

# Dossiers d'**ARCHÉOLOGIE**

N° 408 - Novembre / Décembre 2021

Une grotte sous-marine  
ornée à MARSEILLE

## La GROTTE COSQUER

Trente ans de recherches

DATATIONS et ART PARIÉTAL

GÉOLOGIE des Calanques

NIVEAU MARIN et CLIMAT

CONSERVATION et NUMÉRISATION

L 15957 - 408 - F: 9,90 € - RD



# La grotte Cosquer pour tous

## La dématérialisation par numérisation 3D

Comment offrir à la communauté scientifique et au grand public l'accès au plus inaccessible des grands sanctuaires ornés d'Europe ? En raison de sa difficulté d'accès, la grotte Cosquer a fait l'objet de tentatives de relevé numérique dès la déclaration de sa découverte en 1991. Aujourd'hui, pour répondre à des enjeux d'étude, de conservation et de valorisation, le ministère de la Culture a lancé un projet de numérisation exhaustive du site, qui bénéficie de technologies de pointe.

Bertrand CHAZALY

La draperie des Mains noires, secteur 205, en cours de numérisation.  
© L. Vanrell



## LES TENTATIVES PIONNIÈRES

Plusieurs opérations de relevé ont ponctué l'histoire de la grotte Cosquer depuis la déclaration de sa découverte. Des représentations planimétriques schématiques ont été produites et publiées dans les années 1990, mais leurs auteurs n'avaient pas les compétences nécessaires pour restituer convenablement les volumes : l'emprise du monument y apparaît très déformée. La première cartographie de qualité est produite dans les années 2000 par Yves Billaud, ingénieur de recherche au Drassm, qui met en œuvre avec soin les techniques de relevé et de restitution spéléographiques.

Dès les débuts de la recherche dans la grotte, une première mondiale est effectuée avec la mise en œuvre du scanner Soisic par la société Mensi et les chercheurs d'EDF. Cette opération pionnière couple relevés laser 3D et prises de vue photographiques sur clichés argentiques. Si 4,7 millions de points 3D sont enregistrés dans la grotte en 67 heures, ils ne couvrent que quelques secteurs. Les rendus 3D texturés, exceptionnels pour l'époque, concernent la draperie des Mains noires dans le Grand Puits, et les surfaces à proximité du panneau des Chevaux dans la Salle 1.

En 2010, une deuxième opération de levé 3D dense est expérimentée, associant scanner 3D millimétrique, capteur 3D inframillimétrique et photographies numériques à haute résolution. Les données laser couvrent une plus grande étendue, mais ne permettent toujours pas d'enregistrer l'intégralité des volumes de la grotte. Quant aux tracés anthropiques, seul le panneau des Chevaux est restitué

avec succès, sous la forme d'un modèle maillé 3D de quelques dixièmes de millimètres de résolution, couplé à une texture de même niveau de détail. Les enseignements tirés de cette deuxième opération auront permis de confirmer la faisabilité d'une opération de numérisation 3D et de fixer des objectifs réalistes de restitution.

## LA DEMANDE DU MINISTÈRE

En 2016, le ministère de la Culture lance un appel d'offres pour la numérisation 3D de la grotte Cosquer, qui doit « assurer une ressource aidant au suivi de la protection, à la recherche et à l'archivage du site et permettre une valorisation auprès de publics variés ».

Cet objectif vise à servir trois types d'utilisation :

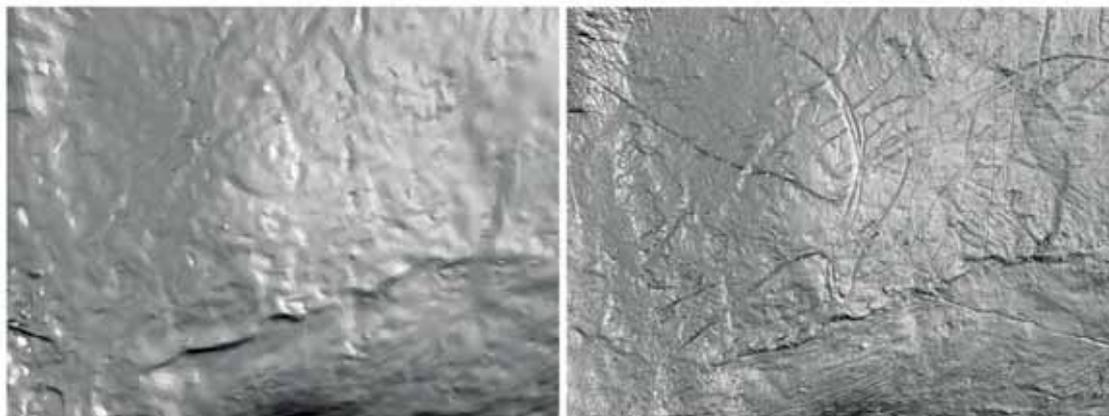
- Devenir un document de constat de l'état de la cavité (archive).
- Servir de support pour la recherche, dans différents domaines, tant archéologiques que conservatoires.

Mise en place et levé du réseau de repères topographiques en 2010.  
© L. Vanrell

Prises de vues photographiques haute résolution du panneau des Chevaux en 2010.  
© L. Vanrell



Numérisation et modélisation 3D millimétrique (à gauche) et inframillimétrique (à droite) du petit bouquetin gravé dans le panneau des Chevaux. © Fugro/MCC



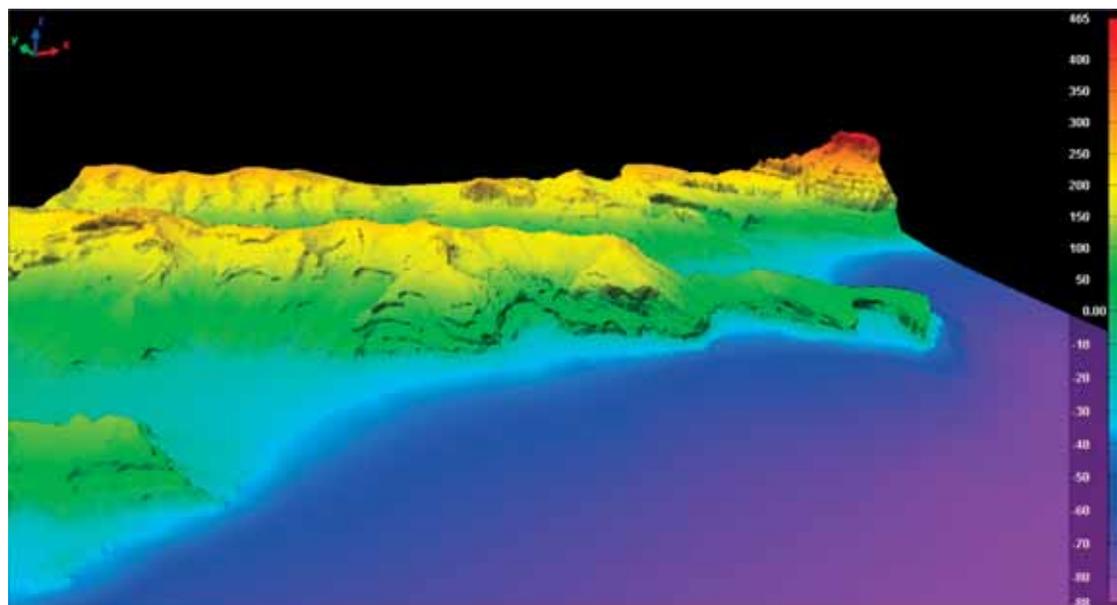
“ L’objectif du ministère suggère que l’exhaustivité des données enregistrées soit telle que leur exploitation dispense presque d’une présence physique dans la grotte. ”

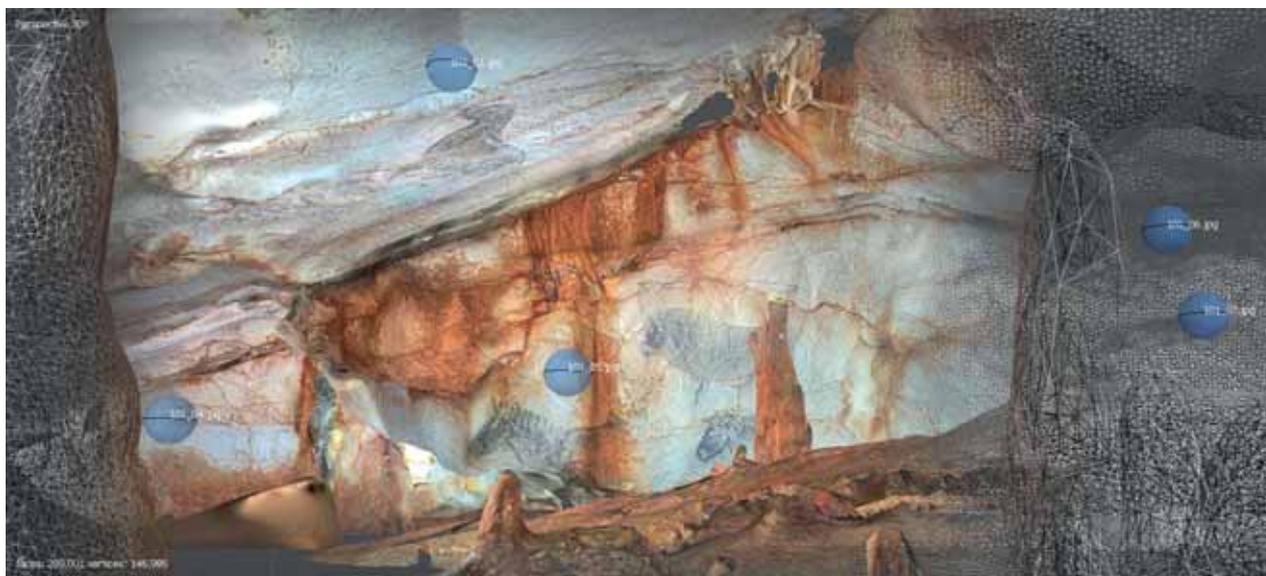
- Restituer différents aspects de la cavité, apporter une aide à la lecture et à la compréhension de figures difficiles à déchiffrer par le néophyte, proposer différentes mises en scène impossibles à rendre *in situ* et pourtant didactiques, servir de bases de données ressources afin d’aider à la construction de restitutions du site pour le public et ainsi optimiser l’accessibilité, la connaissance et la découverte de ce site sans toucher à son intégrité.

L’objectif du ministère suggère que l’exhaustivité des données enregistrées soit telle que leur exploitation dispense presque d’une présence physique dans la grotte. Les nombreux échanges avec les acteurs impliqués dans les études archéo-

logiques, scientifiques et de conservation de la grotte, et l’interrogation de leurs usages dans le monument nous ont poussés à prendre du recul pour tenter de mieux appréhender la finalité des exploitations : tous aspirent à pouvoir reproduire dans un environnement totalement numérique les gestes effectués pendant les phases d’observation sur le terrain, voire « d’augmenter » les moyens de perception. Cette approche numérique est justifiée par l’inaccessibilité des lieux. Elle ne dispense cependant pas les spécialistes d’interventions dans la grotte afin d’y mener leurs études. Mais les difficultés d’accès ne sont pas le seul frein à leur bonne réalisation. Une fois dans la grotte, les conditions de travail restent très compliquées : contact physique interdit avec les parois, obscurité absolue, humidité, sols glissants, en forte pente et parfois instables, œuvres situées au-dessus de sols noyés ou au plafond de zones très exiguës et accessibles seulement par reptation. On ne peut pas étudier l’art de Cosquer de la même manière que celui des grottes Chauvet ou de Lascaux. Les données numériques, embar-

Modélisation 3D du paysage terrestre et subaquatique autour de la grotte Cosquer. © Fugro/MCC





quées sur des outils informatiques portables, durcis et étanches, permettent donc de réduire l'exposition au risque et aux difficultés d'intervention, en alimentant les études menées en amont et en aval des opérations, et en servant de support dans la grotte.

Cette démarche de digitalisation des méthodes de restitution s'appuie sur une approche multiscalaire, suggérée par la demande du ministère (archivage centimétrique, millimétrique et inframillimétrique de la grotte et des panneaux ornés) et initiée en 2010. Elle entraîne aussi une extension de l'amplitude des échelles de restitution (archive métrique du paysage), exige d'améliorer les procédés de captation numérique et alimente le développement de méthodes d'exploitation numérique. Les exemples suivants illustrent cette démarche.

## LE PAYSAGE AUTOUR DE COSQUER

Le modèle de variation du niveau des mers depuis la dernière ère glaciaire est connu. Associer cette variation à la connaissance de la topographie des fonds marins, couplée à celle des reliefs terrestres, permet une reconstitution du paysage tel qu'il a pu être traversé par l'homme il y a trente mille ans. La démarche n'est pas nouvelle : c'est une approche qui avait fait l'objet des travaux de recherche de Jacques Collina-Girard dans les années 1990.

Les données disponibles aujourd'hui permettent de nouveaux traitements, notamment une approche en trois dimensions et un niveau de détail beaucoup plus fin au droit du monument, ce qui ouvre de nouvelles perspectives d'études concernant la morphologie du massif karstique autour du cap Morgiou. Nous avons donc opté

pour deux niveaux de modélisation :

- La juxtaposition de données bathymétriques du service hydrographique et océanographique de la Marine (SHOM) et de la base de données BD ALTI de l'IGN a abouti au calcul d'un modèle 3D du paysage de la région de Marseille, de 100 m de résolution, englobant les reliefs de l'arrière-pays, du plateau et du talus continental, dont le canyon sous-marin de Cassidaigne, et, au large, de la plaine abyssale (voir p. 23). Ce modèle permet la simulation des variations du niveau des mers et la reconstitution du paysage tel qu'il existait quand l'homme entra dans la grotte, faisant apparaître l'immense plaine qui s'étendait alors sur plus de 8 km devant celle-ci.

- Un modèle 3D d'une emprise resserrée d'environ 4 km de large autour du cap Morgiou a été produit, focalisé sur le paysage géologique immédiat de la grotte. Les données lidar du SHOM ont été associées à un relevé bathymétrique multifaisceaux des fonds marins du Drassm et à un relevé photogrammétrique des falaises réalisé par Fugro. Ces données, qui offrent une résolution de 50 cm à 1 m, couvrent les surfaces terrestres et subaquatiques. Cette résolution permet une restitution complète de la morphologie du massif karstique.

## L'ARCHIVE CENTIMÉTRIQUE À MILLIMÉTRIQUE

À l'aune de la complexité et de l'hétérogénéité des géométries à restituer, et devant la profusion des besoins d'exploitation, la lasergrammétrie s'est présentée comme la technique la plus favorable à la production rapide d'une archive 3D exploitable de résolution centimétrique. Les scanners laser 3D ont aujourd'hui des caractéristiques particulièrement intéressantes pour les opérations

**Modélisation 3D texturée du secteur 101 à partir des données lasergrammétriques.**  
© Fugro/MCC

de numérisation 3D en milieu souterrain : précision de quelques millimètres, portée de plusieurs dizaines de mètres, faible encombrement, etc.

Ils ont cependant trois points faibles :

- La densité du nuage de points 3D numérisé sur une surface fuyante diminue au fur et à mesure qu'on s'éloigne du capteur. Dans l'environnement de la grotte, c'est un gros problème, qui ne peut être compensé qu'en rapprochant les positions de numérisation.

- Ils ne numérisent que ce qu'ils voient. Il faut, là aussi, multiplier les positions pour assurer le bon recouvrement des éléments présents dans le volume à numériser.

- La mesure laser 3D peut être réalisée dans le noir complet, mais pas l'enregistrement des couleurs : il faut trouver un moyen d'éclairer l'environnement de chaque position de scanner de façon simple et autonome.

Cela nous a conduit à proposer une stratégie de numérisation laser s'appuyant sur une forte densification des positions de scanner. À chaque position a été systématiquement associée une image panoramique couleur enregistrée grâce à la mise au point et au montage sur le scanner d'un système inédit de couronnes de leds coaxiales.

Ce sont ainsi plus de 10 milliards de points 3D et autant de pixels associés qui ont été enregistrés dans une base de 380 fichiers de scanner 3D calés et texturés. Cette base constitue une première archive 3D de la grotte, de quelques millimètres de précision et de résolution. C'est à partir de cette archive que sont ensuite déclinés les pro-

duits utiles à l'étude de Cosquer. C'est aussi elle qui a nourri les équipes du groupe Kléber-Rossillon chargé de la conception d'une réplique à Marseille, dans la Villa Méditerranée.

Parmi les exploitations réalisées depuis cette base, nous pouvons citer : un nuage de points 3D colorés et géoréférencés ; une cartographie ombrée de la morphologie des sols et des plafonds ; une cartographie des hauteurs sous plafond et une localisation des zones potentiellement accessibles à l'homme ; la délimitation et la cartographie de surfaces directement touchées par les variations du niveau de l'eau dans la grotte ; le piquetage et le géoréférencement des 513 entités graphiques (en cours) ; le géoréférencement des prises de vue photogrammétriques sur les panneaux ornés ; une visite virtuelle sur le site Internet « Grands sites archéologiques » (en cours) ; une modélisation 3D maillée et une exploration par casque de réalité virtuelle ; une maquette 3D BIM (Building Information Model).

## LE RELEVÉ INFRAMILLIMÉTRIQUE DES ŒUVRES

Un spécialiste intervenant sur un panneau orné a besoin d'observer les détails, notamment la manière dont les peintures ont été composées, la forme et la profondeur des gravures, l'ordre de superposition, etc. Il se rapproche alors à quelques centimètres de la paroi et déplace une source de lumière pour faire jouer les ombres utiles à la détection des indices. La reproduction de cette attitude dans un environnement numérique

Relevé photogrammétrique du plafond en secteur 202.  
© B. Chazaly, Fugro



implique d'assurer une numérisation très détaillée de la paroi. Elle oblige à restituer les couleurs le plus fidèlement possible et, surtout, sans ombre portée. L'ombrage des reliefs, indispensable à l'étude, ne doit être généré qu'en post-production, grâce aux outils numériques.

L'ensemble des données sub-millimétriques a donc été produit à partir de prises de vue photogrammétriques. La photogrammétrie est une technique permettant de reconstituer les formes et les dimensions d'un objet à partir de photographies stéréoscopiques. En plus des critères usuels de recouvrement stéréoscopique et de résolution, les objectifs de restitution numérique ont poussé à identifier deux autres facteurs déterminants pour la qualité de la couverture photogrammétrique numérique :

- La capacité des sources lumineuses et du capteur numérique à couvrir convenablement tout le spectre colorimétrique du visible pendant l'éclairage et la photographie de la paroi : l'analyse de toutes nos sources de lumière au spectroradiomètre par

Dominique Lafon-Pham, chercheuse au Centre des matériaux des mines d'Alès, a révélé les faiblesses de tous les éclairages à leds. Seuls les flashes professionnels permettent de restituer convenablement les couleurs photographiées. Sur site, la possibilité de calibrer finement les couleurs est assurée par la prise de vue d'une mire d'étalonnage au début de chaque couverture photogrammétrique.

- La diminution, voire l'élimination, des ombres projetées sur la paroi lors des prises de vue : cela implique d'assurer une diffusion large et homogène de la lumière, centrée sur l'axe de chaque prise de vue.

Le relevé de l'art pariétal dans la grotte Cosquer exige donc une lecture attentive du relief de la paroi, afin d'adapter la stratégie de couver-

“ À ce jour, plus de 36 500 prises de vue stéréoscopiques ont été enregistrées, traitées et géoréférencées, couvrant environ 1 200 m<sup>2</sup> de parois.”

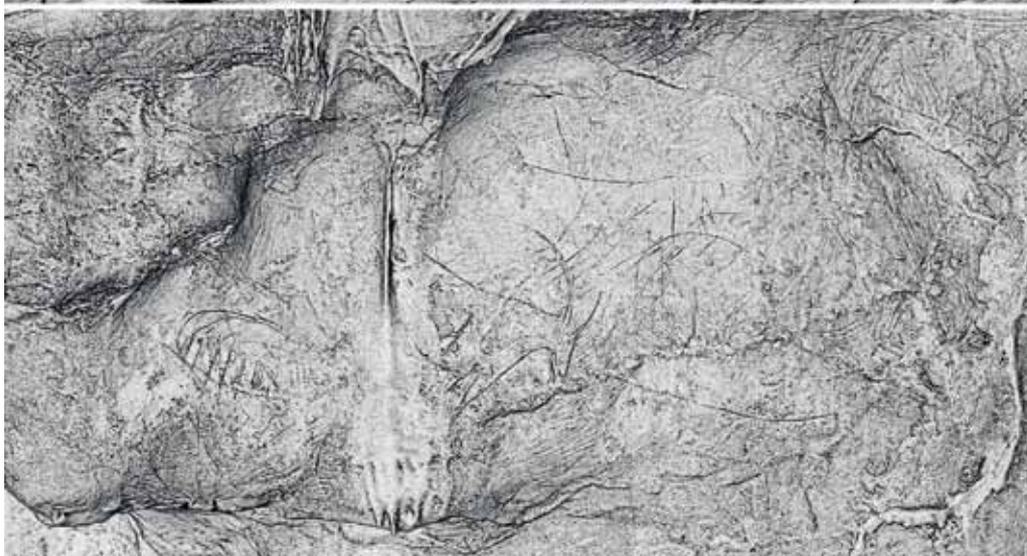
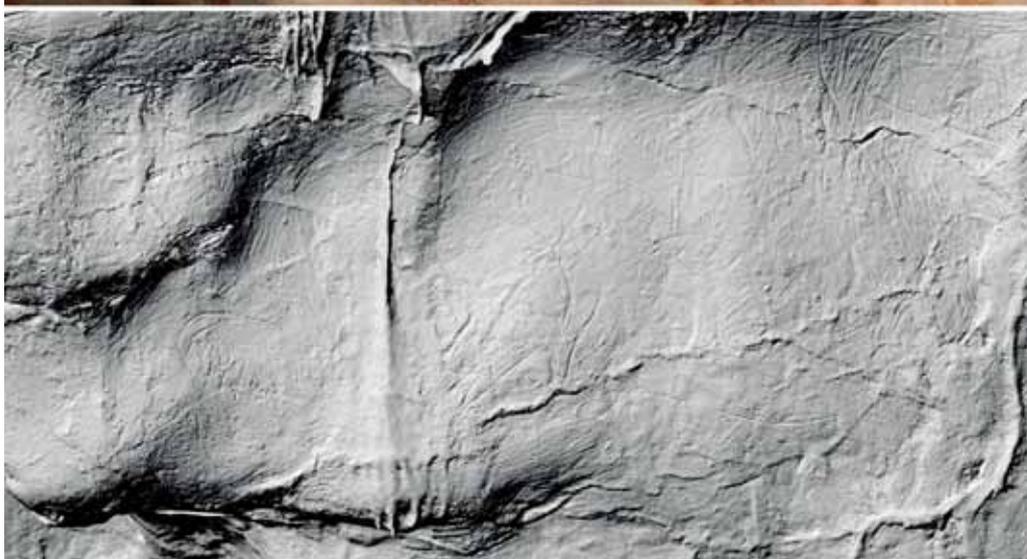
ture stéréoscopique aux spécificités de chaque panneau. Les conditions de relevé et la qualité attendue impliquent la mise au point et l'utilisation d'un système autonome, regroupant sur un même support l'appareil photo, le flash, le diffuseur large centré sur l'optique, et la batterie externe pour assurer plusieurs heures d'utilisation intensive. À ce jour, plus de 36 500 prises de vue stéréoscopiques ont été enregistrées, traitées et géoréférencées, couvrant environ 1 200 m<sup>2</sup> de parois. Pour chaque panneau relevé, un modèle maillé 3D inframillimétrique est produit, sur lequel est placée une texture restituant uniquement les nuances colorimétriques fines de la surface.

Les exploitations du modèle texturé sont :

- La production de vues orthophotographiques à haute résolution. Ces documents permettent aux pariétalistes de produire leurs restitutions et d'appuyer leurs interprétations. L'archivage des paramètres de projection orthographique est



Extraits des orthophotographies couvrant le panneau des Chevaux. Comparaison des états de 2010 et 2020. © Fugro/MCC



Restitutions du panneau des Chevaux (de haut en bas) : orthophotographie, relief ombré et micro-reliefs.  
© Fugro/MCC, 2021

essentiel pour assurer la production des mêmes vues orthophotographiques issues de nouvelles campagnes, réaliser une comparaison fine des images et apporter des informations sur l'évolution de l'état des œuvres. La comparaison des relevés du panneau des Chevaux de 2010 à ceux de 2020 en est une triste illustration.

- L'analyse des gravures et reliefs. C'est l'utilisation d'outils numériques qui permet de simuler les ombres et de révéler tous les tracés en relief : des logiciels permettent de déplacer une source de lumière en temps réel devant le modèle maillé 3D, reproduisant numériquement le geste réalisé physiquement devant le panneau, ou encore d'accentuer les microreliefs.

- La réalisation de répliques : la fourniture des modèles aux artistes Alain Dalis et Gilles Tosello leur a permis de reproduire les panneaux intégrés au projet de la Villa Méditerranée.

- La publication sur Internet : les modèles publiés sur des portails web, comme Sketchfab, permettent au grand public de découvrir les panneaux en détail, sans devoir faire appel à des solutions particulières de visualisation.

## LA CONSTANCE DU TOPOGRAPHE

« Topographie » vient du grec ancien *τοπογραφία* (description d'un lieu). Avec les relevés 3D dans et autour de la grotte Cosquer, on touche à l'essence même de la discipline. Comment décrire un volume aussi complexe ? Comment le restituer pour une exploitation à la fois par les scientifiques qui l'étudient et par les promoteurs du projet de réplique ? Comment relever et reconstituer un paysage aujourd'hui en partie englouti ? Comment passer d'une approche régionale (la grotte dans son environnement à l'échelle de la région de Marseille) à une couverture submillimétrique des œuvres ?

Il n'a pas suffi de mettre en œuvre les derniers outils de numérisation 3D. Il a fallu s'interroger sur les besoins et les conditions d'intervention, puis faire préciser les objectifs (finalités, emprises, pré-



cisions, résolutions) et tenter d’y répondre en faisant le choix des capteurs 3D les plus adaptés, en innovant pour les rendre les plus opérationnels possible, en fixant les stratégies de mesure et de traitement, et en explorant les pistes d’exploitations possibles. Les technologies de mesure et de restitution mises en œuvre pour Cosquer sont nombreuses : lidar aéroporté, bathymétrie multifaisceaux, scanner 3D, photogrammétrie, SIG, réalité virtuelle. Décrire la grotte reste un défi, d’autant que les deux tiers du volume de la cavité sont noyés (le relevé subaquatique a débuté cette année).

Le patrimoine culturel est essentiel pour l’identité des individus. Prendre le temps de recueillir et de transmettre les informations nécessaires à son étude en s’efforçant de rester objectif, c’est contribuer à une prise de conscience d’une histoire commune, ainsi qu’à un dialogue entre communautés et entre générations. Cela est valable pour la communauté scientifique. Qu’on se le dise, les outils numériques ne peuvent pas tout restituer, aussi précis soient-ils. Ils ne remplaceront jamais le regard du spécialiste, et les membres de l’équipe scientifique doivent régulièrement intervenir dans la grotte. Le topographe est là pour leur simplifier la vie, en leur fournissant des données et des outils nécessaires à l’étude des lieux, et pour participer au dialogue et leur apporter son éclairage. Et dans une grotte, la lumière, c’est assez utile.

“ Qu’on se le dise, les outils numériques ne peuvent pas tout restituer, aussi précis soient-ils. Ils ne remplaceront jamais le regard du spécialiste. ”

## BIBLIOGRAPHIE

- BILLAUD (Y.) *et alii* — Acquisition 3D et documentation multiscalaire de la grotte Cosquer : une réponse aux difficultés d’accès et à une submersion inéluctable ?, dans *Karstologia* n° 64, 2014, p. 7-16.
- COLLINA-GIRARD (J.) — Présentation d’une carte bathymétrique au 1/25 000<sup>e</sup> du précontinent marseillais (au large de la zone limitée par la grotte Cosquer et l’habitat préhistorique de Carry-le-Rouet), dans *Géologie méditerranéenne*, 19-2, 1992, p. 77-97.
- KOKALJ (Ž.), SOMRAK (M.) — Why Not a Single Image? Combining Visualizations to Facilitate Fieldwork and On-Screen Mapping, dans *Remote Sensing*, 11-7, 2019, p. 747.
- KONIK (S.), LAFON-PHAM (D.) — Apports de la colorimétrie et de la spectroradiométrie à la caractérisation in situ des peintures paléolithiques de la grotte Chauvet (Ardèche, France), dans *Comptes rendus. Physique*, 19-7, 2018, p. 612-624.
- PARAMYTHIOTI (M.) — Grotte Cosquer : relevé intérieur par le capteur Soisic, dans *XYZ*, n° 66, 1996, p. 24-27.

Relevés 3D de la grotte Cosquer : illustration des niveaux de rendu centimétrique, millimétrique et inframillimétrique demandés par le ministère de la Culture.  
© Fugro/MCC, 2020