



HAL
open science

La grotte Cosquer à Marseille outils et méthodes numériques pour un objet d'étude complexe et difficilement accessible

Loic Jeanson, Caroline Font, Priscilia Barbuti, Valentin Grimaud, Stéphane Renault, Sylvain Rassat, Cyril Montoya, Vincent Bayle

► To cite this version:

Loic Jeanson, Caroline Font, Priscilia Barbuti, Valentin Grimaud, Stéphane Renault, et al.. La grotte Cosquer à Marseille outils et méthodes numériques pour un objet d'étude complexe et difficilement accessible. JC3DSHS 2023, Les Journées du Consortium 3D SHS, Nov 2023, Lyon, France. hal-04479484v2

HAL Id: hal-04479484

<https://hal.science/hal-04479484v2>

Submitted on 7 Mar 2024 (v2), last revised 6 Jun 2024 (v3)

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial 4.0 International License

LA GROTTTE COSQUER À MARSEILLE : OUTILS ET MÉTHODES NUMÉRIQUES POUR UN OBJET D'ÉTUDE COMPLEXE ET DIFFICILEMENT ACCESSIBLE

Loïc Jeanson,¹ Caroline Font,^{2,3} Priscilia Barbut,⁴ Valentin Grimaud,² Stéphane Renauf²
Sylvain Rassat,⁵ Cyril Montoya,² Vincent Bayle²

¹Section des Sciences du Langage et de l'information, Faculté des lettres, Université de Lausanne

²LAMPEA (UMR 7269) - Université d'Aix-Marseille, CNRS

³Centre archéologique de Saint-Cyr-en-Val (Orléans), INRAP – Ministère de la Culture

⁴Centre National de Préhistoire, Ministère de la Culture et de la Communication

⁵HISCANT-MA (EA1132) – Université de Lorraine - Nancy

Mots-clés : archéologie - Jumeau numérique - cycle de vie de la donnée- 3D

Résumé : Découverte probablement au milieu des années 1980, la grotte Cosquer a été déclarée par son inventeur, Henri Cosquer, en septembre 1991. Son accès est aujourd'hui submergé en raison de la remontée du niveau marin depuis la fin du Pléistocène. Situé sur la commune de Marseille, le site a été classé au titre des Monuments historiques le 2 septembre 1992. Il s'agit d'un des sites majeurs à dispositifs pariétaux du Paléolithique supérieur européen en raison de la richesse, de la diversité et de l'originalité des manifestations graphiques pariétales. En l'état actuel des connaissances, le cadre chronologique des fréquentations humaines a été appréhendé par une quarantaine de datations radiocarbone. Ces mesures radiocarbone fournissent un premier cadre chronologique s'échelonnant sur près de 11 millénaires (entre 27 000 et 16 000 BP non cal.). Comme plusieurs grottes ornées du Paléolithique supérieur, la grotte Cosquer témoigne ainsi d'un palimpseste de comportements, de gestes artistiques, techniques, fruit des multiples sociétés humaines venues y laisser leurs traces.

L'exploration de la cavité a permis de décompter plusieurs centaines d'entités graphiques peintes et gravées, zoomorphes (chevaux, bouquetins, bisons et de cervidés) et anthropiques avec de nombreuses empreintes de mains. Si la représentation d'espèces marines reste minimale sur les parois de la cavité (env. 3% du total des entités), elle marque néanmoins une originalité de ce site dont le littoral se situait, au plus près, à environ 6 km de distance lors du dernier maximum glaciaire. Les données archéologiques des parois et des sols de la grotte Cosquer sont les seuls à ce jour qui permettent d'offrir le potentiel d'analyse pour une confrontation technique, iconographique et anthropologique des schèmes symboliques et des traditions techniques des sociétés humaines paléolithiques de l'Europe atlantique et méditerranéenne. Pour aider à la préparation des travaux et pour enregistrer et croiser les résultats des différents champs scientifiques réunis dans l'équipe scientifique Cosquer (archéologues, géomorphologues, hydrogéologie,...), nous combinons modèle 3D de la grotte et bases de données géospatiales d'enregistrement archéologique. Cette présentation est pour nous l'occasion de présenter les données, et les difficultés de numérisation, ainsi que certains logiciels et traitements que nous réalisons. Enfin, nous présenterons les limites que nous rencontrons et l'idée générale des prochaines étapes que nous cherchons à réaliser pour les dépasser. Cette étude a bénéficié du soutien et des discussions dans le cadre du travail de recherche pluridisciplinaire de l'équipe Grotte Cosquer dirigée par C. Montoya (PCR 2022-2023)

Localisée à moins de 10 kilomètres de Marseille, la grotte Cosquer a été officiellement déclarée par Henri Cosquer en septembre 1991. Son accès est complètement submergé depuis la fin du Pléistocène. Hormis une incertitude dans les années 80, on considère la grotte comme une capsule temporelle. Classé au titre des Monuments Historiques le 2 septembre 1992, ce site archéologique représente l'un des dispositifs pariétaux majeurs du Paléolithique supérieur européen en raison de la richesse, de la diversité et de l'originalité des expressions graphiques sur les parois (Clottes et al., 1993). À cela s'ajoute la conservation exceptionnelle d'une partie de ses traces d'occupation (foyers, niveau de sols, etc.). Néanmoins, le changement climatique (Sartoretto, 1995 ; Ollivier, 2006) qui connaît une grande accélération et les pollutions constatées sur le site résultant de la grande proximité de la 2^e ville la plus peuplée de France, menacent directement la conservation du site (Clottes et al., 1997). Le mandat de l'équipe est multiple. Conservatoire, d'abord, il s'agit de documenter et d'outiller pour comprendre le site et les périls actuels et futurs. Scientifique, ensuite, pour réaliser un relevé géo-archéologique des parois et des sols afin de comprendre la grotte dans son ensemble et d'en proposer une analyse scientifique la plus exhaustive possible pour en préserver la connaissance (Delannoy et al. 2020). Si l'accès immergé à la grotte a limité les échanges avec l'extérieur et nous offre aujourd'hui cette richesse scientifique, il constitue néanmoins un frein à son étude. C'est la raison pour laquelle l'équipe se dote de moyens et méthodes permettant la consultation numérique de la grotte. Nous proposons ici d'aborder différents aspects des moyens et méthodes envisagés. Cette présentation lyonnaise aborde, tout particulièrement, les différents aspects de ces moyens et méthodes déployés pour la grotte Cosquer

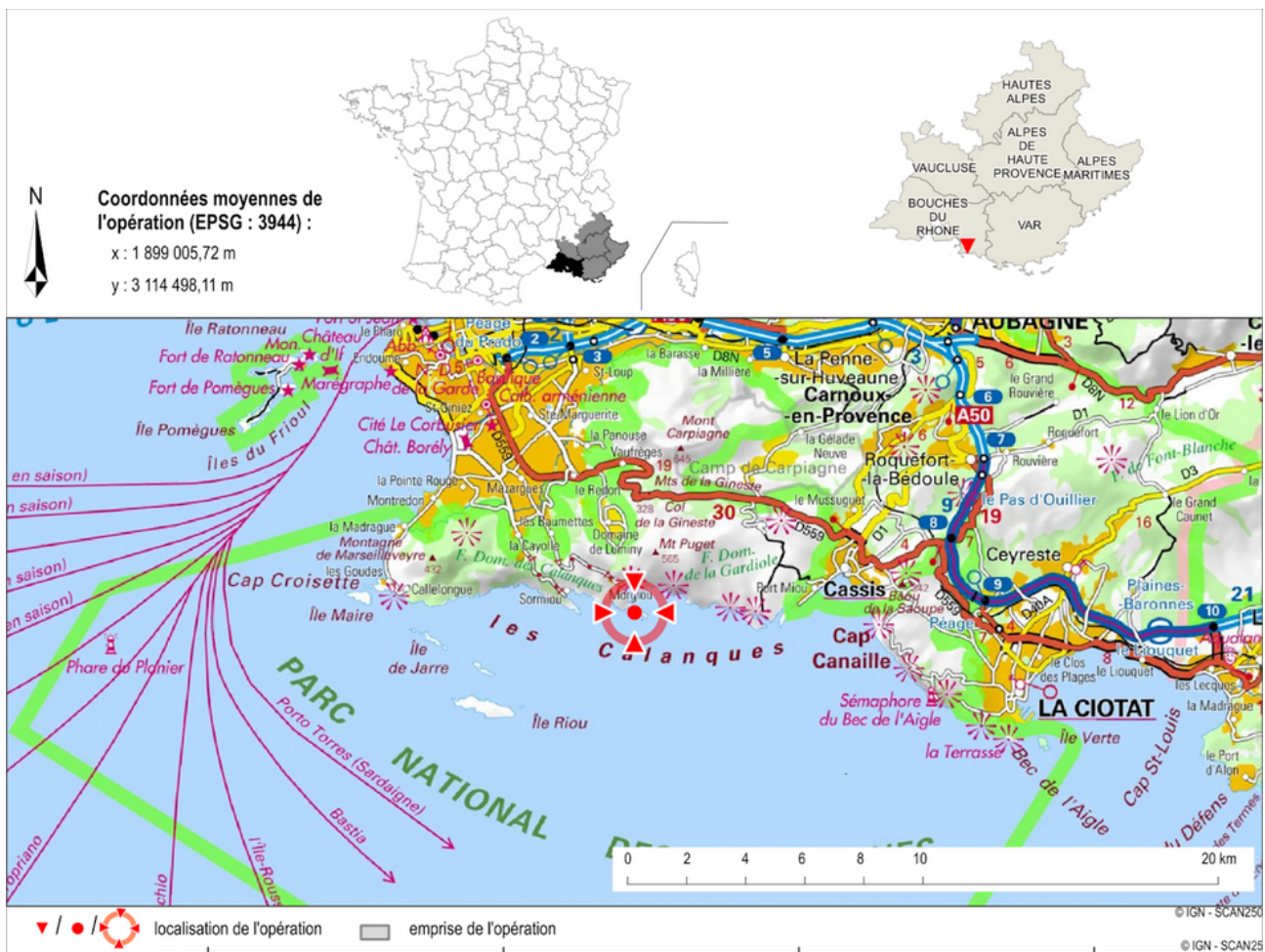


Fig. 1 - Localisation de l'opération archéologique Cosquer

1. L'ambition d'une base de données transversale

Le projet d'étude scientifique de la grotte Cosquer est ambitieux (Montoya et al., 2021) et les attentes sont grandes. Une partie de l'équipe se consacre aux problématiques de gestion de l'enregistrement des données issues de l'étude de la grotte Cosquer. La mise en place d'une base de données relationnelles et spatiales constitue l'un des enjeux majeurs du projet sur plusieurs aspects notamment conservatoire et analytique.

Cette base de données doit nous permettre de regrouper les données scientifiques et spatiales et de permettre aux équipes d'enrichir, de consulter, d'analyser les données à distance.

La base de données spatiales "Cosquer" est alimentée par des données scientifiques aux problématiques très variées (archéologique, socio-anthropologique, géomorphologique, karstologique, physico-chimique...) et par des données provenant de multiples sources pour la dimension spatiale. Les Systèmes d'Information Géographique (SIG) nous permettent de réunir ces descriptions et éléments euclidiens, mais dans le cas de la grotte Cosquer, la nécessité de mettre en œuvre ce SIG en trois dimensions ainsi que le volume et la complexité du matériel étudié en constitue la particularité. C'est ici que réside la tâche la plus ardue car il faut trouver un point de convergence entre les approches SIG et les données 3D.

Le système de gestion de base de données (SGBD) choisi s'appuie sur le puissant langage de requête SQL (Structured Query Language) offrant de nombreuses possibilités et qui répond en partie aux attendus pour la mise en place de la structure de la base de données, les relations entre tables, les requêtes et l'intégration de traitements automatisés (triggers ou déclencheurs). Il reste encore de nombreux écueils à contourner, pour fédérer l'équipe autour d'un outil efficace et facile d'utilisation. Nous avons opté pour une architecture client/serveur articulée autour du système de gestion de base de données PostgreSQL.

Côté client, des interfaces de saisies, de consultations et d'éditations efficaces sont disponibles dans le logiciel QGIS pour la 2D. La consultation des données scientifiques et spatiales en 3D est pour le moment envisagée sur une plate-forme web développée pour le projet, mais d'autres solutions ne sont pas exclues, nous sommes encore loin d'une réponse robuste.

2. Sources de données 3D

L'équipe scientifique dispose d'un corpus de données tridimensionnelles conséquent, composé de captation photogrammétriques et lasergrammétriques réalisées par des prestataires mandatés par la DRAC/ministère de la Culture à différentes étapes d'étude de la grotte. La grotte a été numérisée en lasergrammétrie (à hauteur d'environ 60% du volume exondé) pour livrer un premier relevé de la géométrie de la cavité. Les données mises à dispositions ne répondaient pas peu ou prou aux besoins des hydrologues, karstologues et surtout des archéologues.

Bien que cette opération d'acquisition ait été réalisée dans des conditions matérielles compliquées (air saturé en humidité, nombreuses zones inondées, accès contraint, obstacles, fragilité des spéléothèmes, etc.), la couverture du scanner a été effectuée de manière optimale avec, par exemple, un soin tout particulier face à la gestion des masques de lever quasi-inexistants au sein des 334 stations.

L'absence étonnante de minutes de terrain et de rapport d'assemblage global, entre autre, a rendu indispensable l'exécution par l'équipe d'un ré-assemblage (Lachat, 2019) consolidé (validé par deux approches méthodologiques distinctes) complet des 334 stations de laser terrestre à partir des mesures brutes livrées. Parallèlement à l'obtention de ces nouveaux ensembles géométriques cohérents, le géoréférencement des vestiges a, lui aussi, été complètement recalculé. Cette reprise en main exhaustive des mesures lasergrammétriques a donc permis l'obtention d'une précision (absolue et relative) moyenne quadratique de 8 millimètres (planimétrie Lambert 93 CC44, altimétrie IGN 69). Cependant, quelques stations restent inexploitées (10) à cause de défauts de capteurs lors de l'enregistrement. Ce nuage de points ré-assemblé constitue, désormais, notre référentiel spatial pour la totalité de l'enveloppe intérieure du site archéologique (sols, parois et plafonds).

3. Reconstruction à partir des données 3D

La reconstruction globale du site à partir des levés lasergrammétriques permet de disposer d'un modèle destiné à la visualisation (Seng , 2022 ; Fuentes et al., 2019).

Avant d'en arriver au processus sur lequel nous sommes aujourd'hui arrêté, plusieurs tests ont été réalisés. En premier lieu, celui de la segmentation selon des géométries cohérentes sur les seules stations présentant la meilleure densité de points s'est révélée infructueuse en raison de la complémentarité et de la superposition de l'ensemble des nuages.

De même, la reconstruction individuelle de chaque station complète n'offrait pas un résultat visuellement satisfaisant en raison d'une trop grande disparité de textures. Il a donc été décidé de fusionner l'ensemble des stations après avoir les avoir filtrées au-delà d'un seuil de distance à 5m du capteur.

Les tests avec un nettoyage plus agressif ne permettaient que des reconstructions partielles. Une fois les stations assemblées, le nuage de points global a été découpé en larges secteurs. Chacun de ces secteurs a été nettoyé des surfaces de réflexions et du bruit ambiant (du principalement à l'humidité dans l'atmosphère de la cavité) puis débruité avant d'être maillé. Ce modèle maillé a ensuite été nettoyé afin de supprimer les artefacts visibles.

Ce process a été pour l'heure appliqué au secteur 101 de la grotte. Il permet d'obtenir une reconstruction correcte, dans laquelle les volumes et une bonne partie des détails sont lisibles. On note cependant encore quelques problèmes : certains liés à des questions d'orientation de normales, d'autres imposés par la nature même du nuage (géométries complexes à l'origine de trous, aberrations chromatiques entre stations éclairées très inégalement, quelques décalages entre les stations).

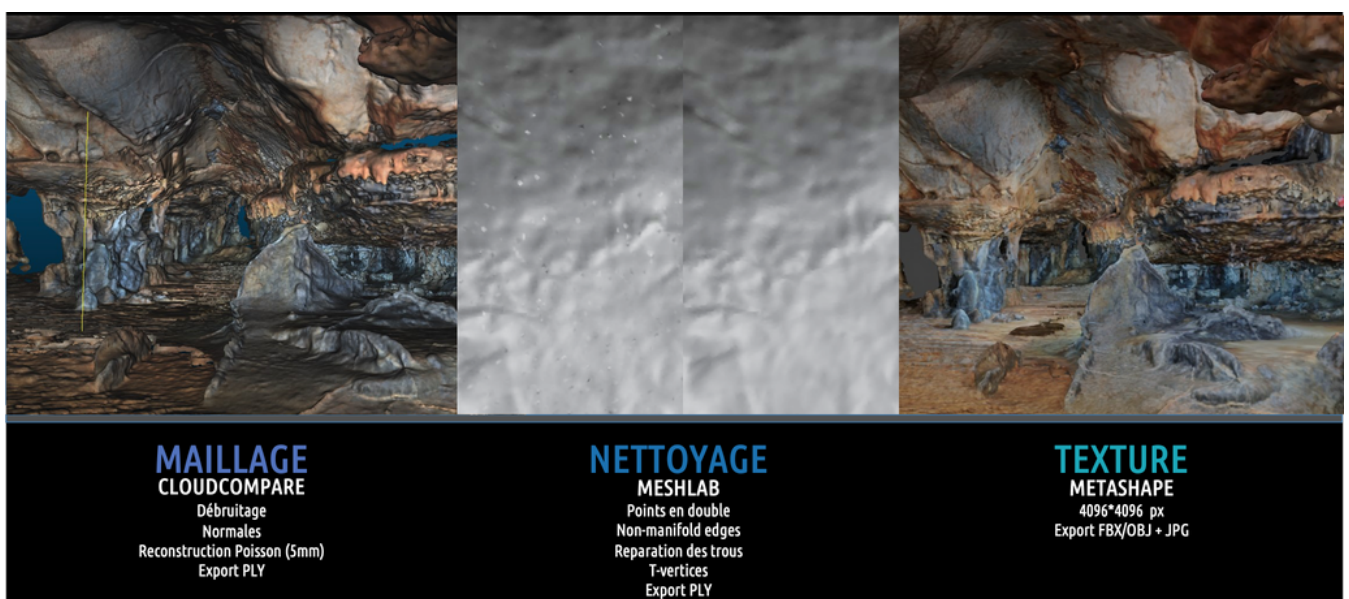


Fig. 2 - Processus de reconstruction à partir des nuages lasergrammétriques

Nous avons utilisé Cloud Compare (CC) pour ces reconstructions, et avons obtenu de bons résultats.

CC tire son épingle du jeu dans le cadre d'un comparatif réalisé à l'échelle d'un panneau (vs. Metashape, Meshlab / qualité du maillage et temps de reconstruction). Mais il comporte des limites et la chaîne opératoire s'avère chronophage.

D'autres essais sont donc en cours, notamment avec le logiciel RealityCapture qui propose une approche grandement simplifiée pour des résultats encourageants. Il n'est pas exclu que le process présenté précédemment évolue.

4. Produire des images en 2D

Si, pour visualiser la grotte complète, il peut être utile de produire un modèle plus léger au coût de quelques imprécisions, l'étude détaillée des gravures et des phénomènes des parois nécessite au contraire une définition et une précision optimales.

Les maillages haute résolution produits automatiquement et issus de la lasergrammétrie, ne suffisent cependant pas à une telle approche.

Nous préférons pour cela les modèles photogrammétriques (Maestrucci et al., 2008), que nous avons traités avec les outils financés par le consortium 3DSHS il y a 3 ans : le plugin PETRA (Grimaud et al., 2019) pour Blender, réalisé et coordonné par Valentin Grimaud, et le plugin ICEO, intégralement créé par Valentin Grimaud.

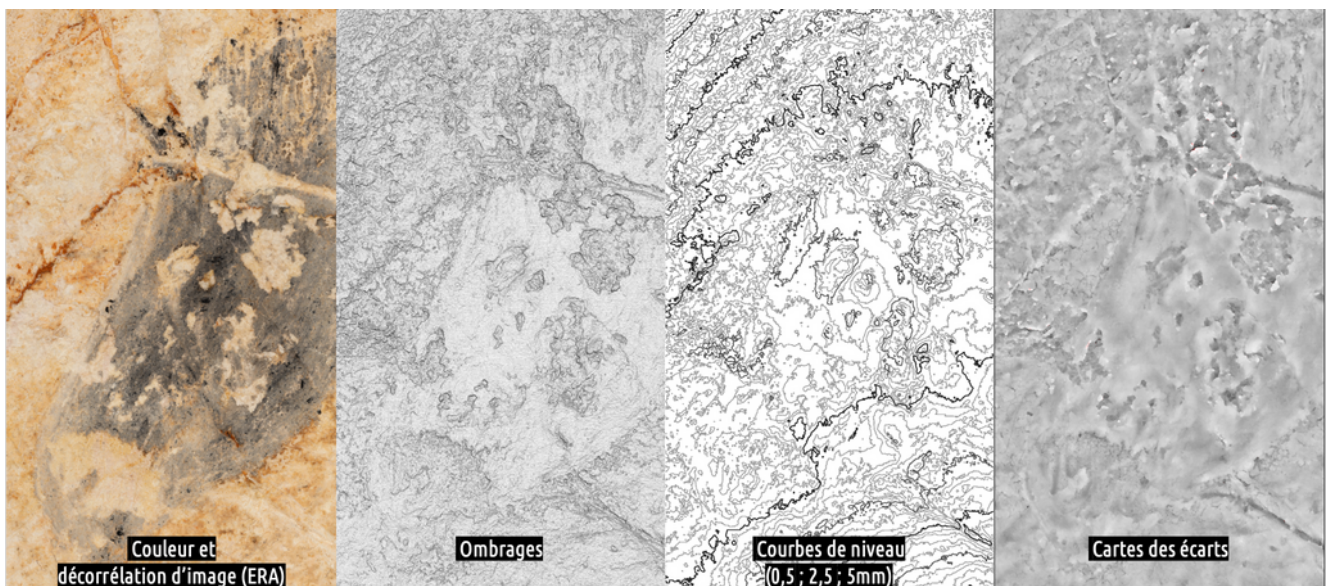


Fig. 3 - Différentes images produites par les plugin PETRA et ICEO

Ces deux plug-ins automatisent une partie des travaux nécessaires à la production d'images 2D à partir des modèles 3D. Le parti pris est celui de la simplification.

Nous voulons réduire le modèle 3D à des images 2D en suivant les normes de représentation architecturale (plans, coupes, élévations...), en générant autant d'image que de couches d'information utiles.

Le plugin PETRA permet de définir précisément les échelles de documentation et la résolution spatiale, information très importante pour savoir ce qui peut être observé ou non. Les niveaux de précision peuvent être atteints seulement si le modèle 3D initial possède cette résolution.

Nous produisons des images présentant la couleur, l'ombrage (une des déclinaisons de la normal map pour mieux visualiser qualitativement les reliefs), des courbes de niveau, mais également des cartes des écarts entre différents modèles à des résolutions différentes. Cette dernière image met en avant les micro-reliefs.

La carte couleur peut être déclinée grâce aux méthodes de décorrélation d'image (Le Quellec, 2013 ; Duquesnoy, 2015) réduisant l'autocorrélation des signaux. Pour cela nous utilisons ERA, logiciel open source et gratuit, développé par l'équipe de Fabrice Monna de l'université de Bourgogne. Il permet des réglages nombreux, et des outils de sélections permettent de définir les zones d'intérêts et d'en exclure pour accéder à une sélection « intelligente ». C'est donc une détection semi-automatique des zones peintes qui laisse place à toute l'expertise du chercheur qui étudie la paroi.

La carte des écarts peut être convertie en normal map pour être ré-éclairée virtuellement. C'est une automatisation de la première étape de travail du protocole ICEO, imaginée dès le début des années 2000 par Serge Cassen pour étudier les surfaces ornées sur les architectures monumentales du Néolithique armoricain. Là encore, la première étape la plus chronophage a pu être automatisée, le chercheur qualifié ayant ensuite tous les outils en main pour mener son étude.

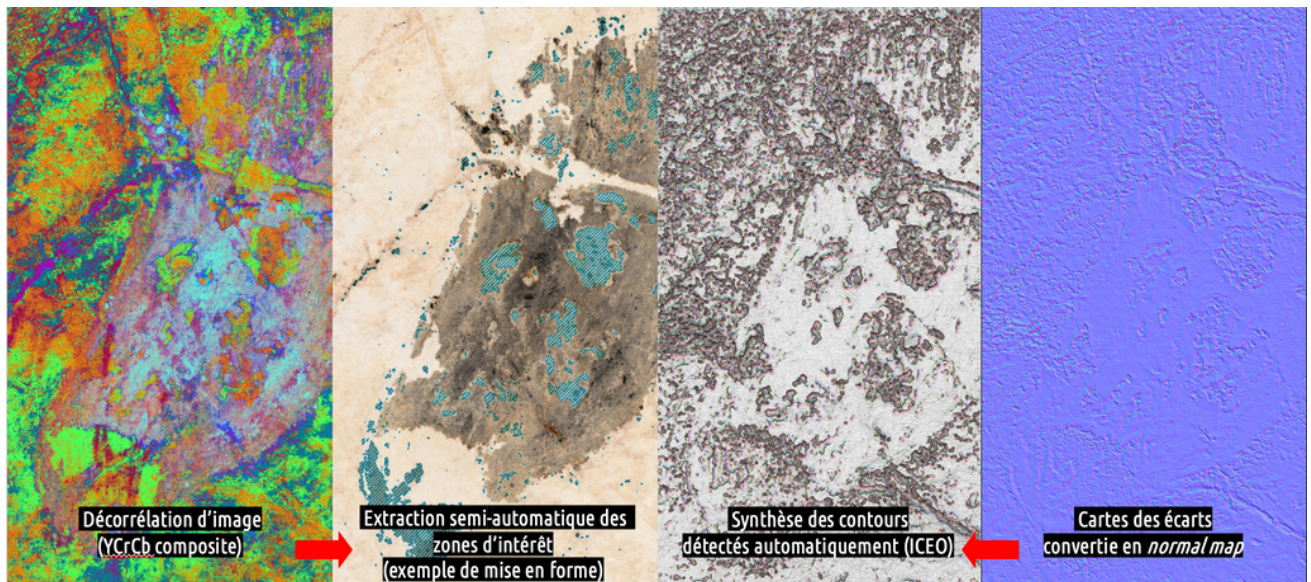


Fig. 4 - Images produites par le recours à PETRA, ERA et ICEO

De cette première expérience, il ressort que les outils PETRA et ICEO sont pleinement opérationnels pour atteindre les objectifs fixés : décrire une surface et détecter les motifs peints et gravés sur une surface.

Néanmoins, quelques limites apparaissent... PETRA par exemple est encore difficile à mettre en œuvre car il faut installer 4 plugins (PETRA, PETRA extended, My Big Button, et Deviation Map) et 5 outils (Meshlab, CloudCompare, ERA, Inkscape, Converseen...). De nombreuses tâches peuvent encore être automatisées, mais l'automatisation effective reste encore à faire. En revanche, quelques pistes semblent envisageables pour importer des données vectorielles issues de Blender vers Inkscape puis vers QGIS. Néanmoins à ce jour, la référence spatiale semble difficile à conserver.

Concernant ICEO, l'outil est très prometteur, mais il faut corriger quelques défauts de conception pour le rendre beaucoup plus flexible.

5. Stockage et administration des données

Ces données en 2D ou en 3D, mais aussi toutes les autres mobilisées dans le projet (administratives, données capturées au gré des campagnes de terrain, réunions,...), doivent être stockées et administrées et partagées (Larrousse, 2023).

Nous utilisons aujourd'hui des solutions logicielles fournies par le TGIR Huma-Num (Sharedocs), mais la volumétrie des données que nous produisons à chaque campagne nous oblige à repenser les choses différemment.

Nous envisageons de nous rapprocher des solutions proposées par la MMSH d'Aix-Marseille pour la mise en place, la maintenance et l'administration d'un serveur sur lequel stocker nos données ainsi que postgresQL/PostGIS pour la gestion des bases de données liées au projet. Des discussions sont également en cours pour l'acquisition d'une 2e machine dédiée aux calculs graphiques, permettant de réaliser différents traitements (soit au travers de logiciels spécifiques, soit directement en employant différents scripts et bibliothèques python ou R).

Nous espérons ainsi gagner en contrôle sur l'infrastructure d'accès et de manipulation des données afin d'expérimenter des modalités de publications, diffusion et médiation de nos méthodes, données et résultats.

Nous sommes sensibles aux enjeux de la science ouverte, et même si le travail est engagé, nous avons conscience du travail important qu'il nous restera à mener. Nous cherchons le plus tôt possible à mettre en place des pratiques pour nous insérer dans les dynamiques des autres projets comparables et y contribuer dans la limite des spécificités du site.

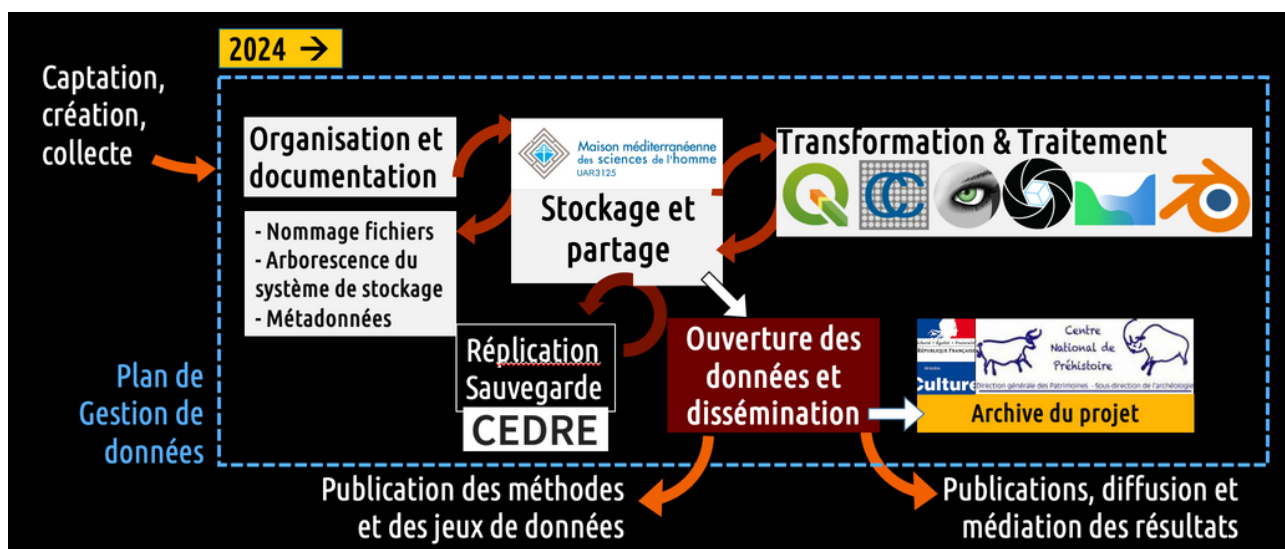


Fig. 5 - Schema prévisionnel de l'infrastructure pour la gestion des données Cosquer

6. Publications et communication scientifique

L'ampleur du projet nous engage également à mettre en place une stratégie de préservation, de publication et de communication scientifique afin d'assurer la transparence de la démarche et de rendre accessible les différentes ressources produites tout au long du cycle du projet de recherche Cosquer.

Cette démarche repose :

- sur des publications scientifiques dans des revues académiques nationales et internationales.
- sur le fait d'assurer la pérennité des données et jeux de données produites par l'équipe en exploitant les solutions proposées par les institutions de recherche partenaires ; espace de stockage et de calcul, puis entrepôts institutionnels...

- ...tout en accompagnant ces deux volets de la publication d'autres formats éditoriaux dans des revues dédiées : les data papers, permettant de qualifier les jeux de données produits, les protocol ou methodological papers ..
- ...ou comme des livrets ou guides afin d'assurer la transparence et la reproductibilité de notre démarche, comme la publication collective du ministère de la Culture du livret sur l'usage de Blender pour le relevé d'art pariétal.
- la valorisation des travaux passe également par la communication scientifique touchant un public large à travers les médias nationaux (presse, radio, rencontres Cosquer...).
- ...mais aussi par la participation à des séminaires ou journées d'étude comme ici lors de précédentes journées du consortium 3DSHS.

Enfin cette stratégie englobe des projets d'éditorialisation des ressources (Schöpfel, 2020) produites à travers des réalisations numériques ou des sites web. Autant d'outils permettent aux chercheurs et à tous publics d'accéder, sous diverses formes (exploration de modèle 3D, bases de données, bibliothèque et encyclopédie numérique), à la richesse de la documentation produite par l'équipe Cosquer.

7. Perspective (conclusion)

Au gré de l'avancée du travail, l'équipe Cosquer cherche à mettre en place et à développer des solutions pour gérer les différents aspects que la numérisation et modélisation de la grotte en 2D et 3D impliquent. Mais aussi ceux de l'étude scientifique, de la diffusion et de la communication possible à partir des données massives et spatialisées propres à l'étude de la grotte Cosquer. L'horizon à moyen terme est celui de la modélisation physique de la grotte, afin de proposer des modèles prédictifs liés à l'évolution des différents phénomènes taphonomiques depuis la formation de la cavité jusqu'à aujourd'hui.

7. Bibliographie

- Clottes, J et J Courtin (1993). « Dating a new painted cave : the Cosquer Cave, Marseille, France ». In : Time and space : dating and spatial considerations in rock art research.
- Clottes, Jean, Jean Courtin, Jacques Collina-Girard et al. (1997). « News from Cosquer Cave : climatic studies, recording, sampling, dates ». In : *Antiquity* 71.272, pages 321-326.
- Delannoy, Jean-Jacques et Jean-Michel Geneste (2020). Monographie de la grotte Chauvet-Pont d'arc, volume 1 Atlas. 302 figures. Éditions de la Maison des sciences de l'homme, collection « Documents d'archéologie française ».
- Duquesnoy, Frédérique (2015). « Apport des outils numériques et informatiques à l'étude des images rupestres du Sahara central : exemple d'application aux peintures de Séfar (Algérie) ». Thèse de doctorat. Aix Marseille Université.
- Fuentes, Oscar, Julie Lepelé et Geneviève Pinçon (2019). « Transferts méthodologiques 3D appliqués à l'étude de l'art paléolithique : une nouvelle dimension pour les relevés d'art préhistorique ». In : *In Situ. Revue des patrimoines* 39.
- Grimaud Valentin, Cassen Serge (2019). Implementing a protocol for employing three-dimensional representations in archaeology (PETRA) for the documentation of neolithic funeral architecture in Western France, *Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage*.
- Lachat, Elise (2019). « Relevé et consolidation de nuages de points issus de multiples capteurs pour la numérisation 3D du patrimoine », thèse de doctorat. Thèse de doctorat de Sciences de l'ingénieur.
- Nicolas Larrousse, Olivier Baude. 10 ans d'évolution des pratiques de science ouverte en Sciences Humaines et Sociales vus de l'infrastructure de recherche Huma-Num. *Culture et Recherche*, 2023, 144, pp.11.
- Le Quellec, Jean-Loïc et al. (2013). « DStretch® et l'amélioration des images numériques : applications à l'archéologie des images rupestres ». In : *Les Cahiers de l'AARS* 16, pages 177-198.
- Mastrucci, Fabio et Gianna Giannelli (2008). « La fotografia nella documentazione dell'arte rupestre : Tecniche e metodi del rilievo fotografico ». In : *Les Cahiers de l'AARS* 12, pages 221-231.
- Montoya, Cyril, Bruno Arfib et al. (2021). La grotte COSQUER à Marseille : Un projet pour une opération archéologique urgente, *Demande de Programme Collectif de Recherche et Prospection avec relevés d'art rupestre. SRA PACA*, page 54.

- Montoya, Cyril, Bruno Arfib et al. (2021). La grotte COSQUER à Marseille : Un projet pour une opération archéologique urgente, Demande de Programme Collectif de Recherche et Prospection avec relevés d'art rupestre. SRA PACA, page 54.
- Ollivier, Vincent (2006). « Continuités, instabilités et ruptures morphogéniques en Provence depuis la dernière glaciation. Travertinisation, détritisme et incisions sur le piémont sud du Grand Luberon (Vaucluse, France). Relations avec les changements climatiques et l'anthropisation ». Thèse de doctorat. Thèse de doctorat de Géographie Physique, Université de Provence.
- Sartoretto, Stéphane et al. (1995). « Quand la Grotte Cosquer a-t-elle été fermée par la montée des eaux ? » In : Méditerranée 82.3, pages 21-24.
- Seng, Christelle et al. (2022). « Acquisition numérique des données archéo-anthropologiques et spatiales. Le projet "Nécropole numérique" ». In : Archéopages Hors-Série 6, pages 328-333.
- Schöpfel, Joachim. (2020). À propos des données de recherche en SHS. Lettres de l'INSHS, (63), 23–25.