

# Mission

## Inside the Great Pyramid

### Numérisations 3D très haute résolution au cœur de la Grande Pyramide de Khéops [1]

■ Aurore CIAVATTI - Bertrand CHAZALY - Emmanuel LAROZE - Franck MONNIER

*Les chambres de décharge de la Grande Pyramide forment un système tout à fait unique dans l'architecture égyptienne. Aménagé au-dessus de la chambre funéraire, dite "Chambre du Roi", cet ensemble architectural est un système complexe composé de cinq niveaux de poutres en granite rose surmontés d'une voûte en chevrons en calcaire. On estime que plus de 3 000 tonnes de granite d'Assouan ont été nécessaires à la construction de ce qui peut être qualifié de véritable "monument dans le monument". Il est généralement admis que cette structure sert à "décharger" la chambre funéraire des poussées engendrées par le poids de la superstructure — un consensus qui pourrait être précisé [2]. Originellement, ces espaces vides n'étaient pas accessibles. Mais, durant le chantier, des mouvements de structure ont très certainement amené les constructeurs à creuser un tunnel au sommet de la grande galerie pour accéder à la première chambre et en vérifier l'état. Les cinq chambres ne seront découvertes qu'aux XVIII<sup>e</sup> et XIX<sup>e</sup> siècles.*

Il s'agit à ce jour des seuls espaces accessibles où est consigné le nom du roi commanditaire du monument, parmi une centaine de marques d'ouvriers (noms d'équipe, mesures, indications de construction, dates), en partie inédites.

La mission franco-égyptienne *Inside the Great Pyramid* (IGP), dirigée par Zahi Hawass et Aurore Ciavatti, vise à publier pour la première fois une analyse architecturale et épigraphique exhaustive de ces chambres, en réalisant une modélisation 3D de haute définition texturée par une couverture photogrammétrique de précision millimétrique [2].

Une première équipe IGP associant Aurore Ciavatti, Emmanuel Laroze et Bertrand Chazaly intervient dans la pyramide en mars 2024 pour établir une base de données 3D texturées très haute résolution. Cette dernière permet dans la foulée de cartographier et analyser la géométrie des chambres, en particulier la position des blocs et des

poutres en pierre, leur alignement relatif et leurs éventuelles déformations. Elle conduit également à localiser et restituer avec précision les inscriptions hiéroglyphiques, ainsi que les tracés géométriques antiques observés dans les chambres de décharge. Enfin, la base facilite la création de reconstitutions et de contenus 3D destinés à la communication grand public. Le traitement des données et la cartographie fine des surfaces sont vérifiés

et complétés quelques mois plus tard, à l'automne 2024, lors d'une deuxième mission impliquant Aurore Ciavatti, Emmanuel Laroze et Franck Monnier.

### État de la question

Ces aménagements sont découverts en totalité en 1837 par l'expédition dirigée par le Colonel Howard Vyse [3]. Les premiers plans et relevés des inscriptions sont publiés par H. Vyse et John



### MOTS-CLÉS

Égyptologie, architecture, pyramide, topographie, numérisation 3D, scanner laser 3D, lasergrammétrie, photogrammétrique, orthophotographie, modélisation 3D

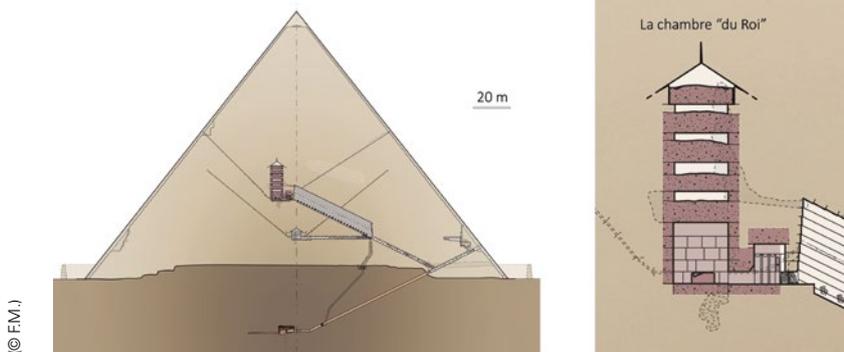


Figure 1. Les chambres de décharge au cœur de la Grande Pyramide.



Shae Perring dans les années 1840 [4]. Malgré la qualité de cette publication, la plupart de ces inscriptions ne peuvent encore être pleinement comprises ni correctement déchiffrées en raison de connaissances encore trop limitées. Un siècle plus tard, Alan Rowe entreprend un nouvel examen et identifie de nouvelles marques, dont il reproduit les fac-similés dans la publication de George Andrew Reisner consacrée à la pyramide de Menkaourê [5]. Cependant, ces relevés ne sont accompagnés d'aucune analyse ou traduction, et leur emplacement exact au sein du monument n'est pas précisé [6].

Il faut attendre le relevé architectural des pyramides réalisé par les architectes italiens Celeste Ambrogio Rinaldi et Vito Maragioglio en 1965 pour que soit publié un premier jeu de plans complet des installations (plans et vues axiales) [7]. Néanmoins, ceux des chambres de décharge sont établis à partir de mesures anciennes et de témoignages indirects, les architectes n'ayant pu y avoir accès. En 1996, Gilles Dormion publie une nouvelle étude architecturale de la pyramide, et livre à cette occasion de nouvelles coupes plus précises des chambres de décharge, ainsi qu'une analyse soignée des désordres structurels s'étant produits à cet endroit dans l'Antiquité [8]. Mais là encore, aucun relevé architectural exhaustif des parois, des poutres et des plafonds n'est réalisé. En 1997, Zahi Hawass dirige un nouvel examen épigraphique des chambres de décharge et observe à cette occasion une date sur une paroi de l'une des chambres [9]. Cette information, de la plus haute importance pour établir la chronologie du monument et du développement de la nécropole de Giza, était restée inconnue jusqu'alors, à l'exception d'une vague mention publiée par Sir William Petrie [10].

Ce n'est que depuis une quinzaine d'années que se développe en Égypte le recours aux relevés scanner laser 3D et à la photogrammétrie appliquée à l'archéologie et à l'étude des monuments. En 2022, le World Scan Project [11] entreprend l'exécution d'un premier scan 3D des chambres de décharge, destiné à une diffusion grand public via la réalité virtuelle

et le métavers [12]. Quelques mois plus tard, à l'occasion du tournage d'un documentaire produit par Label News, un second scan 3D est réalisé en quelques heures seulement par Alban-Brice Pimpaud, à l'aide d'un scanner mobile Leica BLK2Go [13].

Si la précision et la résolution de ces données sont inférieures à celles que le scan produira par la suite dans le cadre du projet IGP, elles mettent néanmoins en évidence l'apport majeur de cette technologie pour recueillir de nouvelles informations sur les techniques de construction, le transport des blocs, l'organisation logistique, les phases de construction, ainsi que sur les dommages subis par ces installations uniques. Elles permettront aussi à l'équipe IGP de comprendre les lieux à numériser, d'anticiper les problèmes liés à leur exigüité, de prévoir les stratégies de numérisation et de mettre au point les outils et accessoires nécessaires à un enregistrement optimal.

La mission *Inside the Great Pyramid* entreprend en mars 2024 et durant dix jours, un nouveau scan 3D haute définition géoréférencé et texturé par une couverture photogrammétrique de précision millimétrique de ces installations, de la Chambre du Roi et des tunnels d'accès [14].

### Stratégie : une numérisation multiscalaire

En 3D, la numérisation multiscalaire est une approche qui permet de capturer des objets ou des environnements à différentes échelles de détail [15]. On peut alors obtenir des informations très précises sur des petites parties d'un objet tout en ayant une vue d'ensemble de l'objet entier. Cette approche est particulièrement utile en architecture et en archéologie, où il est parfois important de combiner des détails fins avec une vue globale.

La numérisation multiscalaire s'appuie sur une combinaison de plusieurs techniques de relevé, qui interagissent, chacune apportant à l'autre des informations complémentaires.

Dans notre cas, nous avons mis en œuvre trois techniques :

- La tachéométrie, par la mesure de cibles placées temporairement dans chaque chambre et dans la Grande Galerie, fournit un calage local et un nivellement précis des levés lasergrammétriques enregistrés dans chaque volume, mais n'a pas connecté ces volumes entre eux, un cheminement tachéométrique précis entre ces volumes étant quasiment impossible dans le temps imparti. Elle apporte aussi les informations de mise à l'échelle à la photogrammétrie de ces volumes ;
- La lasergrammétrie apporte une couverture 3D dense complète des espaces à une résolution de 2 mm. Par le positionnement et l'orientation particulière du scanner à des points clés du cheminement entre les chambres, elle permet la connexion topographique précise entre ces espaces et fournit la volumétrie complète de l'ensemble. Elle apporte aussi les points de calage complémentaires aux cibles topographiques : les coordonnées de points "naturels" (coin, angle de pierre, fissure, inscription, gravure) peuvent être extraites de la lasergrammétrie et nourrir la photogrammétrie en points de calibration et de calage, limitant la dérive du calage des blocs de prise de vues ;
- La photogrammétrie s'appuie sur les deux techniques précédentes et apporte le niveau de détail ultime en faisant passer la résolution des modèles 3D et des images de 2 à 0,1 mm. Elle complète ces modèles par une texturation tout aussi détaillée.

#### ■ La lasergrammétrie

Avant le début de la mission, l'analyse des données numérisées par Alban-Brice Pimpaud a permis de tirer des enseignements très utiles. Les connexions entre les différentes chambres se font par des galeries étroites, dont le diamètre laisse à peine passer un homme. La connexion des chambres 1 à 5 est notamment assurée par une galerie verticale. Depuis ces galeries, les fenêtres ouvrant sur les chambres sont étroites. À certains points de passage, étroits, la progression change radicalement de direction,



réduisant la longueur des bras de levier du cheminement topographique. Il existe cependant un axe de visée quasi vertical, partant du pied de la galerie verticale à l'entrée de la chambre 1, qui atteint le sommet de la galerie à l'entrée de la chambre 5. En déplaçant les échelles, on peut placer des positions de calage le long de cet axe, permettant de viser le pied, le sommet de la galerie, et l'intérieur de chaque chambre. Un cheminement topographique peut donc être réalisé, non pas à la station totale (espace trop exigü dans les galeries d'accès pour un appareil et l'opérateur), mais au scanner 3D, notamment en inclinant le scanner 3D à 90° à certaines positions stratégiques. Il faudra cependant assurer un nivellement précis de chaque chambre de manière à contraindre les calages et réduire les dérives de calage relatif. Nous avons donc fabriqué une platine pour le scanner, permettant une numérisation inclinée à 90°. Dans cette position, le scanner peut assurer une numérisation dense sous le trépied, au zénith et devant lui. C'est un équipement spécialement conçu pour l'enregistrement de positions stratégiques du scanner, aux points de transition entre les galeries et les chambres. Nous avons aussi adapté une mini platine à l'embase du scanner, pour permettre une mise en station aux endroits où la hauteur sous plafond est très faible.

Sur le terrain, l'approche a consisté à décomposer l'ensemble à numériser en blocs, chaque bloc correspondant à une unité volumique. Dans les blocs correspondant aux chambres, six à huit petites cibles à damier ont été

réparties en périphérie, posées sur les élévations le temps de l'opération de numérisation (incluant la couverture photogrammétrique). Au sein de chaque bloc, le volume est couvert par plusieurs positions de scanner, espacées de 1 à 2 m, de manière à assurer un fort recouvrement entre les positions (60 à 80 % de surfaces communes). Au sein du bloc, le scanner est configuré pour numériser sur 360° à une résolution de 1 pt / 3 mm à 5 m. Au moins une position de scanner est enregistrée à proximité de chaque cible. À la jonction entre les blocs, une position de scanner est enregistrée à une résolution légèrement plus forte (1 pt / 2 mm à 5 m), de manière à couvrir largement les surfaces des différents blocs en un point de vue. Cette position commune est copiée dans chaque bloc.

Au sein de chaque bloc, les cibles ont été relevées à la station totale.

Sans compter les reprises, 289 positions ont été numérisées au Faro Focus 3D X330 pour couvrir la zone d'étude : entre 40 et 50 positions par chambre, 33 positions dans le puits vertical et 15 dans la petite galerie d'accès horizontale. En moyenne, 11,5 millions de points 3D ont été enregistrés par position. La résolution moyenne après fusion est d'au moins 1 pt / 2 mm.

Pour le calage, la stratégie a consisté à réaliser la consolidation fine des positions au sein de chaque bloc, indépendamment des autres blocs. Chaque consolidation a abouti à un positionnement relatif dont l'écart moyen par position est compris entre 0,1 à 0,15 mm.

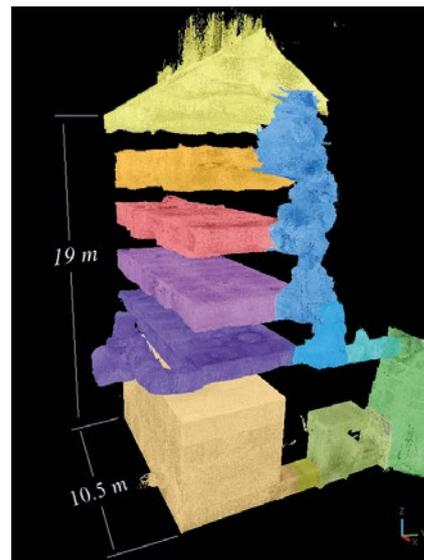


Figure 4. Décomposition des espaces à numériser en blocs.

Puis, chaque bloc a été finement nivelé à l'aide des mesures tachéométriques. Les blocs ont ensuite été ajustés entre eux par consolidation ICP (*Iterative Closest Point*). Les blocs ont été présentés les uns dans les autres par calage manuel, en verrouillant les rotations autour des axes X et Y pour conserver le nivellement relatif des blocs. La translation dans les trois axes, et la rotation autour de Z ont été laissées libres. Le calcul de consolidation générale a été lancé. Cette consolidation a abouti à un ajustement dont l'écart moyen par bloc est de 0,12 à 0,18 mm. Rapporté à la longueur des bras de levier dans les chambres, cet écart moyen correspond à une incertitude de calage absolu des chambres entre elles de 3 à 5 mm dans les trois directions. Enfin, un système de coordonnées commun à tous les espaces numérisés a été défini, orienté sur la Chambre du Roi.

© 2024-Dassault Systèmes SE/Inside the Great Pyramid/B.C.

© Inside the Great Pyramid/B.C.



Figures 2 et 3. Lasergrammétrie dans la galerie verticale (à gauche) et en chambre de décharge (à droite).

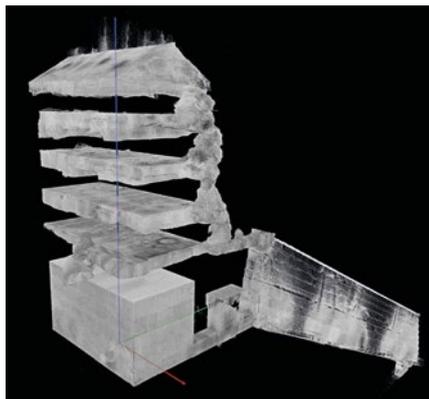


Figure 5. Nuage de points 3D issu de la lasergrammétrie.



### ■ La photogrammétrie

Comme pour le scan 3D, les prises de vues photogrammétriques ont été fortement contraintes par les spécificités des lieux. Pour des raisons de sécurité, la mission devait travailler durant les heures d'ouverture des visites touristiques et dépendait de l'installation quotidienne de la grande échelle dans la grande galerie pour accéder au boyau d'entrée. Afin de garantir des résultats exhaustifs, il a donc fallu élaborer un protocole d'intervention tout à fait original et choisir un matériel adapté. Les premières simulations nous ont rapidement convaincus qu'il était préférable d'utiliser un matériel polyvalent, à la fois léger et compact. Il devait également garantir robustesse et fiabilité. Afin d'éviter d'emporter trop de matériel sur place, il a été décidé d'utiliser un seul appareil équipé d'une focale fixe pouvant répondre à l'ensemble des situations. Une focale de 16 mm montée sur un Canon RP plein format a parfaitement répondu à nos exigences. Concernant l'éclairage, comme l'alimentation électrique sur place n'était pas garantie, il a été décidé de travailler avec un éclairage portable et autonome. L'utilisation d'un flash déporté aurait assuré un éclairage optimal, mais l'exiguïté de certains espaces et la relative lourdeur du dispositif nous ont incités à opter pour un éclairage LED. Les tests préalables ont également montré que cette solution offrait un spectre de lumière convenable. Pour que la lumière soit la plus homogène possible, nous avons fabriqué un cadre en aluminium sur lequel ont été collés des rubans de LED COB alimentés par des boîtiers de piles. L'appareil photo était ensuite fixé

au centre de cet éclairage. Ce dispositif très léger pouvait être tenu à la main ou être fixé sur une perche télescopique, comme cela fut nécessaire pour le relevé des parois et du plafond de la chambre funéraire.

La densité des prises de vues avait pour objectif d'atteindre une résolution d'au moins 1 mm par pixel sur la totalité des parois visibles. En dix jours, ce sont près de 24 000 clichés qui ont été saisis à une résolution de 0,2 mm. Les plafonds ont été les parois les plus délicates à relever du fait de l'irrégularité des sols et de l'inconfort résultant pour le cadrage. Dans ces conditions, il convenait pour autant d'assurer un recouvrement stéréoscopique suffisant, sans quoi la texture aurait été incomplète. La grande planéité du plafond conjuguée à la prise de vue rapprochée (50 cm environ) était par ailleurs très défavorable à la calibration automatique. Ce type de situation peut en effet conduire à des distorsions géométriques comme des effets de courbure. Pour remédier à ce problème, chaque paroi a été relevée par deux séries de photos : l'une proche pour atteindre le degré de résolution souhaitée et une autre plus éloignée, voire parfois oblique, pour consolider la géométrie des modèles.

Sept blocs de prises de vues ont été calculés et calés sous Metashape dans le système de coordonnées défini pour le projet : la Chambre du Roi, les cinq chambres de décharge, et un bloc regroupant les deux galeries d'accès horizontale et verticale. La précision de calage relatif des prises de vues est de l'ordre de 0,5 pixel, soit 0,1 mm terrain.



Figure 6. Levé photogrammétrique dans la galerie verticale.

Les points de calage topographiques groupant les cibles à damier et les points naturels digitalisés dans la lasergrammétrie y ont été pointés. La précision de calage dans le système de coordonnées du projet est de l'ordre de 3 mm.

### Exploitations

Les 289 positions de scanner 3D calées, et les sept projets photogrammétriques Metashape associés, constituent la base de données 3D fondamentale des chambres de décharge, regroupant les fichiers natifs à leur maximum de résolution. C'est à partir de cette base que les restitutions peuvent être déclinées.

### ■ Modèles numériques de relief et orthophotographies

À partir des données lasergrammétriques, un système de plans de projection par face a été défini, commun à chaque chambre. Ce système est constitué de points particuliers, encadrant les élévations de chaque chambre, et choisi de manière à assurer une continuité des projections orthophotographiques sur toute l'élévation du projet : l'emprise haute d'une chambre correspond à l'emprise basse de la chambre supérieure, et les bords gauche et droit de chaque élévation sont communs à toutes les chambres. Deux plans particuliers ont été définis pour les plans inclinés de la chambre 5.

Dans chaque plan d'élévation correspondant à chaque face d'une chambre, un modèle numérique de surface (MNS) a d'abord été interpolé à partir des cartes de profondeur de chaque photographie,

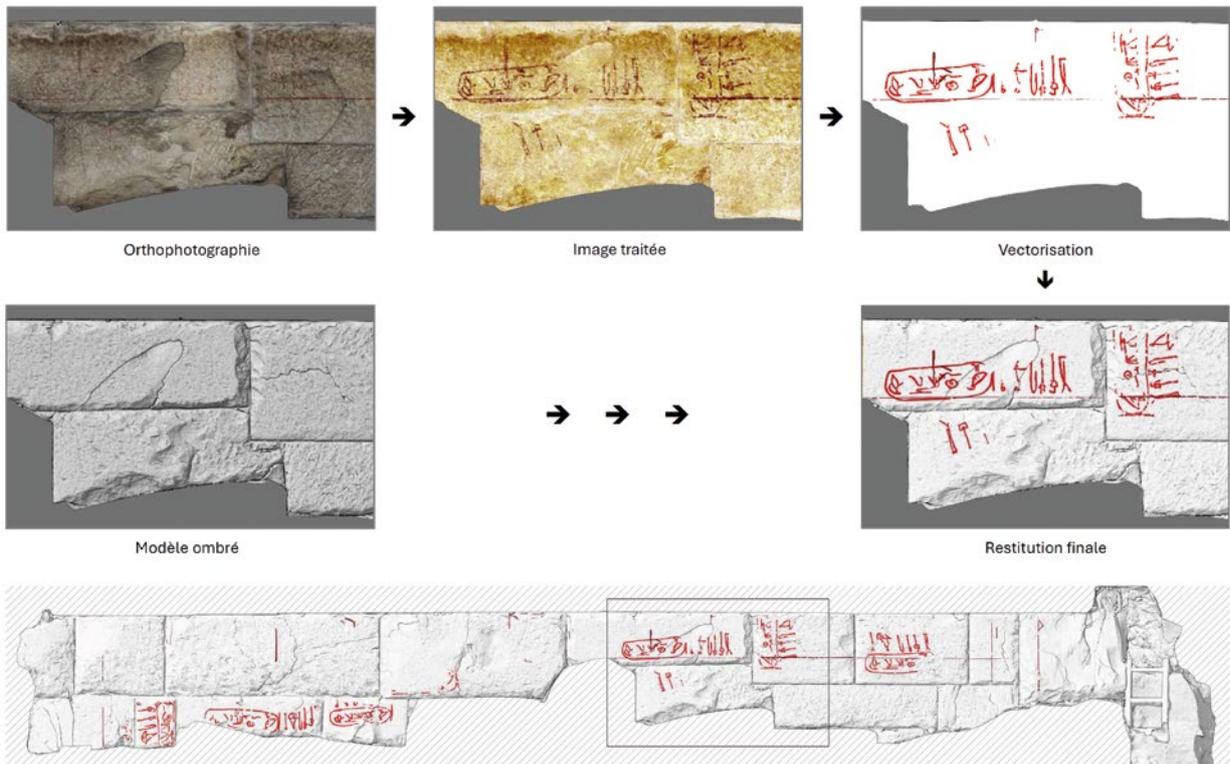


Figure 8. Restitution de l'élévation nord de la chambre 4 : modèle numérique de relief, orthophotographie et rendu final.

à une résolution de 0,5 mm. Ces MNS ont alors été exploités pour produire des vues ombrées du relief des faces (élévations, sol, plafond) et des orthophotographies de ces mêmes faces, le tout à une résolution de 1 pixel / 1mm. Ce sont ces vues qui ont ensuite été exploitées pour analyser et restituer les inscriptions hiéroglyphiques, les tracés géométriques antiques et les désordres (fissures, écailllements, etc.)

Cette restitution s'est appuyée sur un traitement numérique des orthophotographies à l'aide de l'outil DStretch® pour ImageJ®, mettant en évidence les faibles différences de teinte et permettant ainsi

de mieux visualiser les inscriptions laissées par les bâtisseurs il y a plus de 4 500 ans. Ces marques peintes ont été ensuite finement vectorisées, puis superposées à l'ortho-image du relief ombré de l'élévation.

### ■ Modèles 3D

Pour chaque bloc photogrammétrique, deux modèles 3D maillés ont été

interpolés : un modèle de résolution géométrique fine, de 10 à 27 millions de triangles, puis un modèle de résolution géométrique moyenne, de 2 à 6 millions de triangles, mais drapé par une texture de résolution projetée de 1,5 à 2 mm. Ces modèles ont ensuite été importés dans Blender. Ce logiciel de modélisation permet de recréer par superposition toute la structure, bloc par bloc, et d'éprouver les hypothèses formulées sur la construction et la mise en place de chacun de ses éléments. L'une des principales difficultés que nous avons rencontrées a été de reconstituer la plupart des blocs en ignorant sur quelle distance la plupart d'entre eux pénètrent dans la maçonnerie. Fort heureusement, il est possible d'observer des blocs entiers dans les boyaux creusés à l'explosif au XIX<sup>e</sup> siècle. Ces endroits exigus et inextricables, dans lesquels il est extrêmement difficile de circuler, n'avaient jamais été documentés jusqu'à ce jour. Grâce au scan, il est désormais possible d'en produire une coupe

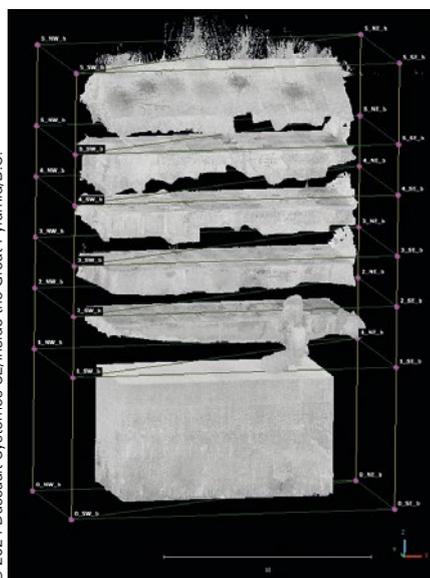
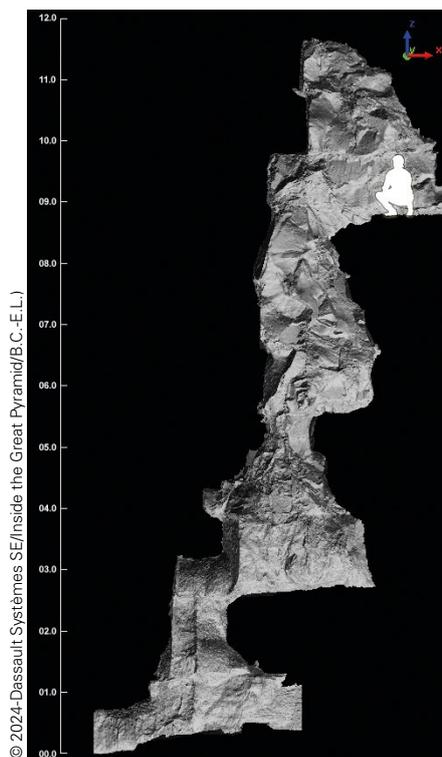


Figure 7. Définition des plans de projection.



Figures 9 et 10. Modèles 3D maillés de la galerie verticale (à gauche) et de la chambre 4 (à droite).





latérale, de distinguer les blocs mis au jour dans ces lieux, et de procéder à des mesures précises. Nous possédons dorénavant quelques éléments de réponse avec lesquels nous pourrions déterminer avec une faible marge d'erreur les dimensions, les volumes et les masses des poutres de granite couvrant la Chambre du Roi sur cinq étages, poutres de formes disparates. Étant capable de calculer des volumes de formes complexes grâce à la discrétisation, Blender s'avère être là aussi un outil précieux pour offrir une description architecturale la plus parfaite possible. La vue tridimensionnelle générale facilitera également la compréhension des lignes de construction antiques relevées sur les parois (murs latéraux et poutres), qui semblent avoir été posées en guise de repères pour que l'ensemble soit parfaitement aligné à la verticale avec la Chambre du Roi.

## Conclusions

Les conditions de travail dans la pyramide ont été particulièrement difficiles. Elles n'ont cependant pas empêché l'équipe de mener à bien les opérations de mesure puis de restitution. Les contrôles quotidiens ont permis de valider les relevés et de réaliser les compléments ou les reprises néces-

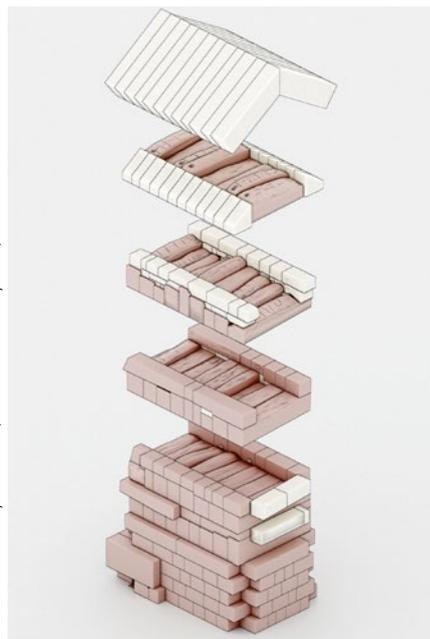


Figure 11. Restitution architecturale des chambres sous Blender, à partir des relevés 3D. Version préliminaire 2024.

saires à l'obtention d'une base de données 3D pleinement exploitable. L'emprise des relevés et les niveaux de précision et de résolution répondent pleinement aux objectifs de la mission, voire les dépassent. Le jeu de données a d'ores et déjà permis des restitutions d'une qualité et d'un niveau de détail encore jamais produits sur ce monument emblématique. ●

## Contacts

**Aurore Ciavatti**, égyptologue, Institut français d'archéologie orientale, [aciavatti@ifao.egnet.net](mailto:aciavatti@ifao.egnet.net)

**Bertrand Chazaly**, ingénieur géomètre topographe, Fugro Geoid SAS, [b.chazaly@fugro.com](mailto:b.chazaly@fugro.com)

**Emmanuel Laroze**, architecte, ingénieur de recherche CNRS, UMR8167 - Orient et Méditerranée, [laroze.emmanuel@gmail.com](mailto:laroze.emmanuel@gmail.com)

**Franck Monnier**, ingénieur, membre associé au CNRS, UMR7041, ArScAN, [monnierfranck@hotmail.com](mailto:monnierfranck@hotmail.com)

## Bibliographie

- [1] La mission *Inside the Great Pyramid* est financée par Dassault Systèmes 3DS, Arpamed, l'Institut français d'archéologie orientale et l'équipe "Mondes pharaoniques" de l'UMR 8167 Orient & Méditerranée. La numérisation 3D des installations a intégralement été prise en charge par Dassault Systèmes 3DS grâce au soutien de Mehdi Tayoubi, que nous remercions.
- [2] Voir en dernier lieu Fr. Monnier, "À propos du couvrement de la chambre dite 'du Roi' dans la pyramide de Khéops", GM 231, 2011, pp. 81-96 (avec bibliographie).
- [3] R. W. H. Vyse, *Operations carried on at the Pyramids of Gizeh*, London, 1837.
- [4] J. S. Perring, *The pyramids to the southward of Gizeh and at AbouRoash III*, London, 1842.
- [5] G. A. Reisner, Mycerinos, *The temples of the Third Pyramid at Giza*, Cambridge, 1940.
- [6] Il faut aussi mentionner l'inventaire des graffitis de visiteurs réalisés par G. Goyon : G. Goyon, *Les inscriptions et graffitis des voyageurs sur la Grande Pyramide*, Genève, 1944. Depuis leur découverte, les chambres de décharge ont effectivement été visitées par une certaine élite touristique, et nombre de ces visiteurs ont souhaité laisser un témoignage de leur passage sur le plafond et les parois des chambres, inscrit au noir de

fumée. Ces inscriptions font désormais partie intégrante de l'histoire du monument.

[7] C.A. Rinaldi, V. Maragioglio, *L'Architettura delle Piramidi Menfite 4*. Le Grande Piramide di Cheope, Rapallo, 1965.

[8] G. Dormion, *La pyramide de Chéops : architecture des appartements funéraires : notice descriptive, relevé architectural*, Irigny, 1996.

[9] Z. Hawass, "Inscriptions on the Five Relieving Chambers of Khufu's Pyramid", dans M. Barta, Z. Hawass, M. Megahed, *Living at the Wall. Studies in honor of Mark Lehner*, Prague, 2024, pp. 199-216.

[10] W. M. F. Petrie, *A History of Egypt. Vol. I. From the Earliest Times to the XV<sup>th</sup> Dynasty*, London, 1923.

[11] *World Scan Project est une entreprise japonaise qui a pour ambition de rendre accessible au grand public, grâce à la réalité virtuelle et au métavers, les sites archéologiques majeurs du monde entier, en produisant les archives digitales 3D texturées*. Les grandes pyramides d'Égypte ont une place d'honneur dans leur catalogue digital. Voir [www.world-scan-project.com](http://www.world-scan-project.com).

[12] World Scan Project, *Relieving Chambers - The amazing space that supports the Giant Pyramid's enormous structure*, September 2024. Consulté sur <https://youtu.be/5jsK9tnLz3Y>

[13] "Kheops. Révélations sur les chambres secrètes", diffusé le 15 septembre 2023 sur RMC Découvertes, direction : Fr. Pomes, Label News production.

[14] A. Ciavatti et al, "Inside the Great Pyramid", BAEFE 2024 à paraître.

[15] A. Burens, P. Grussenmeyer, S. Guillemin, L. Carozza, R. Bourrillon, S. Petrognani, *Numérisation 3D de la grotte ornée des Fraux (Saint-Martin-de-Fressengeas, Dordogne, France). Approche multiscalaire*. Collection EDYTEM. Cahiers de géographie. Année 2011 12 pp. 183-189

## ABSTRACT

The relieving chambers of the great pyramid of Giza are a very complex part of the monument, nearly inaccessible. It's the only place in the pyramid where the name of the king Khufu is recorded, among a hundred or so workers' marks. This article describes the 3D survey mission that took place in March 2024 and successfully recorded a very high-density 3D database that provided the first exhaustive architectural and epigraphic analysis of the Chambers.