,7 millions de points supplémentaires est extrait des restitutions photogrammétriques.

Les données photogrammétriques sont couplées aux données laser, afin de produire les premiers modèles maillés texturés des parois de la grotte, à une résolution allant de 2,5 cm à quelques millimètres [THIBAUT, 2001]. Les rendus concernent la draperie des mains noires dans le grand puits et les surfaces à proximité du panneau des chevaux en salle 1. Une animation vidéo de cinq minutes est produite à partir d'images de synthèse et permet au grand public de découvrir pour la première fois les œuvres numérisées.

Cette opération inédite est cependant contrariée par les conditions météorologiques et les pannes régulières. La taille des capteurs et le temps imparti à l'opération ne permettent de relever qu'une petite partie de la grotte. Elle ouvre cependant la voie au développement des stratégies de numérisation 3D mêlant lasergrammétrie et photogrammétrie, particulièrement adaptées au relevé de l'art pariétal.

■ Les relevés spéléographiques d'Yves Billaud

Les premières campagnes d'études scientifiques dans la grotte entraînent une surfréquentation de la cavité pendant trois ans, la mobilisation de moyens lourds et encombrants et l'installation d'équipements dans la grotte parfois laissés sur place. La découverte de la grotte Chauvet en 1994 va bouleverser la programmation des interventions et la gestion des budgets alloués aux études : la cavité ardéchoise focalise les attentions et les moyens scientifiques et financiers. En 2000, le Service régional de l'archéologie de la Direction régionale des affaires culturelles PACA (ministère de la Culture) est chargé de la gestion de la grotte Cosquer. Le service confie la responsabilité scientifique des opérations à Luc Vanrell, plongeur professionnel intervenant dans la grotte et ayant une forte expérience dans les opérations liées au patrimoine sous-marin (il est l'inven-

teur de l'épave de l'avion d'Antoine de Saint-Exupéry). Il est décidé de réduire le nombre d'intervenants et de durcir les conditions d'accès. Une formation de scaphandrier professionnel classe II B est désormais exigée. Le site est mis en sécurité, nettoyé des équipements laissés par les équipes précédentes et retrouve la quiétude et l'état précédant la découverte. C'est dans ces conditions qu'Yves Billaud, ingénieur de recherche au DRASSM, archéologue et plongeur spéléologue, va patiemment relever la grotte en mettant en œuvre les techniques de relevé spéléographique, assisté par Luc Vanrell.

Au cours d'opérations programmées entre 2001 et 2005, l'emprise exacte de la cavité est relevée et cartographiée. Une lecture des différents espaces composant la grotte est proposée et la cavité est divisée en secteurs, délimités par des massifs stalagmitiques ou des changements caractéristiques de la morphologie des sols ou des plafonds. Ces éléments caractéristiques sont aussi relevés et restitués. La technique de mesure utilise des axes matérialisés au cordeau, pour lesquels distances, gisements et pentes sont mesurés au distancemètre laser, à la boussole et au clinomètre. Le bouclage des cheminements et la redondance des mesures permettent une compensation de ce premier réseau. Autour des axes, des mesures complémentaires sont rayonnées : la grotte se lit et se dessine petit à petit (figure 9).

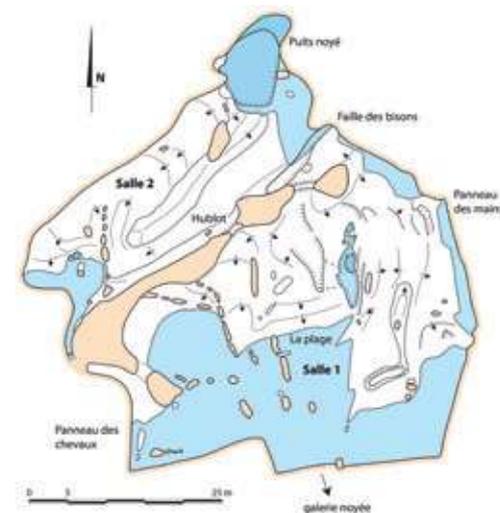


Figure 9. Le premier plan exact de la grotte Cosquer, réalisé par Yves Billaud entre 2001 et 2005.



Ce premier plan offre la première restitution fidèle de la cavité. Il sera très utile pour orienter les intervenants dans la grotte et servira notamment de fond cartographique de référence pour guider les opérations de lasergrammétrie débutées en 2010 et reprises à partir de 2016. Il faut souligner qu'après ajustement, les cartographies extraites des relevés 3D de 2016-2018 se superposent parfaitement à ce plan.

Les tests de numérisation de 2010 : première approche multiscale

Une campagne de cinq jours de mesures a été réalisée du 20 au 24 septembre 2010. L'objectif était de tester l'enregistrement 3D de la topographie de la grotte et d'un ensemble des peintures et gravures avec la plus grande finesse et la meilleure précision possible. Cette opération a été réalisée dans le cadre d'un petit marché confié à un groupement associant les sociétés Art Graphique et Patrimoine, ATM3D et Immadras.

L'acquisition a été décomposée en quatre phases :

Mise en place et relevé d'un nouveau réseau pérenne de repères topographiques salles 1 et 2

Le réseau topographique implanté est d'abord un réseau local, non raccordé à l'extérieur de la grotte. Il fige un système de coordonnées commun

aux deux salles. Son rattachement à l'extérieur (par exemple au système de coordonnées nationales RGF93 / CC44) est envisagé lors de cette campagne, mais l'équipe réalise rapidement que la complexité de l'opération nécessiterait plusieurs jours de mesures. Elle est abandonnée dès la première visite le 20 septembre, au profit des mesures 3D. Le réseau est constitué de 61 repères topographiques distribués dans les deux salles (*figure 10*) : 39 cibles carrées jaunes et noires de 10 cm, numéro gravé sur chaque cible et 22 petites cibles blanches et noires de 1 cm, numéro imprimé sur chaque cible.

Aucun repère n'a été fixé ni au sol, ni sur les parois. Chaque cible est simplement posée, à un endroit jugé stable, vierge de toute gravure ou peinture, à l'abri des passages, mais ayant une bonne visibilité. Les cibles de 10 cm sont assez grandes pour être pointées dans les images acquises par le scanner 3D. Les cibles de 1 cm ont permis de densifier et de consolider le réseau pour améliorer la précision de son calcul. La mesure a été réalisée à l'aide d'une station totale Leica TPS 802 PinPoint. Le principe retenu est le relèvement. L'appareil n'est pas mis en station sur un point déterminé, mais placé en station libre et rayonne un maximum de cibles. Cela a permis de poser l'appareil aux meilleurs points de vue, y compris aux endroits où le sol est noyé (*figure 11*). Douze stations topographiques ont été nécessaires pour relever les 61 repères. La précision de détermination des cibles

est de l'ordre de 3 mm dans chaque salle. Le raccordement entre les salles 1 et 2 a été réalisé en passant les visées par le hublot. Cette configuration est défavorable aux angles, très fermés lors du passage et ne permettant pas une bonne intersection : la précision de raccordement entre les deux salles est de l'ordre de 5 mm.

Numérisation 3D centimétrique de la salle 1

Elle a été réalisée à l'aide d'un scanner laser 3D FARO Photon 120. Vingt-huit positions ont été enregistrées dans la salle 1, permettant une acquisition de sa volumétrie générale. Pour chaque position, une numérisation panoramique de 23 millions de points a été enregistrée, à une résolution d'un point tous les 0,05° dans les deux axes, soit 1 point/cm dans un rayon de 10 m. Les positions ont d'abord été calées entre elles par calage nuage-nuage (*Iterative Closest Point*), puis les coordonnées scanner des repères topographiques ont été extraites et le bloc complet de scans a été ajusté sur le réseau topographique par mise en correspondance des coordonnées (transformation d'Helmert).

Cette première série d'acquisitions 3D n'a pas été suffisante pour constituer un enregistrement 3D complet de la salle 1. Elle a contribué à une bonne appréhension de la volumétrie générale et a montré que la constitution d'une archive centimétrique complète était possible, mais impliquait de multiplier les positions de scanner pour réduire au



Figure 10. Le réseau de repères topographiques posés dans la grotte.



Figure 11. Levé tachéométrique du réseau de cibles en salle 1.



Figure 12. Modèle maillé 3D du petit bouquetin gravé au milieu du panneau des chevaux. À gauche, le modèle produit à partir des données laser 3D, à droite celui issu du scanner inframillimétrique.

maximum les zones d'ombre et assurer une densité exhaustive.

Numérisation 3D millimétrique du panneau des chevaux et du panneau des méduses

Le niveau de détail du scanner Faro n'est pas suffisant pour assurer l'enregistrement fin des reliefs anthropiques. La mise en œuvre d'un scanner à main inframillimétrique Noomeo Optinum a été proposée. Ce capteur, dont la production a été interrompue en 2013, utilisait la corrélation d'images comme méthode de calcul de la 3D. Equipé de deux caméras CCD convergentes et de diodes lumineuses, relié à un ordinateur portable, l'appareil enregistre un couple de prises de vues stéréoscopiques quatre fois par seconde et produit en temps réel un premier nuage de points 3D par corrélation. Une deuxième corrélation est réalisée en déplaçant le capteur pendant l'enregistrement. À la fin de la séquence de mesures, un nuage complet de points 3D est généré *in situ* sur ordinateur, couvrant la surface balayée, offrant une densité et une précision relative de l'ordre de 0,3 à 0,5 mm.

La méthode a été appliquée avec succès au panneau des chevaux, permettant de produire un modèle maillé 3D gris restituant pour la première fois les microreliefs des gravures (figure 12).

Une tentative de numérisation a été faite sur le panneau des méduses, un massif stalagmitique à la volumétrie beaucoup plus complexe que celle du panneau des chevaux. La forme du bloc, l'étroitesse de l'espace disponible et la présence de l'eau tout autour du massif ont empêché une couverture complète et la production d'un modèle 3D du même niveau de qualité.

Prises de vues photographiques numériques haute résolution des panneaux

44 photos ont été prises sur le panneau des chevaux et 28 sur celui des méduses, avec un Canon EOS 5D Mark II (21 millions de pixels) équipé d'un 50 mm. L'objectif était d'apporter l'information de la couleur en complément de celle du relief, à une résolution légèrement plus fine que celle de la numérisation inframillimétrique. Les photographies ont été prises sur trépied, à 2 m de la paroi, avec un recouvrement de 30 à 50 % : la résolution est de l'ordre de 0,1 mm. Plusieurs prises ont été enregistrées par position, en faisant varier l'éclairage entre chaque photo. L'appareil et son optique ont été calibrés dans la foulée de la mission. Les paramètres internes (longueur focale, position du point focal) et les distorsions optiques ont été calculés précisément, à partir d'images d'un banc de calibration, photographié dans les conditions de prise de vue de la grotte.

Le piquetage numérique de points remarquables, identifiables à la fois dans les photos et dans le modèle inframillimétrique a permis le calcul de la position et l'orientation de chaque cliché, puis le calcul d'une texture drapée sur le modèle inframillimétrique. Mais des problèmes ont été rencontrés. Les reflets des éclairages sur les ondes à la surface de l'eau ont altéré légèrement les prises de vues, apportant des bandes plus lumineuses de quelques centimètres sur les décors du panneau des chevaux. La grande profondeur de champ engendrée par le relief a provoqué un léger flou sur certaines parties du panneau des méduses.

Ce premier test de numérisation 3D n'a pas apporté toutes les données espérées avant le démarrage de l'opération, notamment sur le panneau des méduses. Mais il a eu l'avantage de prouver la faisabilité d'une approche multiscale associant topographie, lasergrammétrie, numérisation inframillimétrique et photogrammétrie numérique [BILLAUD et al., 2014]. Il a fourni une première base topographique de référence et un jeu de données inframillimétriques sur le panneau des chevaux associant pour la première fois texture et 3D au même niveau de résolution de 0,1 à 0,3 mm. Il a surtout apporté aux agents du ministère de la Culture un retour d'expérience indispensable à la préparation des opérations à venir.



Figure 13. Prise de vue numérique haute résolution sur le panneau des chevaux.

► Les dernières interventions avant la numérisation complète de la grotte

Plusieurs interventions complémentaires vont ponctuer les années suivantes. En 2012, un géoréférencement approximatif de la grotte est réalisé en partenariat avec la société Valade Minage : des balises électromagnétiques émettrices ont été positionnées dans la grotte sur huit points topographiques (figure 14). À l'extérieur sur le toit, l'aplomb de chaque balise est détecté par un appareil récepteur et matérialisé. Le géoréférencement des huit points extérieurs a ensuite été réalisé par levé GNSS à une précision de 3 cm, permettant l'ajustement dans le système RGF93 / CC44 des huit points intérieurs à une précision de 0,8 m (précision du repérage des balises électromagnétiques).

En 2013, la numérisation au scanner laser 3D Faro photon 120 a été complétée par la société Fugro, qui enregistre 44 nouvelles positions, couvrant la salle 2 et permettant d'évaluer l'impact d'une plus forte densité de positions de scanner.

En 2015, des traces d'intrusion dans la grotte sont relevées : les blocs en béton barrant l'entrée en dehors des périodes d'intervention ont été déplacés, et une empreinte de chausson de plongeur est observée dans un foyer au sol. Dans l'urgence, le ministère de la Culture mandate Fugro pour relever la morphologie du porche d'entrée. Un scanner sonar 3D Blueview est positionné sous



Figure 15. Numérisation 3D subaquatique de l'entrée de la grotte Cosquer, à -37 m.

l'eau devant l'entrée puis dans le vestibule (figure 15). Cette première opération de relevé subaquatique permet de numériser la morphologie du porche à une résolution de 5 cm. Le traitement des mesures comprendra la production d'un nuage de points 3D et la conception d'un portail barrant l'entrée, dont le dessin de son profil et son positionnement optimal dans le nuage. C'est par ce portail que l'on pénètre aujourd'hui.

Conclusion

La grotte Cosquer a souffert et souffre encore. Les premières années de découverte et d'exploration ont été intenses, trop peut-être. Puis, la concurrence de la grotte Chauvet est venue tout stopper. Ce fut un mal pour un bien, celui de pouvoir prendre le temps d'œuvrer patiemment, dans l'ombre. L'accélération des dégradations dues à la montée des eaux et la problématique de la conservation des œuvres ont rappelé l'urgence de consacrer à nouveau quelques moyens. En 2016, le ministère de la Culture décide de faire intégralement numériser la grotte et ses parois ornées. Ce fut le moment

d'approfondir une réflexion sur la digitalisation d'une partie des activités d'étude et de restitution de l'art pariétal en milieu confiné et inaccessible. Cette réflexion, entamée en 2010, sert aujourd'hui la nouvelle équipe scientifique formée en 2020 et celle chargée de la réalisation d'une réplique destinée au grand public : c'est ce qui sera présenté dans le prochain article. ●

Contact

Bertrand CHAZALY - Fugro Geoid SAS - b.chazaly@fugro.com

Bibliographie

- ARFIB B., OLIVE M., VANRELL L. (2018) *New insights into the Cosquer art cave hydrogeological functioning (France)*. Eurokarst 2018, Besançon.
- BELTRAN A., CLOTTES J., COURTIN J., COSQUER H. (1992) *La grotte Cosquer (Cap Morgiou, Marseille)* Bulletin de la Société préhistorique française, tome 89, n° 4, pp. 98-128.
- BILLAUD Y., CHAZALY B., OLIVE M., VANRELL L. (2014). *Acquisition 3D et documentation multiscalaire de la grotte Cosquer : une réponse aux difficultés d'accès et à une submersion inéluctable ?* Revue Karstologia n° 64, pp. 7-16
- BLAUSTEIN M. (1996) *Grotte Cosquer : restitution photogrammétrique*. Revue XYZ, n° 68, pp. 17-20.
- CLOTTES J., COURTIN J., VANRELL L. (2005) *Cosquer redécouvert*. Le Seuil, Paris. 256 p.
- LANDES, T., GRUSSENMEYER, P. (2011). *Les principes fondamentaux de la lasergrammétrie terrestre : systèmes et caractéristiques*. Revue de l'Association française de topographie, n° 128, ISSN 0290-9057, 3^e trimestre 2011, pp. 37-49.
- PARAMYTHIOTI M. (1996). *Grotte Cosquer : relevé intérieur par le capteur Soisic*. Revue XYZ, n° 66, pp. 24-27.
- THIBAUT G. (2001). *Modélisation 3D de la grotte Cosquer par relevé laser*. International Newsletter on Rock Art, n° 28, pp. 25-29.



Figure 14. Balise électromagnétique utilisée pour le géoréférencement de la grotte, repérée depuis le toit du massif karstique.

ABSTRACT

The Cosquer Cave is a complex monument, which contains one of the finest treasures of cave art in Europe. The evolution of survey methods has punctuated its unique history, especially the 25 years since its official discovery in 1991.