

Yves BILLAUD ¹,
Bertrand CHAZALY ²,
Michel OLIVE ³
et Luc VANRELL ⁴

(1) Ministère de la Culture, Département des Recherches Archéologiques Subaquatiques et Sous-Marines, 147, plage de l'Estaque, 13016 Marseille;
Laboratoire Edytem, UMR 5204, Université de Savoie, 73376 Le Bourget-du-Lac cedex

(2) Société Fugro Geoid S.A.S., Parc d'activités - Clément Ader, 12, rue des Frères Lumières 34830 Jacou

(3) Ministère de la Culture, Service Régional de l'Archéologie de Provence-Alpes-Côte d'Azur, DRAC, 23, boulevard du Roi René, 13617 Aix-en-Provence Cedex 1

(4) Société Immadras, port de Pointe Rouge, 13008 Marseille

Acquisition 3D et documentation multiscalaire de la grotte Cosquer: une réponse aux difficultés d'accès et à une submersion inéluctable ?

RÉSUMÉ: Déclarée en 1991, la grotte Cosquer présente plusieurs centaines d'entités graphiques gravées ou peintes (animaux, mains, signes, etc.) pour lesquelles deux périodes de fréquentation avaient été initialement proposées [Clottes et Courtin 1994], respectivement autour de 27 000 BP (Gravettien) et de 18 000 BP (Solutrén). La cavité a la particularité d'avoir été partiellement noyée par la remontée du niveau marin après le dernier épisode glaciaire. Son accès est difficile et ne peut se faire qu'en plongée souterraine. Plusieurs campagnes en 1991, 1992 et 1994, puis de 2001 à 2005 ont été essentiellement destinées à l'inventaire des figurations. Toutefois, lors de la campagne de 1994, une acquisition 3D de la cavité a été expérimentée par *laser scanning* (système Soisic) et par photogrammétrie mais sans être exhaustive et l'exploitation des données n'a été que partielle.

Après des campagnes d'aménagement et de mise en sécurité de la grotte, c'est à partir de 2010 que de nouveaux relevés ont été initiés. Cette démarche part du constat d'une urgence face aux aléas auxquels la grotte est soumise: sismicité, pollution et surtout remontée du niveau marin. En dépit des périls qui menacent le site, il s'agit de documenter au mieux la cavité afin d'en permettre une sauvegarde numérique exploitable pour la science, en laboratoire,

au plus près du réel, mais aussi pour une diffusion auprès du public. L'acquisition 3D en cours, par *laser scanning* de précision centimétrique, est complétée sur certains panneaux par de la photogrammétrie avec une définition inframillimétrique. Cette dernière s'avère pertinente pour le décryptage de superpositions complexes de figurations. Bien que ces résultats soient très encourageants, il se pose maintenant la question des moyens mobilisables pour achever cette acquisition et gérer la masse de données obtenues.

MOTS-CLÉS: grotte ornée, Paléolithique, numérisation 3D, lasergrammétrie, photogrammétrie.

ABSTRACT: MULTISCALE 3D ACQUISITION AND DOCUMENTATION OF THE COSQUER CAVE: A RESPONSE TO DIFFICULT ACCESS AND TO AN INEVITABLE SUBMERSION? The Cosquer cave was registered in 1991. It boasts several hundreds of graphic entities, engraved or painted (animals, hands, signs, etc.), for which two periods of frequentation were originally proposed [Clottes et Courtin 1994], respectively around 27, 000 BP (Gravettian) and 18, 000 BP (Solutrean). The cave shows the particularity of having been partially flooded by rising sea levels after the last ice age.

Access is difficult and can only be done through cave diving. Several campaigns

in 1991, 1992 and 1994 and from 2001 to 2005 were essentially meant to gather an inventory of the figures. However, during the 1994 campaign, a capture in 3D of the chamber was tested by laser scanning (Soisic system) and photogrammetry but was not exhaustive and the exploitation of the data mining remained partial.

After campaigns to develop the cave and extend safety within, from 2010 onwards new surveys were initiated. This approach starts from the assessment of an emergency given the hazards the cave is faced with: seismic activity, pollution and above all the rise of sea level. In spite of the threats to the site, the point is to better document the cave in order to allow digital storage as true to the real thing as possible to be used for science, in laboratories, as well as for public circulation.

The 3D capture currently in progress by laser scanning of centimeter level accuracy is completed on some panels with photogrammetry of sub-millimeter resolution. The latter proves relevant when deciphering complex overlays of figures. Although these results prove very encouraging, it now raises the question of the means to be deployed in order to complete this acquisition and deal with the loads of data thus gathered.

KEYWORDS: decorated cave, Paleolithic, 3D scanning, laser scanning, photogrammetry.

Introduction

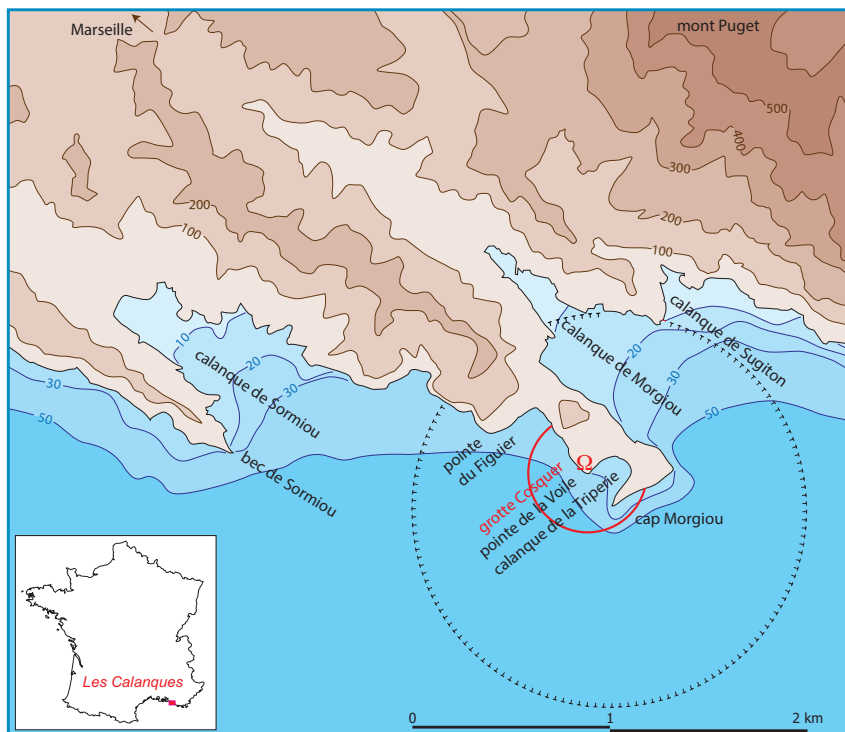
En septembre 1991, juste avant la déclaration de la cavité, un triple accident mortel a tragiquement démontré les difficultés et les risques liés à l'accès en plongée souterraine de la grotte Cosquer.

Depuis, plusieurs campagnes d'études et de travaux se sont succédé, collectant une masse de données dont l'exploitation a été plus ou moins poussée. L'équipe intervenant actuellement dans la cavité cherche à la documenter au mieux dans

le cadre contraint des moyens disponibles et du contexte de travail particulier. Il s'agit en premier lieu de sauvegarder un maximum d'informations face à plusieurs aléas (remontée du niveau marin, pollution, sismicité) ; d'autre part, de « rendre

Figure 1 : Situation de la grotte Cosquer dans les calanques marseillaises; limites des zones réglementées, interdiction de plongée (rayon de 300 mètres, cercle rouge, 2013) et, au-delà, interdiction de travaux sous-marins (rayon d'un kilomètre, cercle noir, 1992) (DAO Y. Billaud / Drassm).

Location of the Cosquer cave in the calanques in Marseilles area; limits of restricted areas, a ban on diving and beyond, a ban on underwater work.



Marseille au nord-ouest, d'Aubagne au nord-est et de Cassis à l'est. Elle se développe dans les épais bancs de calcaires barrémiens à faciès urgonien du cap Morgiou, entre le mont Puget (563 m) et les monts de Marseilleveyre (432 m), au lieu-dit la Pointe de la Voile (figure 1 et photo 1). Cette zone de falaises abruptes plongeant dans la mer recèle de nombreuses cavités émergées ou sous-marines. Celles-ci témoignent d'un karst à l'évolution longue et polyphasée [Blanc, 1993]. Le dernier événement majeur de son histoire est la régression marine liée au dernier maximum glaciaire ayant abaissé le niveau de plus de 100 m au-dessous de l'actuel. La remontée du niveau durant l'Holocène a entraîné la submersion des surfaces karstiques constituant l'actuel plateau continental [Collina-Girard, 1996; Collina-Girard et Monteau, 2010]. L'entrée de la grotte Cosquer, actuellement à 37 m de profondeur, est restée aérienne jusqu'à une date estimée entre 10 300 et 9 800 cal BP [Lambeck et Bard, 2000].

L'accès actuel à la grotte Cosquer emprunte le parcours d'origine maintenant submergé. Depuis le porche en pied de falaise, un conduit noyé, remontant dans le pendage des strates calcaires, amène dans la salle principale au bout de 120 m (figure 2). Sa section est variable. Après l'entrée, de 3 m de largeur pour une hauteur de 2 m, les dimensions augmentent immédiatement avec une hauteur de près de 6 m. La hauteur moyenne est ensuite de 3 m jusqu'à 70 m de l'entrée. Après une rupture de pente, la hauteur s'abaisse ensuite à seulement un mètre, avant un nouvel élargissement à 100 m de l'entrée, bordé de massifs de concrétions immergés (photo 2).

Photo 1 : Vue aérienne du secteur de la grotte Cosquer entre les calanques de Sormiou, à gauche, et celle de Morgiou, à droite; vue prise vers le nord-ouest avec en fond la ville de Marseille.

Au premier plan, la pointe du cap Morgiou et derrière, s'ouvrant vers la gauche, la calanque de la Triperie, en limite de laquelle est située la grotte Cosquer, au pied de la pointe de la Voile.

Cliché Michel Olive / SRA PACA.

Aerial view of the area of the Cosquer cave between the Sormiou calanques, left, and the Morgiou ones, right; the photo was shot looking northwest with the city of Marseille in the background. In the foreground, the tip of Cape Morgiou and behind, going left, the Triperie calanque, bordering the Cosquer cave, is located at the foot of the Point of the Voile.



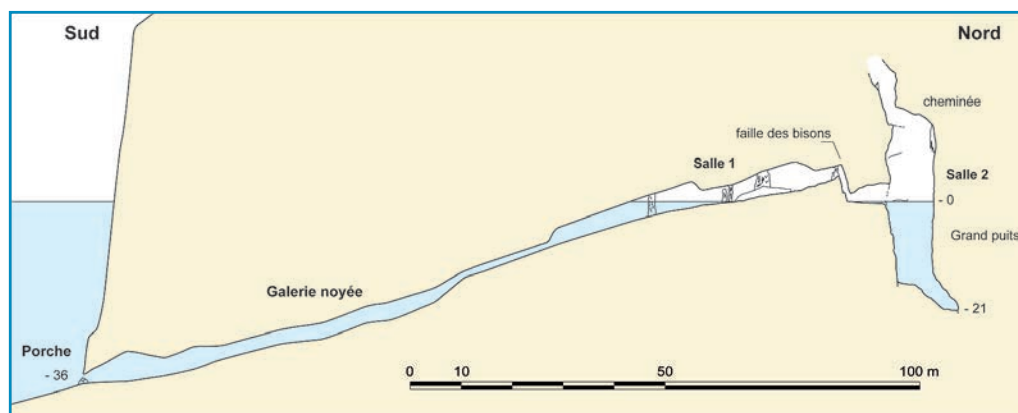


Figure 2: Coupe partielle projetée de la grotte Cosquer (levés L. Vanrell / Immadras et Y. Billaud / Drassm).
Projected partial cross-section of the Cosquer cave.

Le siphon de la galerie d'entrée débouche dans la salle principale, dite « salle 1 » (photo 3). De forme générale trapézoïdale, ses plus grandes dimensions sont de 55 m par 40 m. La hauteur atteint 4 m. La pente générale est directement dépendante de la stratification. Cette dernière se marque également par de grandes portions planes du plafond. Le sol est constitué du substratum calcaire et de deux amas principaux de mégablocs, l'un au centre et l'autre à l'est. Le concrétionnement est important avec des planchers épais et des massifs stalagmitiques de couleur dominante ocre. Ces concrétions massives sont antérieures à la fréquentation humaine. Près de la moitié de la surface de la salle est occupée par le plan d'eau. D'importants prolongements latéraux noyés ont été reconnus en plongée.

À partir de la « salle 1 », un passage étroit, « le Hublot », et un ressaut, « la Faille des bisons », donnent accès au nord-ouest à une autre salle, dite « salle 2 » (figure 3). D'orientation générale sud-ouest / nord-est, elle est longue de 45 m pour une largeur maximale de 15 m. Elle est également marquée par un écroulement de grands blocs constituant ici une arête allongée. Comme dans la salle 1, le concrétionnement est important. Au nord-est, s'ouvre le « Grand puits », noyé sur une profondeur de 21 m. Il remonte en cheminée sur plus de 25 m de hauteur. L'eau est également présente à l'autre extrémité de la salle 2. Sous la surface s'ouvre un autre puits, de dimensions réduites, avec une section métrique pour une profondeur reconnue sur une dizaine de mètres. L'observation occasionnelle d'organismes marins permet d'envisager une communication avec l'extérieur par des conduits impénétrables à l'homme.

Dans les zones actuellement exondées, soit environ un quart du volume total de la cavité, toutes les surfaces accessibles portent des figurations. Il est fort probable qu'il en était de même dans la plus grande partie des espaces actuellement noyés et qu'elles ont été effacées avec l'évolution des parois après l'immersion dans l'eau de mer.

B. Des premières visites aux campagnes d'études

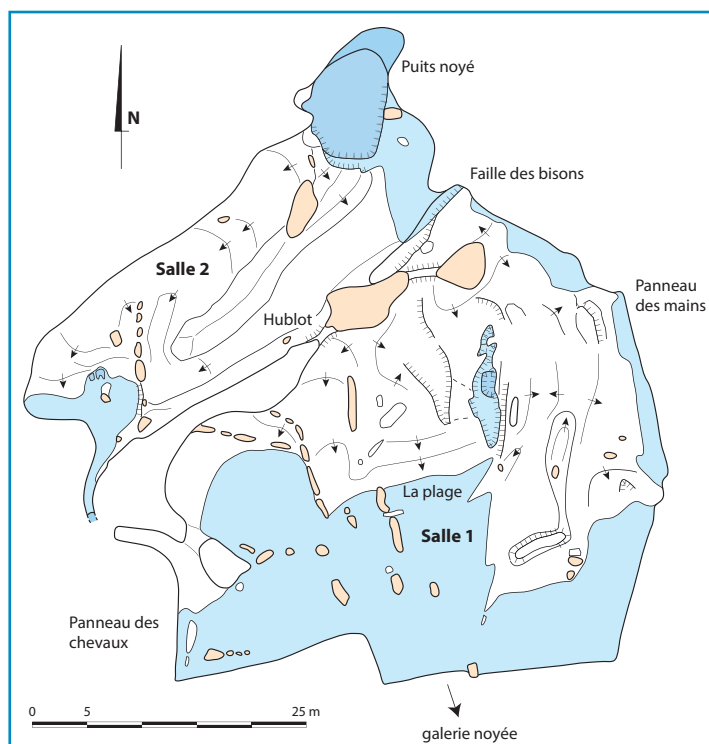
Après la déclaration de la cavité le 3 septembre 1991 par Henri Cosquer, plongeur cassidain, une expertise est réalisée sous la direction de Jean Courtin [Cosquer, 1992]. Elle permet d'authentifier la découverte [Clottes

Photo 2: Concrétions immergées en bordure de la salle 1; le plongeur est vers -7 m. Cliché Luc Vanrell/ Immadras, SRA PACA. *Submerged concretions along the edge of chamber 1; the diver is around -7 m.*



Photo 3: La salle 1 vue depuis le sud; la « Plage » et le point culminant. Cliché Luc Vanrell / Immadras, SRA PACA. *Chamber 1 as seen from the south; the "Beach" and the highest point.*

Figure 3: Plan de la partie aérienne de la grotte Cosquer; en bleu clair, les surfaces d'eau libre (levés et DAO : Y. Billaud / Drassm).
Map of the unwatered part of the Cosquer cave; in light blue, open water surfaces.



et *al.*, 1992a] et amène la préfecture maritime à prendre, à titre conservatoire, un arrêté interdisant tous travaux sous-marins dans un rayon de 1000 m autour du cap Morgiou. En 1992, une première campagne de relevés est effectuée, toujours sous la direction de Jean Courtin [Clottes et Courtin, 1994] et sous le contrôle administratif et la participation du Département des Recherches Archéologiques Sous-Marines (DRASM). La même année, la grotte est classée au titre des Monuments historiques. En 1994, au cours de la deuxième campagne, un scanner Soisic est mis en œuvre grâce à la collaboration de la fondation EDF avec l'appui de la société SETP, et un relevé photogrammétrique est réalisé sous la direction de la mairie de Marseille. Cette campagne est marquée par une surfréquentation de la grotte et l'abandon sur place de divers équipements.

Les années suivantes sont consacrées, sous la responsabilité de Luc Vanrell, à la mise en sécurité du site, au nettoyage des équipements abandonnés par les missions précédentes et au suivi des instruments de mesure.

À partir de 2000, la cavité passe sous le contrôle du Service régional de l'archéologie de Provence-Alpes-Côte d'Azur. En 2001, l'arrêté de la préfecture maritime est complété par l'interdiction d'accès à la grotte et par celle de toute plongée dans un rayon de 200 m autour de la pointe de la voile (rayon porté en 2013 à 300 m, figure 1). De 2001 à 2005,

au cours d'opérations programmées sous la responsabilité de Luc Vanrell, un relevé topographique plus conforme à la réalité est obtenu. L'inventaire des figurations est quant à lui poursuivi avec la participation de Jean Clottes et de Jean Courtin en 2002 et 2003 [Clottes et *al.*, 2005].

Suite à la mise en évidence de l'impact dans la cavité d'événements climatiques et sismiques importants, une surveillance systématique est conduite. Depuis 2010, des campagnes sont menées

pour documenter au mieux la grotte : révision et poursuite de l'inventaire avec topographie, positionnement, acquisition 3D et couverture photographique. Elles se déroulent toujours sous la responsabilité de Luc Vanrell associé à Michel Olive du service régional de l'archéologie PACA, avec la collaboration de Bertrand Chazaly, ingénieur topographe ainsi que d'Yves Billaud, archéologue au DRASSM, et grâce à la participation de plusieurs techniciens bénévoles.

C. Figurations et chronologie

Une particularité de la grotte Cosquer est la grande densité de traces laissées sur les parois, non seulement des figurations (peintures et gravures), des signes (très nombreux et plus ou moins complexes), mais aussi des « tracés digitaux » et des zones de prélèvement de mondmilch. Il faut également mentionner la présence en divers points de la grotte de traces d'éclairage, de foyers avec de nombreux charbons ainsi que la cassure volontaire de concrétions.

Fin 2013, 507 entités graphiques étaient répertoriées (dans la seule partie préservée de la grotte) dont 188 animaux, 71 mains et 224 signes géométriques. La faune représentée est variée, on peut distinguer dans le corpus douze espèces animales différentes : chevaux, bouquetins, bisons, aurochs, cerfs, phoques, chamois, poissons, pingouins, mégacéros, saïga, félin et humains. La plupart des



Photo 4 : Infrastructures de surface durant la campagne de 1994 avec, au mouillage devant l'entrée de la cavité, l'Archéonaute, navire du Drassm, et, sur le sommet de la falaise, la mise en place d'un abri pour l'équipement devant relayer les données récoltées par une station de mesure installée dans la grotte. Cliché © MCC-DRAC/SRA PACA - G. Sauzade. Surface infrastructure during the 1994 campaign, anchored in front of the entrance to the chamber, the DRASSM's ship, the Archéonaute, and, at top of the cliff, the building of a shelter for the equipment to relay the data gathered by a measuring station set in the cave.

panneaux présentent des superpositions complexes.

À partir de l'étude des conventions stylistiques et d'une première série de douze datations par le radiocarbone, deux phases de fréquentation de la cavité ont été initialement proposées : une première, « aurignaco-gravettienne », entre 27 500 et 26 500 BP, concernant les tracés digitaux et les mains négatives, sans figuration animale, et ensuite une seconde phase « solutréenne », entre 18 500 et 17 500 BP, avec les représentations animales peintes et gravées, rapprochée du Style III d'A. Leroi-Gourhan [Clottes et al. 1992 b; Clottes et Courtin, 1994]. La poursuite des relevés et la réalisation de nouvelles datations (27 au total à la fin de 1998), ont permis de réviser cette première proposition, des animaux apparaissant dans la phase ancienne et certaines dates débordant des phases initialement proposées [Clottes et al., 2005]. Depuis, de nouvelles observations nous amènent à envisager une fréquentation continue de la grotte par les hommes du Paléolithique et cela éventuellement sur une durée de temps plus étendue que celle initialement proposée. Une nouvelle série de prélèvements, actuellement en cours d'étude, devrait permettre d'affiner le cadre chronologique absolu.

II. Les premières acquisitions 3D

Dès les premières investigations des années 1990, face aux problèmes d'accès et dans l'optique d'un rendu au public, il a été envisagé de réaliser un fac-similé de la cavité. Dans ce but, une campagne de relevé photogrammétrique a été programmée très tôt. Devant les difficultés pour réaliser un relevé 3D de la totalité de la cavité dans les délais impartis (une dizaine de jours), il a été décidé de procéder d'une part à une opération par *laser scanning* dans les zones les plus accessibles ainsi que dans les parties peintes et, d'autre part, à un relevé par photogrammétrie dans les zones les plus complexes.

Ce travail, réalisé durant la campagne de 1994, a mobilisé un important matériel. Il a de plus amené la circulation de nombreuses personnes dans la grotte avec les conséquences que l'on peut imaginer. Un point important est que, face à la contrainte de la plongée, il a été retenu de ne pas faire entrer dans la grotte les opérateurs habituels des appareils mais de faire manipuler ces der-

niers par des plongeurs après formation ou en communication avec la surface. La méconnaissance, par la plupart des intervenants, des démarches en grotte ornée s'est traduite par des pratiques pour le moins étonnantes dont les plus visibles sont, en plus des piétinements, le scellement au ciment prompt des cibles du canevas topographique et des marquages à la peinture sur des concrétions !

A. Photogrammétrie

Supervisé par la société SETP, le relevé photogrammétrique a nécessité le passage d'un matériel important : deux chambres et deux appareils photographiques, deux théodolites ainsi que les trépieds et les accessoires. La réalisation s'est avérée délicate, tant sur le terrain (présence de l'eau, manque de recul, etc.) qu'après chaque séance avec tout particulièrement le problème du développement des clichés « au fil de l'eau ».

Le relevé s'est appuyé sur un canevas de base d'une soixantaine de cibles, commun avec le levé du Soisic, complété par 464 points de calage. Malgré toutes les difficultés rencontrées, 1 115 photographies ont été prises. Leur traitement au stéréo-restituteur a permis de définir 3,7 millions de coordonnées tridimensionnelles [Blaustein, 1996].

B. Laser scanning Soisic

La mise en œuvre du Soisic a été possible grâce à une action de mécénat technologique et scientifique d'EDF. Le capteur Soisic utilise la triangulation pour les mesures de distance. Il a été initia-

lement développé par la société MENSI pour la préparation d'interventions de maintenance nucléaire. L'exploitation des données a été faite à l'aide du logiciel 3Dipsos permettant la fusion de nuages de points et le *texture mapping*.

La mise en œuvre a posé plusieurs problèmes techniques. Afin de franchir le siphon, un conteneur spécifique a dû être fabriqué pour cet appareil volumineux (1 m de long pour un diamètre de 20 cm). Pesant et encombrant, il s'est avéré difficile à déplacer. D'autre part, le choix de piloter le Soisic depuis la surface a obligé en premier lieu à dérouler un ombilical de 300 m pour l'alimentation, les liaisons numériques et la vidéo, ainsi que pour la communication entre l'opérateur et le manipulateur sur le site. Il a de plus été nécessaire d'installer une base terrestre (photo 4). Cette infrastructure lourde a eu l'avantage de pouvoir faire fonctionner le scanner, une fois celui-ci positionné, après ou avant la présence des plongeurs.

Malgré de nombreuses difficultés (interruptions en raison des conditions météorologiques, pannes de liaison audio, etc.), le capteur a fonctionné pendant 67 h pour 28 stations et a relevé 4,7 millions de points (photo 5). Ces données ont été complétées par 128 images couleur. Mais la couverture complète de la cavité n'a pas pu être réalisée par manque de temps [Paramythioti, 1996]. Pour les parties couvertes, la maille moyenne de la couverture est de 2,5 cm avec pour certaines surfaces des scans beaucoup plus fins descendant jusqu'à une maille millimétrique.



Photo 5 : Le scanner Soisic en station dans la salle 2. Cliché Ministère de la Culture / EdF.
Soisic scanner on station in chamber 2.

Photo 6 :
Maillage du
nuage de points
de la draperie
du puits avec
superposition de
la photographie
en transparence
(document EdF).
*Points cloud of
the drapery of
the pitch with
the superimposed
photo visible by
transparency.*



Une fois le maillage obtenu, il a été texturé par projection des images couleur (photo 6). Dans une étape ultérieure, les résultats de la photogrammétrie ont été incorporés dans la base de données laser. Plusieurs images de synthèse ont été obtenues, présentant notamment la zone du grand puits en plan large, avec l'ajout d'effet d'ombres et de reflets d'eau. Cinq minutes de film ont été calculées et ont pu être présentées au public [Thibault, 2001].

C. Une masse de données sous-exploitée

Plusieurs rapports techniques rendent compte du travail réalisé en 1994. Celui-ci était extrêmement novateur : première saisie laser 3D dans une grotte ornée, première mise en corrélation avec des photographies couleurs, première visite virtuelle à destination du public. Mais, pour des raisons qu'il est difficile d'identifier vingt ans après, la démarche engagée n'a pas été poursuivie jusqu'à son terme. À ce jour, si les données numériques sont archivées, certaines données de terrain sont à retrouver.

Un exemple particulier illustre cette sous-exploitation des données. La représentation des salles [Clottes et Courtin 1994, fig. 25], qui s'apparente au premier croquis d'exploration [Clottes et al. 1992a, fig. 1], n'a pas été remplacée par le plan qu'auraient pu fournir les

nouveaux relevés, et continuera d'être utilisée pendant plusieurs années.

III. Contexte des interventions récentes

A. Difficultés d'accès et lourdeur de mise en œuvre

Les interventions dans la grotte relèvent d'une triple tutelle administrative : Service régional de l'archéologie (SRA PACA) pour la partie scientifique, Centre de recherche sur les monuments historiques (CRMH) pour les aspects de conservation du site, DRASSM pour l'accès par le domaine public maritime.

Sur le plan opérationnel, il s'avère qu'afin de protéger le milieu, le nombre maximum de personnes fréquentant la grotte ne doit pas excéder journalièrement cinq individus pendant au plus cinq heures. Les déplacements dans le site nécessitent une attention de chaque instant en raison d'un sol accidenté et pour partie immergé, tout en évitant tout contact avec les parois, d'autant que celles-ci sont particulièrement vulnérables sur de vastes surfaces recouvertes de mondmilch ou d'argile.

Tant avant le départ en mer qu'une fois de retour au port, il faut ajouter à la gestion habituelle du matériel de relevé et de photographie, celle du matériel de plongée (rinçage, gonflage...), la maintenance des embarcations et le conditionnement en containers étanches.

Le trajet du port au point d'immersion demande 45 mn de navigation et jusqu'au double par mer formée. Au total, c'est un minimum de cinq heures qui vient s'ajouter au temps passé dans la grotte. Il est évident que sans un engagement, un volontarisme et une cohésion de l'équipe d'intervention de telles journées de travail, très éprouvantes sur le plan physique ne pourraient être accomplies sur la durée d'une campagne.

B. Une cavité partiellement dégradée et en péril

Les visites avant la déclaration, la surfréquentation et les comportements inadaptés pendant les premières campagnes mais aussi plusieurs intrusions clandestines ont occasionné des dégâts qui ont principalement touché les sols. On peut considérer que leur état de dégradation enlève toute pertinence à l'étude des traces anthropiques.

Actuellement, la cavité est soumise directement à plusieurs menaces naturelles ou humaines : submersion, sismicité et pollution. Ainsi, la remontée du niveau marin, qui a condamné l'accès à la grotte il y a près de 10 000 ans, a fait disparaître nombre de traces anthropiques et de figurations dans les parties actuellement immergées, les plus vastes de la grotte (il ne reste actuellement hors d'eau qu'un cinquième des surfaces pouvant avoir été ornées). Après une période relativement stable, cette élévation du niveau marin a repris au XIX^e siècle et s'est accélérée à la fin du XX^e siècle. Plus ou moins importante selon les différents modèles prédictifs, elle implique, certes à moyen terme mais de façon inéluctable, la perte irrémédiable et rapide de nombreuses zones de ce patrimoine exceptionnel.

Toutefois un mécanisme particulier s'oppose à l'ennoyage des parties décorées proches du niveau de l'eau : la grotte se trouve en effet en surpression atmosphérique. Ce phénomène abaisse le niveau de l'eau d'une cinquantaine de centimètres en moyenne. Cette situation est dépendante d'injections d'air dans la grotte lors de certaines houles à travers des conduits noyés impénétrables à l'homme [Malaurent et al., 2002]. Les pertes sont pour leur part limitées, montrant le peu de communication des parties exondées avec l'extérieur. Mais les observations récentes montrent que cette situation est loin d'être stable et que les fortes remontées du niveau dans la grotte, véritables phases de crues, se multiplient, probablement



Photo 7: Ennoiment partiel du spéleothème portant le cheval CHV017, illustrant les variations du plan d'eau.
Cliché Luc Vanrell / Immadras, SRA PACA.
Partial flooding of speleothems displaying the CHV017 horse, illustrating the variations of the body of water.



Photo 8: Balise électromagnétique de la société Valade Minage en station dans la salle 2, à proximité du passage vers la salle 1.
Cliché Luc Vanrell / Immadras, SRA PACA.
Electromagnetic beacon of Valade Mining society on station in chamber 2, near the "porthole", passage to chamber 1.

en liaison avec la modification du climat général, de l'aéologie locale et du régime des houles (photo 7).

D'autre part, l'ouverture de communications avec l'extérieur, loin d'être improbable dans ce secteur fortement fracturé et dans une ambiance sismique régionale active, entraînerait une remontée rapide du niveau et la disparition, à court terme, de nombreuses figurations dont, par exemple, une partie du panneau des Chevaux.

La forte sismicité de la région PACA, avec chaque année plusieurs événements d'une magnitude généralement inférieure à 4, a des effets directs sur la cavité. Ainsi des bris et des chutes de concrétions ont été constatés dans la grotte en 2011, peu après un séisme d'une magnitude de 5 dont l'épicentre était situé au large de la Corse.

IV. Travaux récents et en cours

A. Topographie d'ensemble et positionnement

Ainsi que cela a été indiqué, à l'issue des premières campagnes, seuls un plan et une coupe du type « croquis d'exploration » étaient disponibles. Ce

n'est qu'à partir de 2001 qu'un relevé global de la cavité a été réalisé avec des méthodes classiquement employées en spéléologie (cheminements à l'aide de distance-mètre, boussole et clinomètre pour les parties exondées, décamètre, compas et profondimètre dans les parties noyées). Bien que de précision réduite par rapport à des levés topographiques, il permettait de disposer d'un support pour la planification des interventions et la localisation des œuvres. D'autre part, la position de la cavité dans le massif pouvait être approchée de façon satisfaisante.

Par la suite, ce levé a été affiné par l'utilisation d'un appareil électronique compact, le Disto X (<http://paperless.bheeb.ch/>) donnant orientation et inclinaison avec une précision de l'ordre de 0,2°. Il a alors été possible d'intégrer le réseau de cibles de 1994 ainsi que les cibles récentes (cf. *infra*).

Afin de pouvoir disposer d'un rattachement des levés au réseau topographique national, une opération de positionnement vertical par balises électromagnétiques¹ a été menée en 2011, en partenariat avec la société Valade Minage (photo 8). Huit points (dont deux sur des cibles nouvelles) ont été précisément

localisés avec pour trois d'entre eux la profondeur. Un premier relevé avec un GPS de précision métrique a montré la cohérence de l'ensemble et a confirmé la première proposition de positionnement de la cavité dans le massif. Le positionnement précis des points reste à faire.

B. Acquisition 3D centimétrique

En 2011, à la demande de la DRAC PACA, un groupement est formé pour mettre en œuvre la numérisation de la grotte. Il est constitué par Bertrand Chazaly et David Lhomme de la société ATM 3D, Didier Happe et Lazare Grenier de la société Art Graphique et Patrimoine, Luc Vanrell et Philippe Le Meliner de la société Immadras leader du groupement. Un nouveau réseau local a été mis en place dans les deux salles (B. Chazaly, société ATM 3D). Il est constitué de 61 cibles carrées en matériau inerte et portant un numéro gravé. Chacune de ces cibles est simplement posée, à un endroit jugé stable, vierge de toute gravure ou peinture, autant que possible à l'abri des passages mais tout en permettant une bonne visibilité. Les cibles sont de deux modèles. Trente-neuf cibles jaunes et noires, ont des dimensions suffisantes

1. Précision du positionnement axial : < 0.7%, précision de la verticalité : < 0.1°, précision de la profondeur : < 1.5%.



Photo 9 : Exemple de cibles constituant le nouveau réseau sur lequel s'appuie l'acquisition 3D; en haut une cible de 10 cm de côté, au-dessous une cible centimétrique. Cliché Y. Billaud / MCC Drassm.
Example of targets forming the new network that underpins the 3D capture; at the top a 10cm-square target, below centimeter target.

(360° horizontal pour 320° vertical), très rapide (120 000 points/s) et pouvant numériser sans ordinateur. Depuis, l'évolution de la technologie permet de disposer d'appareils encore plus performants.

En 2011, vingt-huit stations dans la salle 1 ont permis l'acquisition de la volumétrie générale. Pour chaque station, une image 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. Le recalage des nuages s'est appuyé sur les cibles de 10 cm visibles dans l'image 3D. Si besoin est, un affinage du calage par corrélation géométrique (best-fit) est possible pour permettre la consolidation des nuages entre eux. La précision globale du nuage est de l'ordre de ± 5 mm. Si cette première série de levés a permis d'appréhender la volumétrie générale de la salle 1 (photo 10), elle n'en constitue pas un enregistrement 3D complet. Les positions de scanner devront être multipliées pour réduire au maximum les zones d'ombre et assurer une densité exhaustive.

En 2013, la suite du relevé 3D centimétrique a concerné la salle 2 (intervention bénévole de B. Chazaly avec le matériel – FARO Photon 120 – mis gracieusement à disposition par la société Fugro). Au total, 44 positions du scanner, soit une tous les 2 à 3 m, ont été

nécessaires. Pour des parties au plafond bas, le scanner a été placé à même le sol. Au niveau du puits noyé, le scanner a été installé sur trépied au plus près de l'eau et aussi loin que la topographie des lieux le permettait.

C. Relevé infra-millimétrique par photogrammétrie

Afin d'obtenir un niveau de détail suffisant pour assurer l'enregistrement des reliefs d'origine anthropique, un scanner inframillimétrique Nooméo Optinum a été mis en œuvre (photo 11). C'est un capteur passif (sans émission de signaux laser ou autre) qui utilise la corrélation d'images comme méthode de calcul de la 3D. Il est équipé de deux caméras CCD calibrées et convergentes et de diodes lumineuses. L'optique centrale projette deux points laser destinés seulement à régler la distance de mesure.

Pendant une séquence de mesure, l'appareil va répéter quatre fois par seconde l'enregistrement d'un couple de prises de vues stéréoscopiques. La cadence de prise de vue et une vitesse relativement lente de balayage de la scène par l'opérateur permettent un fort recouvrement entre les images et donc une bonne corrélation entre les différents couples stéréoscopiques.

Cet appareillage présente plusieurs avantages : portabilité et encombrement réduit, mise en œuvre facile (tenu à la main), numérisation sans contact, pas de cibles nécessaires, densité et précision de l'ordre de 0,3 à 0,5 mm. En revanche, plusieurs inconvénients sont à noter : calage relatif (une dérive peut être observée pour des bandes trop longues, supérieures à 1 m), absence de géoréférencement, corrélation seulement sur les points facilement distinguables (difficultés de numérisation de surfaces très sombres et très mates), nécessité d'un ordinateur portable, génération de gros volumes de données (jusqu'à 10 Go pour 2 à 3 m²).

D. Couverture photographique à haute résolution

Afin d'apporter l'information de la couleur en complément de celle du relief, avec une résolution au moins aussi fine que celle de la numérisation inframillimétrique, le panneau des Chevaux et celui des Méduses ont fait l'objet d'une couverture en prise de vue numérique. Les photographies ont été prises sur trépied, à 2 m de la paroi. La résolution

(10 cm de côté) pour être visibles dans les images acquises par le scanner. Vingt-deux sont blanches et noires, de 1 cm de côté ; elles sont destinées à densifier et à consolider le réseau (photo 9).

Les mesures ont été réalisées à l'aide d'une station totale Leica TPS 802 PinPoint (précision angulaire : 2", précision du distance-mètre : 2 mm + 2ppm). Le principe retenu est le relèvement. 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.

Un scanner laser 3D FARO Photon 120 a été mis en œuvre pour une acquisition 3D centimétrique. Ce matériel présentait alors les avantages d'être léger et peu encombrant (14 kg), sphérique

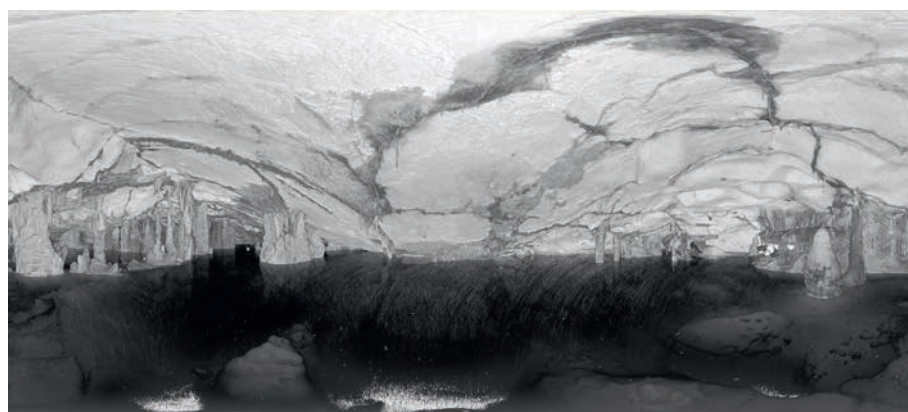


Photo 10 : Extrait d'image panoramique, sur près de 360°, obtenue avec le scanner Faro; angle sud-ouest de la salle 1 avec le panneau des Chevaux à droite sur l'image (levés B. Chazaly / ATM3D).
An extract of panoramic imaging, over nearly 360°, obtained with the Faro scanner; southwest corner of the room 1 with the panel of horses right on the image.

est de l'ordre de 0,1 mm. Plusieurs clichés ont été enregistrés par position, avec des éclairages différents. Le recouvrement entre les prises de vues est de l'ordre de 30 à 50 %.

L'appareil et son optique (Canon EOS 5D Mark II, 21 millions de pixels, objectif 50 mm) ont été calibrés à l'issue de la mission.

Une fois orthorectifié, le panneau des Chevaux a été texturé à l'aide de prises de vue à haute résolution. L'orthophotographie a été générée par assemblage d'une mosaïque de 8 images orthorectifiées à la résolution de 0,15 mm. Elle fait 150 millions de pixels (16 000 x 9 333). La précision de calage est de 1,5 à 2 pixels, soit $\pm 0,3$ mm (photos 12 et 13).

Les données 3D ainsi traitées et mises en forme ouvrent la voie à des analyses des panneaux impossibles à réaliser sur le terrain : les parois, très fragiles ne peuvent être touchées au risque de les dégrader.

En laboratoire, l'observation de la section d'un trait de gravure permet de proposer des interprétations (chronologie relative des dessins se superposant, observation des traces réalisées avec un silex ou une concrétion cassée). La forme de l'empreinte étant unique, il est ainsi possible d'associer les gravures selon le geste et l'outil utilisé et ainsi d'éviter certaines erreurs d'interprétation sur les panneaux surchargés.



Photo 11 : Acquisition inframillimétrique du panneau des chevaux à l'aide d'un scanner Noomeo Optimum. Cliché Luc Vanrell / Immadras, SRA PACA. *Sub-millimeter capture of the panel with the horses using a Noomeo Optimum scanner.*

E. Acquisition d'images pour la restitution au public

Bien qu'il ne s'agisse pas à proprement parler d'acquisition 3D, il paraît intéressant de mentionner ici une approche destinée à restituer la cavité au grand public tout en donnant une impression de la troisième dimension.

- **projection panoramique** : À l'occasion des missions réalisées dans la grotte, des prises de vues particulières ont été réalisées dans le but d'un essai de présentation au public en utilisant le système Panrama

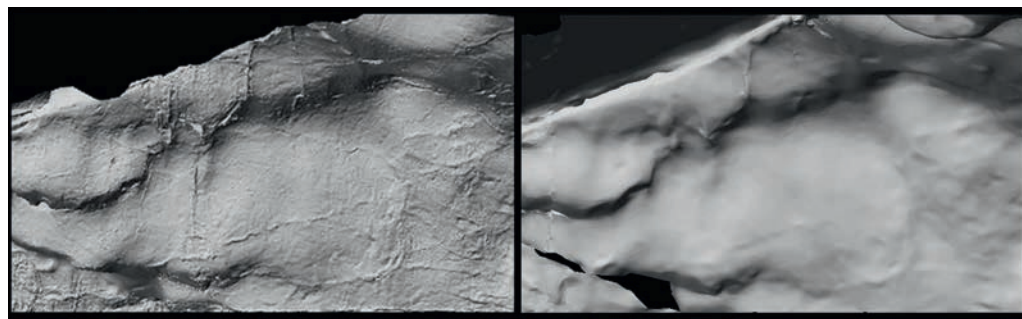


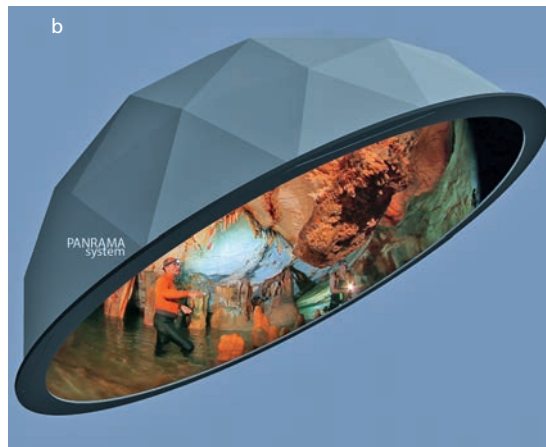
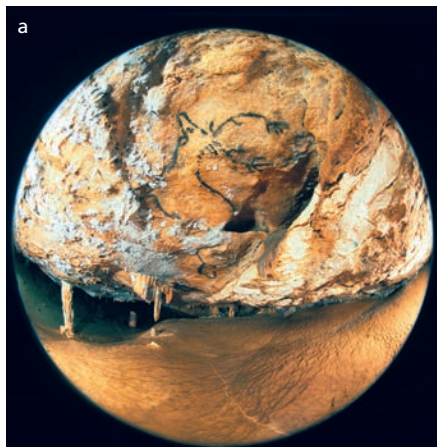
Photo 12 : Exemples de modèles du panneau des Chevaux ; largeur couverte 3,5 m. À gauche, modèle centimétrique dense (430 000 points pour 10 m²) dont la géométrie globale permet de recalibrer la numérisation inframillimétrique ; à droite, extrait du modèle plus léger, sans détails mais restituant l'environnement global du panneau (levés B. Chazaly / ATM 3D).

Examples of models of the panel with the horses, width covered of 3,5 m. On the left, dense centimeter (430,000 dots for 10 m²), the overall geometry allows to re-adjust the sub-millimeter scanning; on the right an extract of the lighter model, without details but showing the global environment of the panel.



Photo 13 : Orthophotographie du panneau des chevaux, largeur couverte 2,3 m ; détail du bouquetin BOQ010. Clichés M. Olive / SRA PACA, réalisation B. Chazaly / ATM 3D.

Orthophotography of the panel with the horses, width covered of 2,3 m; detail of the ibex BOQ010.



Photos 14 a et b: a) Photographie grand-angle destinée au système Panrama avec ici le grand cerf de la salle 1. Cliché M. Olive / SRA PACA. b) Illustration du principe de projection sur une coupole dans laquelle l'anamorphose disparaît et donne au spectateur une vision sur 180°. Clichés Jaulmes P. et Olive M. *Wide-angle photo meant for Panrama system here with the great stag of room 1 and illustration of the principle of projection on a dome in which the anamorphosis disappears and gives the viewer a 180-degree vision.*

(www.panrama.net). Les images, de type fish-eye, sont destinées à être projetées sur la paroi interne d'une coupole de façon à avoir une vision qui couvre un champ de 180° (photos 14).

En octobre 2013, une première présentation au Salon international de l'image sous-marine à Marseille a permis à plus de 300 personnes d'assister à la projection d'un document de six minutes. L'accueil a été très favorable, incitant à renouveler l'expérience.

F. Site internet

Afin de transmettre la connaissance à un plus large public, une présentation de la grotte par le biais d'un site internet est en cours d'élaboration. Toutes les données scientifiques y seront disponibles ainsi que des visites virtuelles des zones les plus intéressantes de la grotte.

Bilan et perspectives

Les premières campagnes d'acquisition 3D dans la grotte Cosquer ont permis de tester les matériels et les accessoires, leur acheminement, leur mise en œuvre. Des enseignements ont été tirés, sur les éclairages, l'alimentation électrique des appareils, la taille et l'ergonomie des

capteurs et des ordinateurs ainsi que la réaction de certains équipements au milieu marin (gonflement des trépieds de bois, oxydation des platines, réaction des métaux et des alliages). Ces campagnes ont mis en évidence la complexité de l'opération: manque de recul, parties immergées, géométrie complexe (en particulier avec les nombreuses concrétions); elles ont cependant répondu à nos attentes. Elles ont montré la possibilité d'exploiter finement les données une fois de retour au bureau tout en mettant en évidence la nécessité de bien anticiper les stratégies d'acquisition, en particulier par des modèles centimétriques denses permettant un bon calage des nuages inframillimétriques.

À l'échelle des parois dont la géométrie est simple, la photogrammétrie s'avère une solution performante et peu coûteuse pour sauvegarder au plus près du réel les artefacts graphiques. La manipulation des panneaux virtuels autorise en outre une véritable recherche délocalisée d'une efficacité impossible à obtenir sur le terrain. En effet, pouvoir observer sur écran un panneau orné de gravures permet, par exemple, de faire apparaître des profils en appliquant une

rotation de la vue et d'ainsi différencier des gravures en observant l'empreinte laissée par l'outil qui les a réalisées, voire de distinguer les gestes si le même outil a servi à deux exécutants.

Ces premiers résultats encourageants incitent à poursuivre l'acquisition de la géométrie globale de la cavité avec une précision centimétrique et d'entamer le relevé inframillimétrique systématique des panneaux ou spéléothèmes ornés. Le scanner mis en œuvre s'est avéré contraignant dans le contexte difficile de la grotte. La stéréophotogrammétrie par corrélation dense apparaît comme la solution la plus adaptée ainsi que l'ont montré les premiers essais avec un boîtier à capteur plein format.

Il reste maintenant à trouver des solutions à l'acquisition des volumes immergés, qu'ils soient en surface ou totalement noyés. Certains appareillages spécifiques ainsi que la stéréophotogrammétrie pourraient apporter des éléments de réponse.

Remerciements

À Guillaume Thibault (EDF R&D) pour les informations et les documents concernant les relevés au Soisic.

Bibliographie

BLANC J.-J., 1993 - Le paléokarst littoral de Provence (Estaque, Calanques et zone de Bandol). *Karstologia*, n° 22, p. 21-34.
BLAUSTEIN M., 1996 - Grotte Cosquer: restitution photogramétrique. *Revue XYZ*, n° 68, p. 17-20.
CLOTTES J., BELTRÁN A., COURTIN J. et COSQUER H., 1992a - La grotte Cosquer (cap Morgiou, Marseille). *Bulletin de la société préhistorique française*, t. 89, n° 4, p. 98-128.
CLOTTES J., COURTIN J., VALLADAS H., CACHIER H., MERCIER N. et ARNOLD M., 1992b - La grotte Cosquer datée. *Bulletin de la société préhistorique française*, t. 89, n° 8, p. 230-234.
CLOTTES J. et COURTIN J., 1994 - La grotte Cosquer: peintures et gravures de la caverne engloutie. Seuil, Paris, 200 p.

CLOTTES J., COURTIN J. et VANRELL L., 2005 - Cosquer redécouvert. Le Seuil, Paris, 256 p.
COLLINA-GIRARD J., 1996 - Préhistoire et karst littoral: la grotte Cosquer et les Calanques marseillaises (Bouches-du-Rhône, France). *Karstologia*, n° 27, p. 27-40.
COLLINA-GIRARD J. et MONTEAU R., 2010 - Les calanques de Marseille à Cassis. Dans: Audra P. (dir). *Grottes et karsts de France*, Karstologia Mémoires, n° 19, Association française de karstologie, p. 244-245.
COSQUER H., 1992 - La grotte Cosquer: plongée dans la préhistoire. Solar, Paris, 120 p.
LAMBECK K. and BARD E., 2000 - Sea-level change along the French Mediterranean coast for

the past 30000 years. *Earth and planetary science letters*, n° 175, p. 203-222.

MALAURENT P., VOUVÉ J., BRUNET J. et VANRELL L., 2002 - La Grotte Cosquer: une cavité sous pression. Dans *L'Art avant l'histoire: La conservation de l'art préhistorique*. 10^e Journées d'études de la Section française de l'Institut international de conservation, Paris, 23-24 mai 2002. Champs-sur-Marne, SFIC, p. 43-49.

PARAMYTHIOTI M., 1996 - Grotte Cosquer: relevé intérieur par le capteur soisic. *Revue XYZ*, n° 66, p. 24-27.

THIBAUT G., 2001 - Modélisation 3D de la grotte Cosquer par relevé laser. *INORA (International Newsletter On Rock Art)*, n° 28, p. 25-29.