



Relevés de la grotte Cosquer (partie 2) vers une dématérialisation de la grotte par digitalisation des processus et numérisations 3D, comment offrir à la communauté scientifique et au grand public l'accès au plus inaccessible des grands sanctuaires ornés d'Europe

■ Bertrand CHAZALY

Les numérisations 3D réalisées dans la grotte Cosquer depuis 2010 relèvent d'une démarche de dématérialisation des données graphiques à caractère scientifique acquises dans le monument. La réflexion sur la digitalisation des processus permettant cette dématérialisation est alimentée par le dialogue régulier avec ses utilisateurs et par le progrès incessant des moyens et méthodes de captation, d'exploitation et de partage des données.

La numérisation est l'action de transférer un objet matériel sur support numérique. Les formes et les couleurs (ou texture) de la grotte sont "transférées" sur des fichiers de scan laser 3D et des photographies stéréoscopiques haute résolution, afin d'en extraire des informations fines sur la morphologie, les reliefs, les couleurs des parois et des œuvres qui y sont représentées.

La démarche de numérisation est justifiée par l'inaccessibilité des lieux. Initiée dès les années 1990 avec l'intervention des chercheurs d'EDF [PARAMYTHIOTI, 1996], elle a été réfléchi à la fin des années 2000. Elle ne dispense cependant pas les spécialistes de l'équipe scientifique d'interventions dans la grotte pour y mener leurs études. Mais les difficultés extrêmes d'accès ne sont pas le seul frein à leur bonne réalisation (figure 1). Même une fois dans la grotte, les condi-

■ MOTS-CLÉS

archéologie, art pariétal, bathymétrie, clone numérique, dématérialisation, digitalisation, grotte ornée, LiDAR, maillage 3D, numérisation 3D, orthophotographie, photogrammétrie, scanner 3D, topographie.

tions de travail restent particulièrement compliquées : contact physique interdit avec les parois, obscurité absolue,

humidité, sols glissants, en forte pente et parfois instables, œuvres au-dessus de sols noyés ou au plafond de zones très exigües et accessibles seulement par reptation. On ne peut pas étudier l'art de Cosquer comme on peut étudier celui des grottes Chauvet ou Lascaux. Les données numériques permettent donc de réduire l'exposition aux risques et aux difficultés d'intervention, en alimentant les études menées en amont et en aval des interventions, ou en servant de support dans la grotte, embarquées sur des moyens informatiques portables, durcis et étanches.



Figure 1. Plongée dans le tunnel d'accès à la grotte Cosquer.

© Luc Vanrell - Immadras



Une deuxième justification à la numérisation de la grotte est le potentiel d'exploitation des données numériques, parfois ignoré, souvent sous-estimé par les archéologues et scientifiques. Là où traditionnellement des choix sont faits *in situ* lors du relevé, définissant par exemple la direction de la projection cartographique ou le type de restitution graphique, une numérisation suffisamment détaillée permet de faire ces choix *a posteriori*, de les reprendre, d'en changer ou de les décliner. Elle permet d'amplifier le degré de perception des indices anthropiques et grâce aux outils de traitements numériques, d'accéder à un niveau de détail désormais supérieur à celui que l'on peut avoir face à la paroi.

La troisième justification est l'ampleur du champ d'exploitation. Ces données ont vocation à être utilisées par un panel très large de spécialistes. Nous ne citerons ici que ceux qui ont déjà bénéficié des données déclinées des enregistrements 3D de la grotte : conservateur des monuments historiques, archéologue, pariétaliste, hydrogéologue, géomorphologue, géoarchéologue, architecte, sculpteur, plasticien, infographiste, webmestre, éditeur, réalisateur.

Il ne s'agit donc pas de numériser pour seulement produire de beaux modèles 3D texturés : il est question de tenter d'enregistrer un ou plusieurs réfé-

rentiels de données géométriques et graphiques, figeant l'état de la grotte à un ou plusieurs instants connus et dont la résolution et l'exhaustivité offrent une exploitabilité à vocation universelle par déclinaison de produits numériques : c'est une démarche de dématérialisation.

La dématérialisation est à l'origine l'organisation d'un processus pour répondre à l'objectif du zéro papier. L'idée serait ici de s'affranchir de la présence humaine dans la grotte, pour une étude à 100 % dans l'objet numérique. C'est bien sûr un fantasme. Il convient cependant de repenser l'organisation du processus de captation, de traitement, d'étude et de restitution des parois de Cosquer, pour rendre les données numériques les plus appropriées aux utilisations possibles par l'équipe scientifique, voire par le grand public : comment digitaliser les activités d'études et de restitutions de la grotte Cosquer ?

La demande initiale du ministère de la Culture

L'objectif du ministère de la Culture est clair [ministère de la Culture, 2016] : *"la numérisation 3D de la grotte Cosquer 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. Les données produites sont destinées à :

- devenir un document de constat d'état de la cavité (archive) ;
- servir de support pour la recherche, dans différents domaines, tant archéologiques (formation de la grotte, paroi et entités graphiques, remplissage archéologique) que conservatoires (environnement, climatologie, altérations de la paroi, etc.) ;
- restituer au public 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 pour le public, servir de bases de données ressources pour l'aide à la construction de restitutions du site pour le public, car le site original n'est pas accessible et ainsi optimiser l'accessibilité, la connaissance et la découverte de ce site sans toucher à son intégrité.

Il est demandé de réaliser la numérisation 3D en trois niveaux de détail (figure 2) :

- la volumétrie générale des surfaces de la grotte situées au-dessus du niveau de la mer ;
- la numérisation 3D détaillée des surfaces gravées et peintes à un niveau de détail permettant la localisation des œuvres et le piquetage virtuel de détails sur celles-ci ;



Figure 2. Le panneau des chevaux en trois niveaux de détail.



- la numérisation 3D fine des œuvres à un niveau de détail permettant l'étude complète de celles-ci, tant sur le plan chromatique que sur celui des reliefs et microreliefs.

Il est aussi demandé de réaliser le traitement des mesures permettant la restitution de la grotte et de ses œuvres dans les trois niveaux de détail et garantissant leur calage précis dans un même système de coordonnées.

Pour la volumétrie générale et la numérisation dite détaillée, le ministère demande une couverture de toute la grotte et de ses parois à une densité de 1 point / cm² et une précision de ± 5 mm. Il envisage que cela soit obtenu par une numérisation au scanner laser 3D et estime que 120 positions seront nécessaires.

Pour la numérisation fine des tracés digitaux, peintures et gravures rupestres, une numérisation à une précision relative et une résolution de un dixième de millimètre est demandée, pour une restitution permettant de détecter des formes de quelques dixièmes de millimètres de large ou de profondeur. Les informations de relief et de couleur doivent être enregistrées, sur un total estimé à 2 500 m².

Proposition d'une démarche de digitalisation en réponse à la demande et aux besoins associés

On pourrait simplement résumer la demande comme suit : numériser la grotte par 120 positions de scanner laser 3D et densifier la numérisation 3D par une couverture inframillimétrique des reliefs et des couleurs des peintures et gravures.

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. Mais en dehors des critères de densité et de précision, la manière dont ces données seront exploitées n'est pas détaillée.

Les très nombreux échanges avec les acteurs impliqués dans les études archéologiques, scientifiques et de

conservation de la grotte, ainsi que l'interrogation de leurs usages dans le monument nous ont poussés à prendre du recul sur ce premier niveau d'expression des besoins pour tenter de mieux appréhender la finalité des exploitations. L'idéal serait de pouvoir reproduire dans un environnement totalement numérique les gestes et attitudes pendant les phases d'observation sur le terrain, voire "d'augmenter" les moyens de perception. Cette démarche de digitalisation des processus s'appuie sur l'approche multiscalaire suggérée par la demande du ministère (archive centimétrique, millimétrique, inframillimétrique) et initiée en 2010 [BILLAUD, 2014]. Elle entraîne aussi une extension de l'amplitude des échelles de restitution, exige d'améliorer les procédés de captation numérique et alimente le développement de méthodes d'exploitation numérique. Les quelques exemples suivants illustrent cette démarche.

Paysage souterrain de la grotte, paléo paysage : le monument dans son contexte géologique et géographique

Les recherches s'intéressent notamment aux différentes morphologies du volume souterrain, incluant par exemple les zones de fracturation, les

chaos de blocs et les dièdres d'arrachement, permettant de déterminer comment le volume s'est formé dans le massif karstique. Les éléments d'observation utilisés par les chercheurs sont des indices morphologiques, la couleur des roches, l'organisation et les signes d'évolution des éléments géologiques comme les spéléothèmes. Ces informations alimentent les connaissances sur la chronologie de Cosquer. Les données 3D centimétriques ou millimétriques permettent en principe de générer des plans, des coupes ou des modèles ombrés des sols et des plafonds de la grotte, révélant les indices morphologiques. La couleur étant une source d'information, il faut produire des données 3D texturées. Il est donc possible d'assister les recherches dans ce domaine en assurant au scanner laser 3D une numérisation dense, homogène et texturée, d'où des rendus sont exploités sous forme de cartes ombrées, d'images panoramiques haute résolution et de modèles 3D texturés.

Par extension, les mêmes indices sont recherchés dans le massif du cap Morgiou où est située Cosquer (figure 3). La grotte est géolocalisée : les indices souterrains peuvent être connectés aux indices morphologiques extérieurs. Cette connexion permet aussi d'alimenter un modèle de fonc-



Figure 3. La calanque de Morgiou, sur la commune de Marseille. La flèche indique l'aplomb de l'entrée de la grotte.



tionnement du massif karstique, utile à l'étude des variations actuelles du niveau de l'eau dans la grotte. Enfin, inscrire le paysage environnant la grotte dans l'histoire des variations du niveau des mers depuis la fin de la dernière ère glaciaire est un moyen supplémentaire de nourrir la chronologie du monument. Il est donc paru intéressant de proposer un changement d'échelle et d'associer aux modèles centimétrique et millimétrique des modèles plus vastes, décimétrique et métrique, couvrant l'environnement immédiat de Cosquer (quelques centaines de mètres autour de l'entrée) et le paysage plus général (quelques dizaines de kilomètres autour des Calanques).

Exploration et cartographie des espaces volumétriques

La perception de l'environnement karstique souterrain n'est pas simple [JAILLET, 2019]. L'absence d'éclairage et la complexité des volumes entraînent des difficultés d'orientation et d'appréhension des dimensions réelles, difficultés ressenties les premières fois qu'on pénètre dans la grotte Cosquer. Les distorsions incroyables des esquisses cartographiques réalisées lors des premières interventions dans la grotte dans les années 1990 en sont une parfaite illustration, esquisses dont l'utilisation perdue à ce jour puisqu'elles sont encore exploitées pour justifier du respect des proportions de la "réplique", en cours de réalisation dans la maison de la Méditerranée à Marseille.

Il n'est pas évident de réaliser des cartes de Cosquer correctement interprétées par ceux qui ne sont jamais entrés dans la grotte. Séparer le plafond du sol est une première approche, mais où situer cette séparation dans un espace où les niveaux peuvent parfois se superposer ? Quelles directions de projection privilégier ? Quel type de rendu ? Sa propre projection physique dans la grotte est un bon préalable à l'appropriation des volumes et à la compréhension des restitutions proposées, qu'elles soient cartographiques ou tridimensionnelles. Cette projection se construit au fur et à

mesure des déplacements, des allers-retours, de l'identification des points de passage et des cheminements naturels dans Cosquer. C'est le fait de parcourir la grotte qui nous fait mieux la connaître et permet ensuite d'orienter les choix cartographiques.

Il est possible de reproduire numériquement et fidèlement ces parcours. Deux solutions permettent aux spécialistes et au grand public de découvrir et de s'appropriier la grotte, sans les contraintes d'une réplique physique :

- la visite virtuelle à partir d'images panoramiques haute résolution : à l'image des parcours dans Google StreetView, il est possible d'explorer la grotte en progressant d'image panoramique en image panoramique. La continuité du parcours d'exploration implique d'assurer une transition logique entre chaque position (maintien de la direction de progression, effet de déplacement par zoom) et l'incrustation d'éléments de navigation dans l'image (boussole, carte de localisation, indicateurs des points d'intérêt et des directions d'exploration). Cela implique une forte densité des positions de prises de vues panoramiques dans la grotte, pour offrir plusieurs options de parcours. Cela nécessite aussi l'utilisation d'un éclairage centré sur chaque panoramique, permettant de restituer fidèlement l'ambiance perçue à chaque position.

- la réalité virtuelle : les solutions utilisant les casques de réalité virtuelle permettent de s'immerger et de se déplacer dans un modèle 3D texturé de la grotte. La principale contrainte est la discordance entre l'espace réel où se trouve l'utilisateur et l'environnement virtuel dans lequel il est plongé : comment le faire progresser sur un sol en pente lorsqu'il se trouve en réalité sur un plancher plat ? Les solutions de déplacement par saut ou en "volant" sont possibles, mais une immersion plus objective implique de pouvoir ressentir physiquement les déplacements dans le monument. Les solutions développées par la fondation Dassault Systèmes à la Cité de l'architecture et du patrimoine sont une piste très intéressante [Cité de l'architecture et du patrimoine, 2021].

L'art pariétal et les tracés anthropiques : étude et conservation

C'est un point très sensible des activités de recherche menées à Cosquer. L'art pariétal est l'un des témoignages les plus bouleversants des différents passages de l'Homme, d'autant plus que le monument est à ce jour la seule grotte ornée connue ayant des représentations d'animaux marins et que certaines œuvres sont en train de disparaître sous nos yeux. Le relevé, l'étude et



Figure 4. Tracés digités sur les parois de la grotte Cosquer. Les dimensions de certaines traces laissent supposer qu'elles ont été réalisées par des enfants.



la compréhension des œuvres, signes et traces laissées sur les 2 500 m² de sols, parois et plafonds sont une priorité absolue. Si certaines représentations sont explicites et constituent le corpus des œuvres majeures de Cosquer, la très grande majorité des signes laissés volontairement par l'Homme sur les parois est constituée de tracés digités : ce sont des séries de lignes et courbes, parallèles ou se croisant, réalisées à plusieurs doigts dans la paroi molle constituée de *mondmilch*¹, qu'il est difficile d'interpréter : prélèvement de matière, pratique spirituelle ou simple distraction ? (Figure 4).

Une autre difficulté est la superposition des tracés : partout, peintures, gravures et tracés digités s'entremêlent dans une chronologie qu'il reste à affiner, même si des datations ont montré qu'un même panneau pouvait avoir été travaillé à des époques séparées de 8 000 ans.

La morphologie et l'orientation des supports décorés varient beaucoup : parois relativement planes et verticales, plafonds, surfaces incurvées, en cloche ou de révolution (spéléothèmes). Enfin, certaines œuvres ont été réalisées dans des secteurs exigus, où il a fallu ramper pour atteindre les parois (figure 5). Les conditions d'étude et d'observation de l'art pariétal dans Cosquer sont donc extrêmes et le champ de perception *in situ* de certaines œuvres ne peut tout simplement pas couvrir toute leur emprise.

L'observation des spécialistes intervenant sur un panneau orné a permis de distinguer deux démarches :

- l'observation de l'œuvre dans sa globalité, sa composition graphique, son style, son orientation, ses couleurs, les indices caractéristiques d'une époque, ses singularités, etc. Dans cette phase d'étude, le spécialiste se tient à une distance permettant de balayer le panneau d'un seul regard (quand c'est

¹ Le *mondmilch*, ou "lait de lune" est un matériau naturel pâteux, constitué de calcite fortement hydratée. Pressé dans la main, un liquide blanchâtre semblable à du lait s'en échappe. Il a été utilisé comme remède (troubles articulaires, troubles digestifs). Dans Cosquer, elle a la consistance d'une pâte molle et couvre une grande majorité des parois. Le moindre contact laisse une trace indélébile, d'où l'interdiction formelle de toucher les parois.



© Luc Vanrell – Immadras

Figure 5. Le panneau du mégacéros noir.

possible) et multiplie les sources de lumière pour disposer d'un éclairage homogène sur toute la surface étudiée. - l'observation des détails, notamment la manière dont les peintures ont été déposées, la forme et la profondeur des gravures, l'ordre de superposition, l'orientation des tracés et bourrelets de matière, les signes d'utilisation d'outils, les marques de dégradation, etc. Le spécialiste 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 ces deux attitudes dans un environnement numérique implique donc d'assurer une numérisation très détaillée où les couleurs sont restituées le plus fidèlement possible et permettant un contrôle complet des ombres, gênantes ou très utiles selon la phase d'observation. Pour aller plus loin, la numérisation doit offrir le même confort d'étude quelle que soit l'œuvre et sa localisation dans la grotte, voire permettre à des outils de traitement d'assister le spécialiste dans la découverte et l'analyse des détails du panneau orné et dans le suivi de son état de conservation.

Mise en œuvre

Pour un topographe, Cosquer est un chantier qui exige d'élargir ses compétences, afin de gérer et réunir des

données acquises par moyens aériens, terrestres et maritimes en 3D, à des échelles allant de la région de Marseille jusqu'aux aspérités des gravures de quelques millimètres de large. La réalisation des relevés dans et autour de la grotte a fait appel à un panel très large de techniques de mesure. Nous allons nous intéresser ici à trois niveaux de numérisation ayant exigé une approche particulière.

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 30 000 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 [COLLINA-GIRARD, 1992].

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.



Producteur / Données	Milieu	Résolution	Format	EPSG	Type de données	Datum	Projection	Z
NASA MNT SRTM	Terrestre	1 arc' (≈ 30m)	.tif	4326	Géographiques	WGS84	-	EGM96
IGN MNT	Terrestre	75 m	.tif	2154	Planes	RGF93	Lambert 93	IGN69
		75 m	.asc	2154	Planes	RGF93	Lambert 93	IGN69
		75 m	.tif	2154	Planes	RGF93	Lambert 93	IGN69
IFREMER MNT	Sous-marin	10 m	.tif	4326	Géographiques	WGS84	-	H ell
		≈ 20 m	.tif	3395	Géographiques	WGS84	-	H ell
SHOM MNT Facade 2015	Sous-marin	0,001° (≈ 100 m)	.asc	4326	Géographiques	WGS84	-	NM
SHOM Semis Bathy av 1970	Sous-marin	≈ 70 m	.xyz	4326	Géographiques	WGS84	-	- LAT
SHOM Semis Bathy 1970-1990	Sous-marin	30/40 m	.txt	4326	Géographiques	WGS84	-	- LAT
SHOM Semis Bathy après 2005	Sous-marin	Divers (< 10 m)	.xyz	4326	Géographiques	WGS84	-	- LAT
SHOM MNT Litto3D 5M	Hybride	5 m	.asc	2154	Planes	RGF93	Lambert 93	IGN69
SHOM Semis Litto3D	Hybride	≈ 1 m	.xyz	2154	Planes	RGF93	Lambert 93	IGN69
SHOM MNT Litto3D 1M	Hybride	1 m	.asc	2154	Planes	RGF93	Lambert 93	IGN69

Sources :

NASA : <http://www2.jpl.nasa.gov/>

IFREMER : <http://donnees-campagnes.flotteoceanographique.fr/>

IGN : <http://geoservices.ign.fr/>

SHOM : <http://data.shom.fr/>



Nous avons opté pour deux niveaux de modélisation :

- une emprise de 100 kilomètres autour de la ville de Marseille, englobant les reliefs de l'arrière-pays, le plateau et le talus continental dont le canyon sous-marin de Cassidaigne et, au large, la plaine abyssale (figure 6) ;
- une emprise resserrée autour du cap Morgiou, d'environ quatre kilomètres de large, focalisée sur le paysage géologique immédiat de la grotte (figure 7).

Le recensement des bases de données géographiques disponibles couvrant les fonds marins et les reliefs terrestres des deux zones a permis de rassembler les jeux suivants :

Pour l'emprise générale, deux semis de points 3D ont été couplés, le premier issu de la transformation des données SHOM 2015 dans le système de coordonnées RGF93 / CC44 / NGF, le second issu de l'exportation des dalles du MNT de l'IGN. L'interpolation du semis

résultant a abouti à un maillage 3D modélisant le paysage de la région de Marseille, de 100 mètres de résolution, et permettant notamment :

- la simulation de l'impact des variations du niveau des mers et la simulation 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 la grotte (figure 8) ;
- la réalisation de maquettes physiques par impression 3D.

Pour le paysage environnant l'entrée de la grotte, les données Litto3D offrent une résolution de 1 m et couvrent à la fois les surfaces terrestres et subaquatiques. Cette résolution est très intéressante, mais le jeu de données n'est pourtant pas suffisant pour une restitution complète de la morphologie du massif karstique. Produit à partir d'un levé LiDAR bathymétrique aéroporté, il couvre peu les surfaces verticales du tombant du massif. Or c'est aussi sur ces élévations que la



Figures 6 et 7. Les deux niveaux de modélisation du paysage autour de la grotte Cosquer.

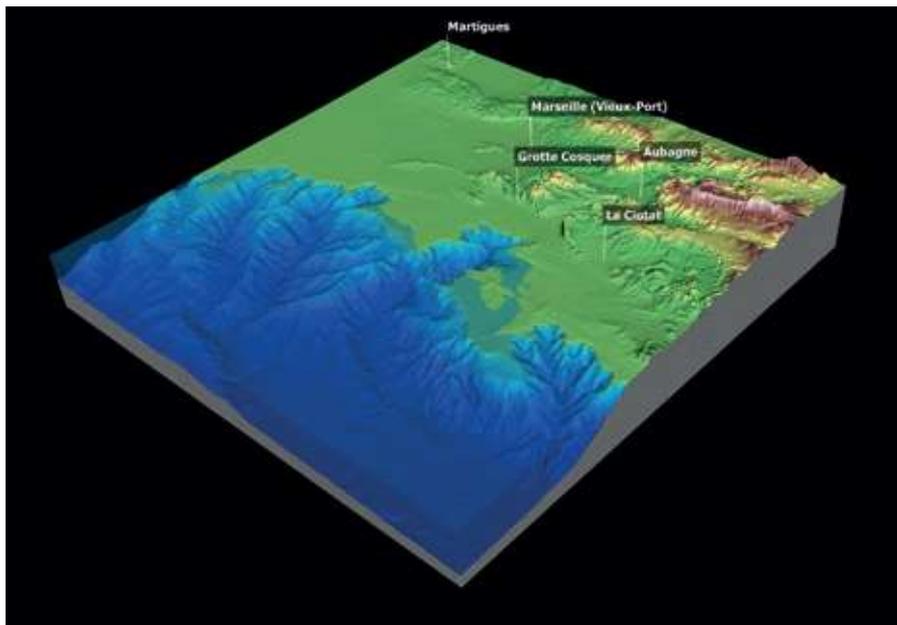


Figure 8. La région de Marseille il y a 30 000 ans, lorsque la mer était 120 m plus bas.

lecture des indices morphologiques est faite. Sous l'eau, les mesures atteignent la profondeur de 40 m, soit tout juste le seuil du porche d'entrée de la grotte : la plaine s'ouvrant devant la grotte n'est pas relevée.

Nous avons donc dû compléter les données Litto3D par deux nouveaux jeux de mesures.

- Le relevé photogrammétrique des falaises du cap Morgiou : nous avons pris 250 photographies stéréoscopiques couvrant les 2,5 km de linéaire de falaises depuis la mer. La mise à l'échelle et le géoréférencement du bloc d'images sont appuyés sur 20 repères naturels extraits du semis de points Litto3D et identifiés dans les images, les écarts de calage oscillant entre 0,2 et 0,7 m (figure 9).

- Le relevé bathymétrique multifaisceaux des fonds marins en pied de falaises : nous avons eu l'opportunité de nous joindre à une campagne de mesures réalisée depuis l'André Malraux, le navire d'exploration archéologique du DRASSM (Département de recherches archéologiques subaquatiques et sous-marines du ministère de la Culture). La journée passée sur le navire aux côtés des équipes de recherche a permis d'orienter les mesures bathymétriques vers les zones nous concernant, afin d'enregistrer les données denses sur les fonds faisant face à la grotte.

L'appariement des jeux de données complémentaires aux données Litto3D, puis l'interpolation du semis de points 3D a permis de produire un 2^e maillage 3D de résolution métrique (figure 10).

L'archive centimétrique à millimétrique de la grotte

À l'aune de la complexité et de la très grande 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 de numérisation 3D en milieu souterrain : précision de quelques millimètres, portée de plusieurs dizaines de mètres, faible encombrement, batterie et enregistrement des mesures embarqués dans le capteur, capteur photographique associé sans parallaxe aux mesures 3D.

Ils ont cependant trois points faibles :

- Ils numérisent régulièrement leur environnement selon un pas de mesure angulaire. 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 un environnement clos et exigu comme celui 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 : une colonne stalagmitique verticale doit par exemple être couverte par au moins quatre positions de scanner autour d'elle.

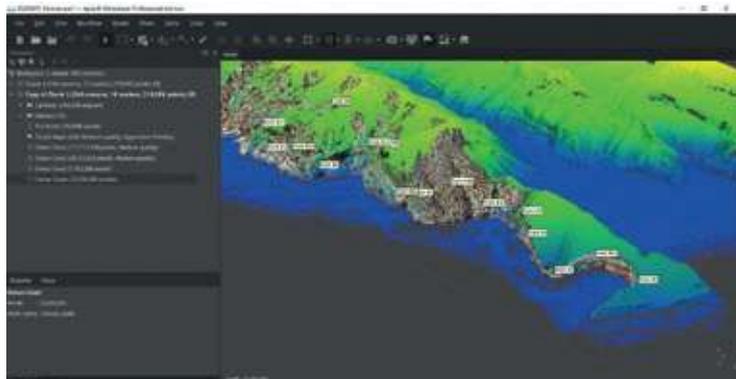


Figure 9. Couplage du relevé photogrammétrique aux données Litto3D couvrant le cap Morgiou.

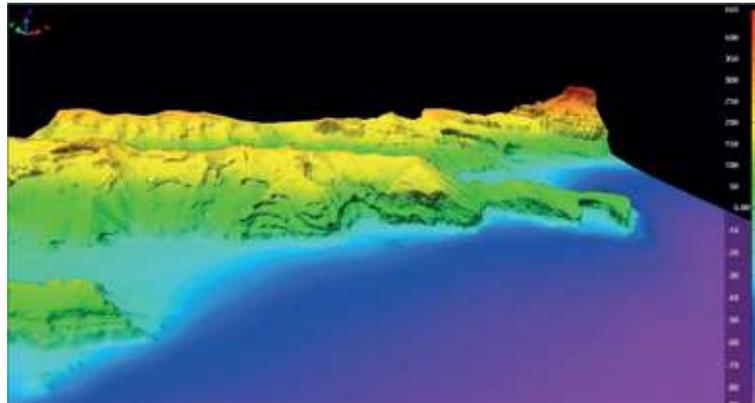


Figure 10. Modèle maillé 3D du cap Morgiou.

▶ - La mesure laser 3D peut être réalisée dans le noir complet, mais pas l'enregistrement des couleurs. D'un point de vue logistique, il est trop lourd de mettre en place un éclairage de toute la grotte pour la mesure : il faut trouver un moyen d'éclairer l'environnement de chaque position de scanner de façon simple et autonome.

Cela nous a conduits à proposer au ministère de la Culture 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 au montage sur le scanner d'un système de couronnes de LEDs coaxiales, conçu pour ce projet (figure 11).

Ce sont ainsi plus de 380 positions de scanner qui ont été enregistrées dans la grotte, soit plus de 10 milliards de points 3D et autant de pixels associés. La consolidation relative des positions a utilisé la méthode de calage nuage-nuage, puis le bloc entier a été ajusté dans le système RGF93 / CC44 sur le réseau de 24 repères topographiques de la grotte, à une précision de 4 mm.

Cette base de 380 fichiers de scanner 3D calés et texturés constitue une première archive 3D de la grotte, de quelques millimètres de précision et de résolution. C'est de cette archive que sont ensuite déclinés les produits utiles à l'étude de la grotte. C'est aussi elle qui a nourri les équipes du groupement Kléber-Rossillon en charge de la conception d'une réplique à Marseille.



Figure 11. Le scanner 3D et son système d'éclairage coaxial pendant la numérisation de la grotte Cosquer.

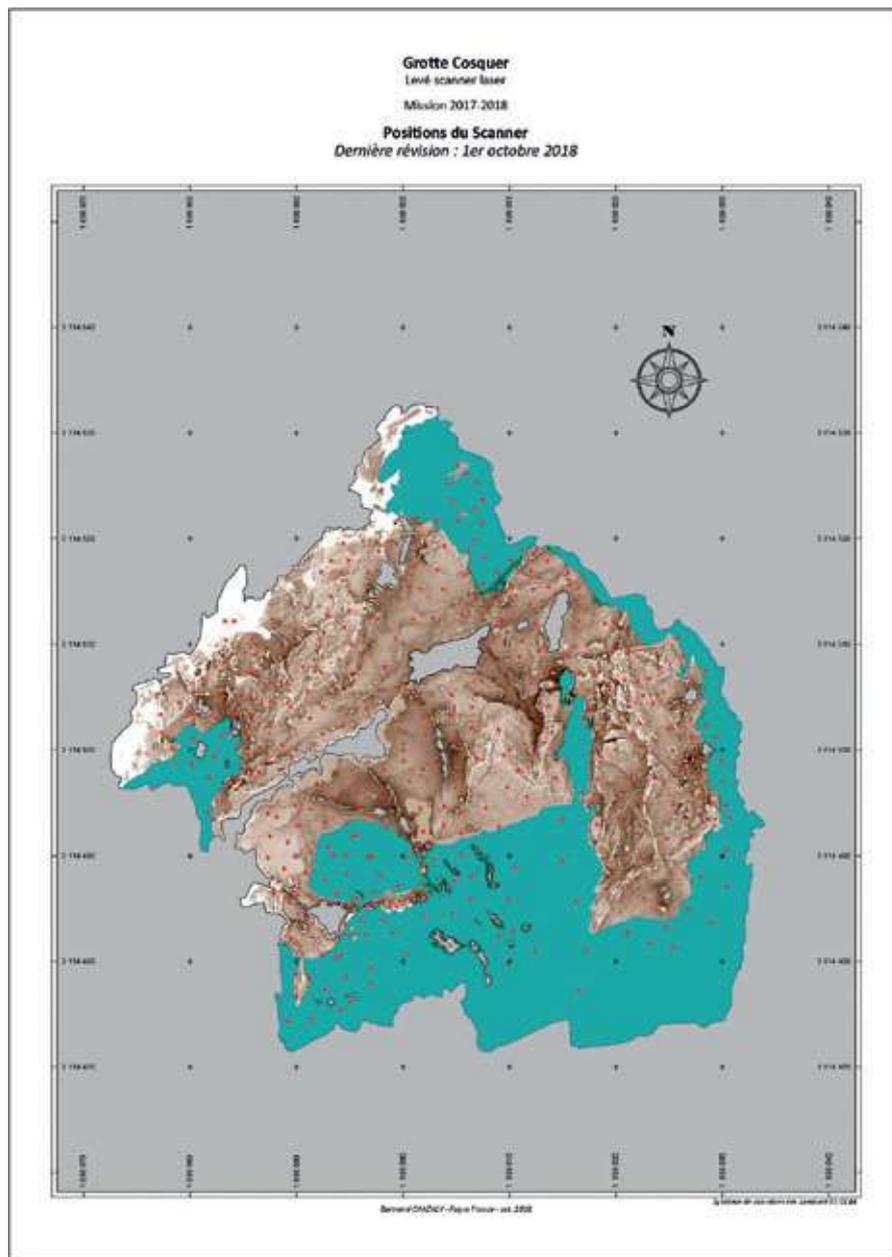


Figure 12. Cartographie ombrée des sols, issue de la numérisation par scanner laser 3D de la grotte Cosquer. Chaque point rouge indique une position de scanner.

Parmi les exploitations réalisées depuis cette base, nous pouvons citer :

- base de nuage de points 3D colorés géoréférencée au format Autodesk® Recap ;
- cartographie ombrée de la morphologie des sols et des plafonds (figure 12) ;
- cartographie des hauteurs sous plafond et localisation des zones potentiellement accessibles à l'Homme ;
- délimitation et cartographie des surfaces directement impactées par les variations du niveau de l'eau dans la grotte ;
- piquetage et géoréférencement des 513 entités graphiques (en cours) ;

- géoréférencement des prises de vues photogrammétriques sur les panneaux ornés ;
- visite virtuelle sur le site Internet "Grands sites archéologiques" (en cours) ;
- modélisation 3D maillée (figure 13) et exploration par casque de réalité virtuelle sous Unity3D ;
- maquette 3D BIM.

Le relevé des œuvres pariétales

La numérisation inframillimétrique du panneau des chevaux réalisée en



2010 fut une première. Nous avons mis la méthodologie au point trois ans plus tôt à l'abri des pêcheurs, voisin de la grotte Chauvet en Ardèche, sur les quelques dizaines de centimètres carrés d'un bouquetin gravé sur la paroi de l'abri [AZEMA 2010]. Pour les 10 m² des trois fameux chevaux de Cosquer, elle consistait aussi à assurer le relevé inframillimétrique en deux étapes successives, la première réalisée à l'aide d'un scanner 3D inframillimétrique, la seconde étant la couverture photographique très haute résolution du panneau scanné (0,01 mm² par pixel). Les photographies étaient ensuite calées sur le modèle 3D par pointé de repères naturels homologues, puis drapées sur le modèle à leur résolution d'origine.

La finesse du résultat a permis de valider l'utilisation du modèle 3D texturé produit à l'époque comme source d'étude de l'œuvre pariétale : texture et relief numériques sont pour la première fois de résolution équivalente.

L'opération de 2010 a cependant permis de cerner les limites et défauts de la méthode :

- Le scanner inframillimétrique ne peut travailler qu'à une distance relativement constante de la paroi. Il n'est pas possible de faire varier cette distance et d'ajuster la résolution de numérisation au niveau de détail à produire ou au recul disponible. Il gère notamment très mal les grandes profondeurs de champ, ce qui est très problématique pour des spéléothèmes aux formes complexes.
- Ce type de capteur n'est pas autonome et nécessite de rentrer dans la grotte un ordinateur portable pour piloter la numérisation. C'est aussi une technologie assez coûteuse, ce qui appelle à la plus grande prudence lors de sa mise en œuvre dans Cosquer, voire interdit des numérisations dans les secteurs les plus exposés à l'eau et l'humidité.
- L'association aux prises de vues photographiques nécessite une opération de traitement supplémentaire et induit des résidus de calage relatif.
- Les prises de vues ont nécessité la mise en place et le réglage de plusieurs éclairages autour du panneau, ce qui a considérablement allongé la durée de



Figure 13. Texturation du modèle maillé 3D du secteur 101 (panneau des chevaux) réalisée sous Agisoft Metashape à partir des images panoramiques acquises par le scanner.

l'opération de mesure et apporté des défauts : variation de la direction des ombres sur les microgravures entre les prises de vues, reflets lumineux de l'eau projetés sur la paroi.

La mise en œuvre de cette approche pour couvrir les 2 500 m² de surfaces peintes ou gravées dans Cosquer et l'exigence de produire des données les plus exploitables possible, nous ont amené en 2016 à repenser complètement la manière de numériser les parois à ce niveau de détail. Nous avons pris la décision d'abandonner le scanner inframillimétrique et de produire l'ensemble des données submillimétriques à partir de prises de vues photogrammétriques. Les expérimentations menées dans les grottes ornées et l'analyse du processus de prise de vues numériques des parois de Cosquer ont abouti à l'identification de quatre 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 [KONIK 2018], a révélé les faiblesses de tous les éclairages à LEDs sur certains tronçons du spectre, notant dans le rouge. Seul le flash professionnel associé à l'appareil photo numérique a la capacité de couvrir un spectre large et régulier, permettant de restituer convenablement les couleurs photographiées. Pour le capteur photo, la possibilité de

calibrer finement les couleurs est assurée par la prise de vue d'une mire de calibration en début de chaque couverture photogrammétrique.

- La diminution, voire l'élimination des ombres projetées sur la paroi lors des prises de vues : cela implique d'assurer une diffusion large et homogène de la lumière, centrée sur l'axe de chaque prise de vue.
- L'adéquation entre distance de prise de vue, résolution du capteur numérique et distance focale : l'exiguïté de l'espace disponible pour réaliser les prises de vues nous a poussé à privilégier un capteur de 50 millions de pixels équipé d'un objectif 28 mm. Pour assurer une numérisation au 1/10 de millimètre, le capteur est généralement placé à 70 cm des parois, mais on peut le rapprocher ou le reculer et changer d'optique si nécessaire.
- Le mode de recouvrement stéréoscopique : la couverture d'une surface plutôt plane est correctement assurée par un recouvrement stéréoscopique de 75 % à axes parallèles (la direction de chaque prise de vue est parallèle au vecteur normal de la surface), mais les gravures et variations locales du relief invitent à compléter ponctuellement la couverture des artefacts par des prises de vues convergentes.

Le relevé de l'art pariétal dans la grotte Cosquer nécessite donc une lecture attentive du relief de la paroi afin d'adapter la stratégie de couverture 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





Figure 14. Le système de prise de vue photogrammétrique et son diffuseur annulaire mis en œuvre dans la grotte Cosquer.

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 (figure 14).

À ce jour, plus de 36 500 prises de vues stéréoscopiques ont été enregistrées, traitées et géoréférencées, couvrant environ 1 200 m² de parois.

Pour chaque panneau relevé, un modèle maillé 3D inframillimétrique est produit, sur lequel est plaquée une texture restituant uniquement les nuances colorimétriques fines de la surface.

Les exploitations du modèle texturé sont :

- La production de vues orthophotographiques haute résolution. Ces documents permettent aux pariétalistes de produire leurs restitutions et d'appuyer leurs interprétations. L'archivage des paramètres de projection orthophotographique est 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 (figure 15).
- La réalisation de répliques : c'est le travail mené actuellement par les artistes Gilles Tosello et Alain Dalis sur



Figure 15. Extrait des orthophotographies du panneau des chevaux de 2010 et 2020, révélant la dégradation du cheval 1 due à son exposition régulière aux variations du niveau de l'eau. À noter que l'image de 2010 est légèrement brouillée par la présence d'ombre dans les microreliefs.

- les panneaux qui seront 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.
- 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 (figure 16):

- Des logiciels de visualisation de modèle maillé permettent de déplacer une source de lumière en temps réel devant le modèle maillé 3D, reproduisant numériquement le geste réalisé physiquement devant le panneau. Le logiciel gratuit *CloudCompare* possède un tel outil appelé source de lumière secondaire, ou *custom light*. (Voir le chapitre consacré aux lumières dans le guide utilisateur du logiciel : <http://www.cloudcompare.org>).
- L'interpolation d'une grille "MNT" peut être réalisée dans le même système de projection que l'orthophotographie. Le fichier obtenu est alors exploité par des solutions de traitement de MNT. Signalons l'excellent outil développé par le Centre de recherche de l'académie des arts et des sciences de Slovénie [KOKALJ 2019]. La *Relief Visualization Toolbox* (RVT) décline plusieurs images du MNT où les microreliefs sont particulièrement accentués : ombrage multi sources, pentes, modèle local de relief. C'est par exemple le moyen d'améliorer la détection des reliefs en ne dépendant plus d'une seule direction d'éclairage.
- Pour les modèles difficiles à projeter sur un plan, un traitement similaire à l'outil RVT est possible en 3D : le calcul d'une texture *Normal map*. Le *Normal mapping* est une technique développée par les producteurs d'images de synthèse et les concepteurs de jeux vidéo pour alléger la taille d'un modèle 3D en réduisant le nombre de triangles, tout en conservant un niveau de finesse équivalent dans le rendu visuel des reliefs. La texture *Normal map* est ici calculée à l'aide du logiciel Agisoft® Metashape, à partir de la différence entre le modèle 3D haute résolution et une copie du modèle, allégée et lissée. La couleur des pixels de l'image produite fournit l'information de distance et d'inclinaison entre les deux modèles. Appliquée comme texture au modèle maillé, elle permet une visualisation 3D où les microreliefs sont particulièrement soulignés.



Figure 16. Panneau des chevaux 2020 : orthophotographie, GRID MNT ombré et GRID MNT des microreliefs.

Conclusions

Topographie, 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 d'abord fallu s'interroger sur les besoins et les conditions d'intervention. Puis, il a fallu préciser les objectifs (finalités, emprises, précisions, 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.

Le nombre de technologies de mesure et de restitution mises en œuvre sur Cosquer est impressionnant : LiDAR aéroporté, bathymétrie multifaisceaux,

scanner 3D, photogrammétrie, SIG, réalité virtuelle. Décrire Cosquer reste un défi, d'autant que les deux tiers du volume de la cavité sont noyés (le relevé subaquatique a débuté cette année). Or 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 non seulement à une prise de conscience d'une histoire commune, mais aussi à un dialogue entre communautés et entre générations. C'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. Et le topographe est là, non seulement pour leur simplifier la vie en leur fournissant des données et des outils nécessaires à l'étude des lieux, mais pour participer au dialogue et leur apporter son éclairage. Et dans une grotte, la lumière, c'est assez utile. ●

Contact

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

Remerciements

Les développements méthodologiques décrits dans cet article sont les fruits d'échanges riches et constants avec les intervenants dans la grotte Cosquer, au premier rang desquels se trouvent Luc Vanrell, plongeur et responsable scientifique de la grotte de 2001 à 2020, Delphine Lecoureur, architecte chargée de conservation et de restauration et Michel Olive, ingénieur d'étude au ministère de la Culture. Qu'ils en soient chaleureusement remerciés.

Bibliographie

AZEMA M., GELY B., PRUDHOMME F., Société ATM3D (2010), *Relevé 3D de gravures fines paléolithiques dans l'abri du Colombier (gorges de l'Ardèche)*, In Situ [En ligne], 13, mis en ligne le 16 avril 2012, consulté le 1^{er} août 2021. URL : <http://journals.openedition.org/insitu/6723>

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 ?* Karstologia n° 64, 2^e semestre 2014, pp. 07-16

CITE DE L'ARCHITECTURE ET DU PATRIMOINE (08 juillet 2021) *Visite de la grotte de Lascaux 1/1, le jumeau virtuel*. Consulté sur <http://www.citedelarchitecture.fr/fr/evenement/visite-de-la-grotte-de-lascaux-11-le-jumeau-virtuel>

COLLINA-GIRARD J. (1992). *Présentation d'une carte bathymétrique au 1/25 000° du Précontinent Marseillais*. (Au large de la zone limitée par la grotte Cosquer et l'habitat préhistorique de Carry le Rouet), *Géologie Méditerranéenne*. Marseille, Tome XIX, n° 2, pp. 77-97

JAILLET S., DELANNOY JJ., GENUITE K., HOBLEA F., MONNEY J. (2019) *L'image topographique du karst et des grottes : représentations 2D et technologies 3D, entre réalité et imaginaire*. Géomorphologie : relief, processus, environnement, vol. 25 - n° 3 | pp. 191-205

KOKALJ Ž., SOMRAK M. 2019. *Why Not a Single Image? Combining Visualizations to Facilitate Fieldwork and On-Screen Mapping*. Remote Sensing 11(7): 747.

KONIK S., LAFON-PHAM D. (2018) *Apports de la colorimétrie et de la spectroradiométrie à la caractérisation in situ des peintures paléolithiques de la grotte Chauvet (Ardèche, France)*. Comptes Rendus Physiques, Volume 19, Issue 7, pp. 612-624

MINISTÈRE DE LA CULTURE, DIRECTION RÉGIONALE DES AFFAIRES CULTURELLES, CONSERVATION RÉGIONALE DES MONUMENTS HISTORIQUES (2016) *Grotte Cosquer. Relevés et acquisitions scientifiques, état sanitaire, relevés tridimensionnels*. Appel d'offres, Cahier des Clauses Techniques Particulières.

PARAMYTHIOTI M. (1996). *Grotte Cosquer. Relevé intérieur par le capteur Soisic*. XYZ n° 66, pp. 24-27

ABSTRACT

The 3D scans surveyed in the Cosquer cave since 2010 are part of a dematerialization process of the graphic data of a scientific nature acquired in the monument. The reflection on the digitization of the processes allowing this dematerialization is fed by the regular dialogue with its users, and by the ceaseless progress of the means and methods of data capture, exploitation and sharing.