

Le relevé par scannage 3D du temple d'Opet à Karnak, Egypte

■ Bertrand CHAZALY - Emmanuel LAROZE

L'essor de la topographie dans le domaine de l'archéologie est récent. Sur le terrain, l'usage quotidien du théodolite pour les relevés des fouilles ou les études architecturales est devenu indispensable. La technique du scannage 3D appliquée à l'archéologie était réservée, jusqu'à maintenant, à des opérations exceptionnelles et complexes dont la plus remarquable reste sans doute le relevé de la grotte Cosquer. En quelques années, le développement de cet outil performant et sa maîtrise par les équipes de topographes tend à démocratiser son usage notamment dans le secteur des études de patrimoine architectural. Une coopération entre la société ATM3D et le Centre Franco-Egyptien d'Étude des Temples de Karnak (CFEETK) a permis l'organisation d'une mission à la fin du mois de février 2004 pour le relevé d'un temple ptolémaïque à Karnak, dont l'étude est en cours.

■ mots clés

Scannage 3d, scanner 3d, numérisation 3d, lasergrammétrie, photogrammétrie, orthophotographie, modélisation, étude architecturale, topographie, archéologie, temple, Egypte antique.

Présentation du temple

Le site de Karnak constitue le cœur de l'antique capitale de l'Égypte ancienne, Thèbes (aujourd'hui Louqsor). Il se situe à environ 700 kilomètres au sud du Caire. Il est le centre religieux du pays dès le Moyen Empire (environ 2100 av. JC) et le restera pendant près de vingt siècles. Le site de Karnak est composé de trois sanctuaires. Le plus connu est celui consacré au dieu Amon, patron de la royauté égyptienne, dont le grand temple s'étend sur presque 400 mètres d'Ouest en Est (fig. 1).

Le temple d'Opet fait partie des nombreux bâtiments situés au sein de l'espace sacré de ce temple d'Amon que délimite une large enceinte de brique crue. Il est destiné à célébrer la naissance du dieu Osiris, engendré par la déesse Opet la Grande, forme particulière de la déesse du ciel Nout. Il se situe dans l'angle Sud-Ouest du sanctuaire et s'adosse à un temple plus important dédié à Khonsou, le fils du dieu Amon, avec lequel il partage

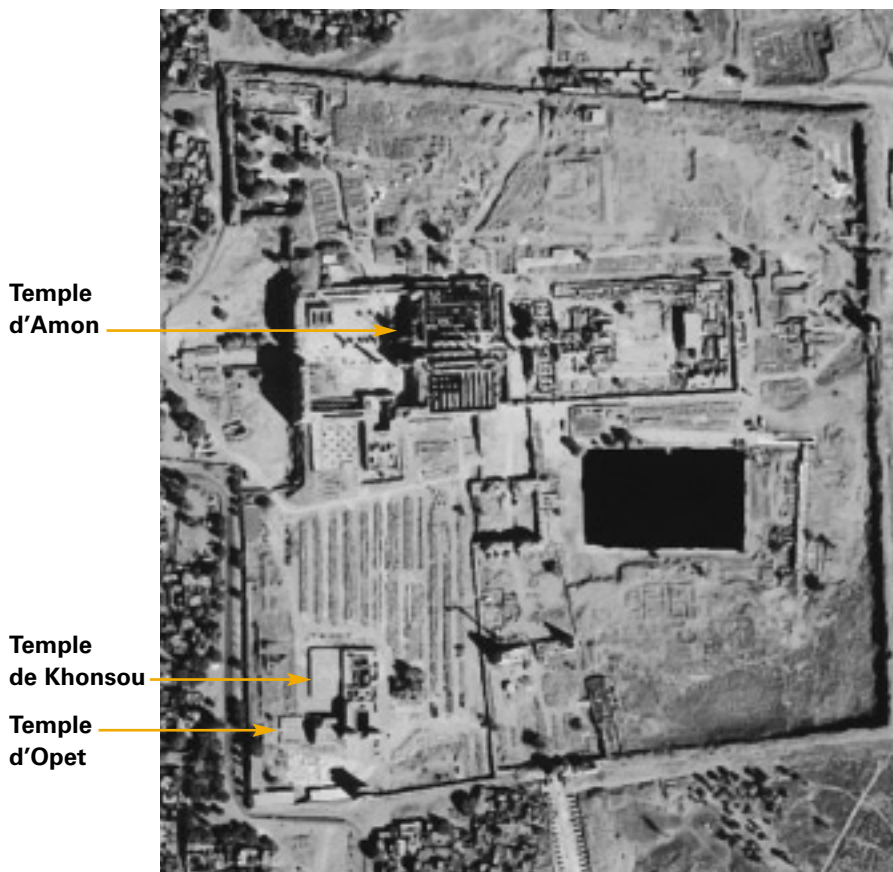


Fig. 1 : Le sanctuaire du Temple d'Amon



La technique

Le scannage 3D révolutionne le domaine de l'acquisition de la géométrie d'objets ou de sites. Cette technologie s'appuie sur une nouvelle génération d'instruments de mesures utilisés dans les domaines de la topographie, de la modélisation architecturale, de l'infographie et de la métrologie industrielle.

Un scanner 3D est un appareil capable de mesurer et d'enregistrer plusieurs millions de points tridimensionnels en quelques minutes, à une précision de quelques millimètres, à une densité pouvant atteindre plusieurs points au centimètre.

On distingue pour l'instant trois types de scanner, selon :

- **la technologie d'acquisition** : stripe-light, triangulation, temps de vol
- **la portée du capteur** : de quelques mètres à plusieurs kilomètres
- **la précision** : du dixième de millimètre à quelques centimètres

Ils ont tous en commun la capacité d'acquérir rapidement un volume important de points 3D. Pour des applications topographiques terrestres, on citera les scanners Riegl, Trimble-Mensi, Leica-Cyrax, Optech et Callidus.

Le nuage de points tridimensionnels issu du scannage est inexploitable en



Fig. 2 : Le scanner 3D Riegl LMS Z 420i.

d'étroites relations d'un point de vue du fonctionnement du culte. Ce temple est l'une des réalisations les plus tardives à Karnak. Sa construction est entreprise à l'époque grecque, en 150 av. JC sur les vestiges d'un temple plus ancien, mais la décoration restera inachevée.

Aujourd'hui, dans cette partie du sanctuaire, la porte d'Evergète, les temples d'Opet et de Khonsou sont les derniers vestiges d'un ensemble cultuel assez indépendant du grand temple d'Amon. Chacun des deux temples disposait d'une porte qui leur permettait d'avoir une relation privilégiée avec l'extérieur du sanctuaire. Le fonctionnement de cet ensemble et plus particulièrement celui du temple d'Opet demeure malheureusement assez mal connu.

Bien que l'étude épigraphique de ce temple ait déjà été réalisée, aucun relevé précis ni aucune étude architecturale n'a été entreprise sur ce bâtiment qui présente pourtant de grandes qualités constructives. C'est pourquoi, le CFEETK a entrepris son étude architecturale, dont la méthode se base sur un relevé précis pour tenter, entre autres, de mieux comprendre l'organisation et les techniques de mise en Œuvre.

Le contexte du temple

Dans le cas de ce projet, l'intégrité et l'échelle du bâtiment se sont rapidement imposées comme des conditions déterminantes pour le choix de la méthode de relevé par numérisation 3D. Le temple d'Opet couvre une surface limitée de 23 m par 45 m, et se prêtait bien au caractère expérimental du projet. Le CFEETK ne disposait pas de références sur l'application du scannage 3D au patrimoine antique, ni de temps suffisant pour se lancer dans un projet plus important.

Le contexte dégagé tout autour du temple fut un argument supplémentaire pour choisir cet outil : il était facile de procéder à un cheminement. L'accès à la toiture en surplomb du temple de Khonsou a également permis de procéder au levé de la couverture du temple d'Opet.

L'objectif initial était de réaliser une série d'orthophotographies des façades et des coupes à l'échelle du 1/50°. L'utilisation de la technologie de numérisation 3D et l'enregistrement photographique permettaient de plus la réalisation d'une véritable archive tridimensionnelle du monument, d'où des informations cartographiques et infographiques pourraient être extraites ultérieurement.

l'état. Il faut donc associer le capteur à un logiciel de traitement particulier. Ces logiciels utilisent les derniers développements informatiques en matière de gestion de données denses, de modélisation et de cartographie automatique. La majorité des fournisseurs de scanner couplent leurs matériels à des solutions logicielles spécifiques. Il existe aussi des solutions indépendantes, compatibles avec la majorité des capteurs disponibles sur le marché.

En matière d'acquisition et de traitement, la méthode de travail est radicalement différente de celle d'un levé topographique classique. On ne choisit pas a priori, c'est à dire au moment du levé, les données à cartographier. On relève "tout", dans la mesure où la densité fixée au moment de la numérisation est compatible avec l'échelle de restitution demandée et où l'on s'est assuré de la bonne couverture de l'objet (élimination des masques par multiplication des stations). C'est a posteriori que l'interprétation est faite, l'opérateur naviguant virtuellement dans le nuage de points pour choisir les éléments à restituer.

Le résultat du traitement aboutit selon les besoins à des exploitations cartographiques de haute précision (restitution filaire équivalente à une restitution photogrammétrique, vues en élévation, coupes, modèle numérique de terrain), à un modèle maillé tridimensionnel, véritable clone numérique exploitable en imagerie de synthèse (modélisation TQC ou "Tel Que Construit"), ou à des analyses géométriques plus fines (auscultation par comparaison de nuages de points).

Généralement cette technologie de pointe apporte :

- un volume d'information en 3D d'une extrême densité
- la visualisation en 3D in situ des données acquises
- une documentation révolutionnaire, un archivage 3D des monuments et sites scannés : les données acquises pourront être exploitées avec précision même si l'objet scanné venait à être endommagé ou détruit.
- une grande liberté d'exploitation des mesures : nul besoin de retourner sur le terrain pour de nouvelles mesures :



tout est acquis dans la limite d'une bonne accessibilité visuelle des objets à scanner.

- moins de contraintes au moment de l'acquisition : la saisie est très rapide et la portée importante, ce qui réduit considérablement les contraintes de sécurité et d'immobilisation inhérentes à ce type d'intervention sur certains lieux (site fréquenté, délai d'intervention).
- l'assurance de ne commettre aucun dommage sur le monument pendant le relevé : les mesures se font sans contact physique, à l'aide d'un laser de classe I (eye safety) ou II.
- la possibilité d'accéder virtuellement à des parties inaccessibles physiquement : les mesures au laser sans réflecteur peuvent être réalisées à plusieurs dizaines voire plusieurs centaines de mètres du monument.



A Karnak, ATM3D est intervenue avec le scanner Riegl Z420i (fig. 2). Il s'agit d'un scanner 3D terrestre photogrammétrique. La société l'a en effet équipé d'un appareil photographique numérique 6 millions de pixels, parfaitement calibré (distorsions, orientation externe), ce qui permet la mise en relation de n'importe quel point scanné avec son pixel correspondant dans la

caractéristiques du scanner Riegl LMS Z420i configuré par ATM3D

- portée maxi 800m
- portée pratique constatée par ATM3D : 500 à 1000m selon l'incidence, le matériau et la couleur
- précision sur 1 point : 10 mm
- précision par interpolation : 5 mm
- champ horizontal : 360°
- champ vertical : 80°
- tête inclinable de 0 à 90°
- résolution angulaire maxi : 0.0025° (soit un point tous les 4 mm à 100m)
- résolution d'un point : 5mm
- vitesse d'acquisition : de 6500 à 10 000 points à la seconde
- information enregistrée pour chaque point acquis : coordonnées XYZ, couleurs RVB, intensité de réflexion
- capteur laser de classe 1
- capteur photographique 6 millions de pixels (interchangeable)
- Optiques calibrées : 14 mm, 85 mm, 180 mm

série de prises de vues qui couvre le champ numérisé (équipé d'un 14 mm, la couverture photographique d'un champ de 360° aboutit à l'enregistrement d'une image couleur de près de 40 millions de pixels).

Les caractéristiques du capteur 3D (voir encadré) ont permis une acquisition rapide et dense du temple et de son environnement topographique et architectural: l'appareil porte à plus de 800 m, à une précision brute de 10 mm. La réalisation d'une séquence de plusieurs scans, ou le rééchantillonnage d'un ensemble dense de points, permet d'atteindre sans trop de difficulté une précision de 5 mm. Un nuage de 3 millions de points est acquis en 6 minutes à peine.

Contrairement à un tachéomètre, le scanner n'est pas calé lors de la mesure. La tête peut être inclinée jusqu'à 90°. Le recalage des semis de points s'appuie sur le relevé au tachéomètre de cibles réfléchissantes que le scanner détecte et numérise automatiquement. Ce calage mathématique, réalisé *in situ*, est finalement la phase la plus longue dans la chaîne d'acquisition.

Les résultats

Une vingtaine de stations de scannage auront permis d'acquérir un nuage dense de 30 millions de points, couplés à des prises de vues numériques pour chaque position (fig. 3). Une autre couverture photographique réalisée avec

un 85 mm est venue compléter la première dans le détail, permettant l'enregistrement précis des bas-reliefs. L'ensemble des façades extérieures, la toiture et la salle hypostyle ont pu être relevés. Le travail à l'intérieur du bâtiment fut plus délicat: si les hiéroglyphes sont taillés "en creux" sur les parois extérieures, ils sont en relief, plus fins et colorés à l'intérieur du temple.

De plus, l'exiguïté des salles du temple a rendu difficile l'acquisition des points. Le manque de recul a pu être partiellement résolu par la multiplication des stations. Les "masques", comme les colonnes, corniches, portes se sont révélés plus nombreux qu'à l'extérieur.

L'assemblage des nuages de points a abouti à la production d'une première archive tridimensionnelle, un modèle maillé de précision centimétrique, couvrant 90 % des surfaces intérieures et extérieures du temple (fig. 4). Ce modèle 3D brut d'acquisition a d'abord rendu possible une véritable perception du temple en trois dimensions. Grâce aux outils de visualisation, on peut naviguer virtuellement autour et dans le temple de manière dynamique, s'arrêter sur des points de vues particuliers, zoomer. Bien que l'accès physique à l'intérieur du monument soit soumis à autorisation dans un souci de protection du patrimoine, il est désormais possible de naviguer librement dans le modèle numérique.

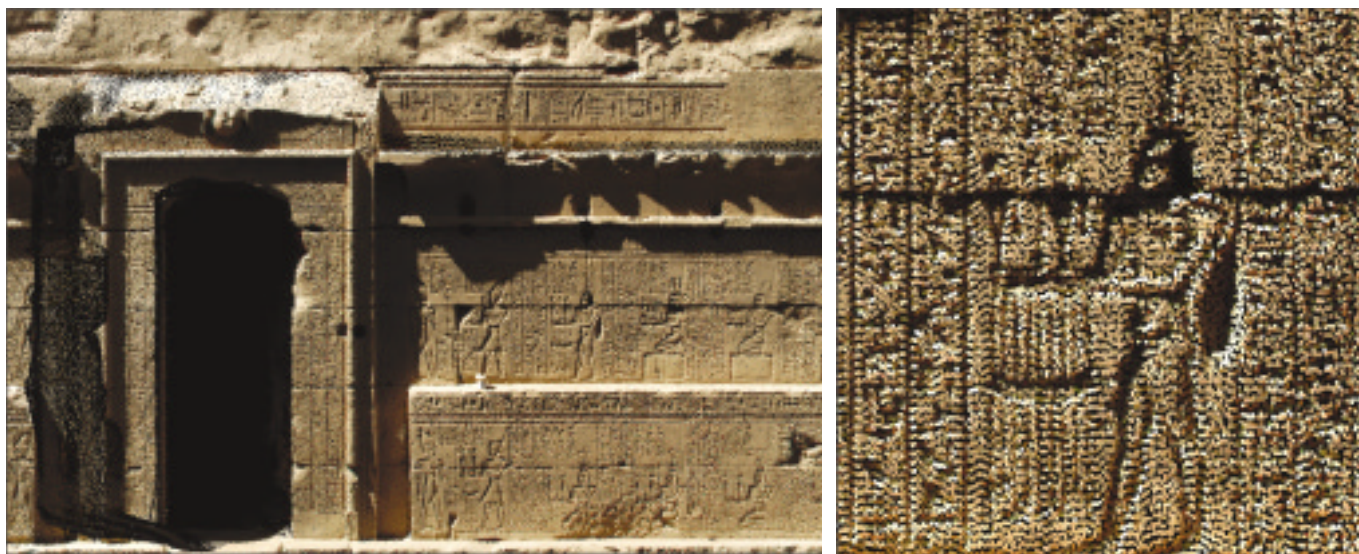


Fig. 3 : Extrait et détail du nuage de points 3D colorés acquis sur le temple

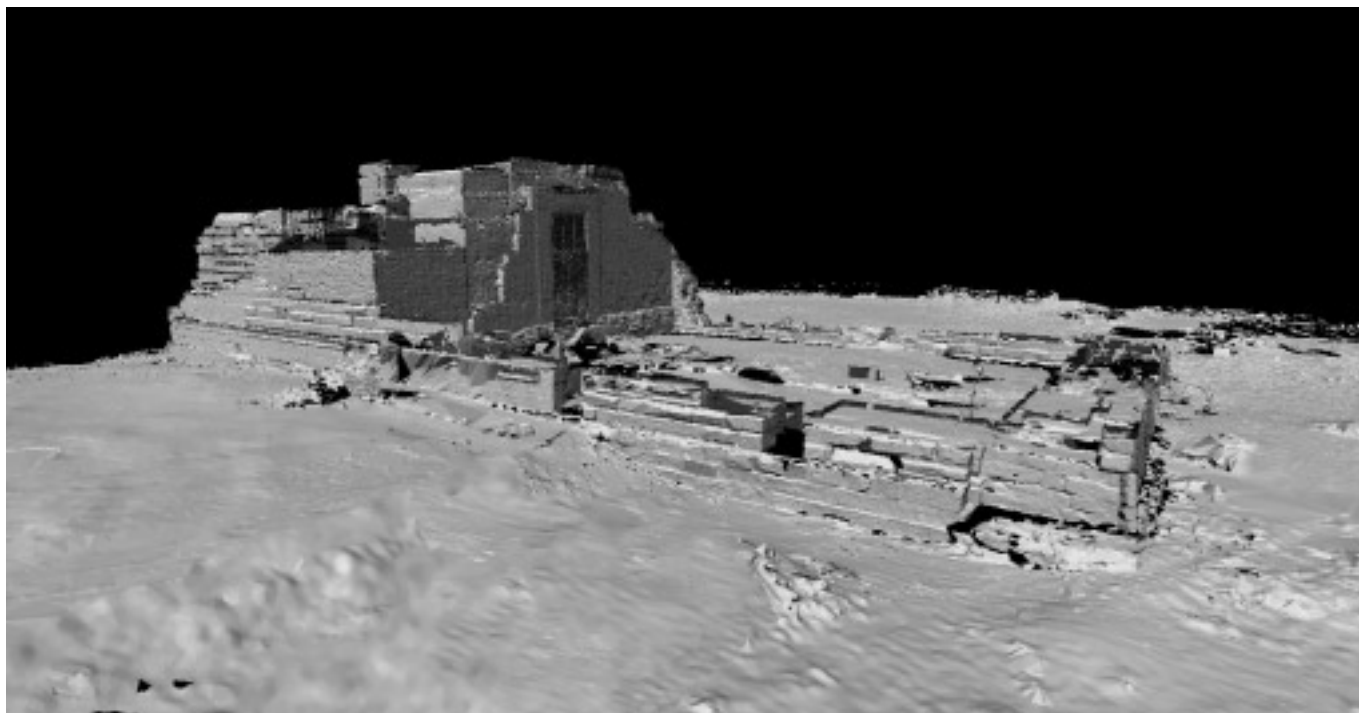


Fig. 4 : Le modèle topographique 3D du temple et de son environnement immédiat

Concernant l'exploitation cartographique du modèle, l'utilisation d'outils d'extraction automatique a permis de fournir des coupes dans les 3 axes (fig. 5). Ces résultats ont été livrés au format dxf pour être ensuite exploités par le CFEETK. Ultérieurement, des éléments cartographiques pourront être extraits selon les besoins, à partir de plans de coupe particuliers.

Pour chaque élévation, les prises de vues numériques complémentaires ont été réalisées au moment où l'incidence du soleil était rasante, ce qui a permis d'enregistrer des images riches en information épigraphique en évitant un contraste trop fort. Le traitement des mesures denses réalisées parallèlement au scanner a abouti à l'extraction de modèles numériques précis du relief de chaque élévation.

La solution d'orthorectification développée par ATM3D a associé chaque modèle aux prises de vues photographiques pour aboutir à une couverture orthophotographique au 1/50 en couleur des élévations extérieures du temple et des élévations intérieures de sa salle hypostyle (fig. 6). Enregistrés au format autocad, les documents contiennent chacun une image orthophotographique à l'échelle et calée en altitude, à laquelle

est superposée un calque contenant des courbes de niveau représentant le relief de l'élévation.

Ce format permet de superposer d'autres couches d'informations vectorielles. Il est par exemple possible de digitaliser les contours de chaque élément visible, de mesurer des distances ou des rayons de courbure et d'ajouter des commentaires. L'orthophotographie constitue alors un document de fond sur lequel l'architecte peut appuyer son étude. C'est aussi un document d'archive remarquable, figeant précisément la géométrie et

l'état du monument à l'instant de la prise de vues.

Les orthophotographies permettent aussi d'affiner le réalisme d'une modélisation infographique du monument. Le traitement du modèle 3D brut d'acquisition consiste à dégauchir les principales arêtes puis à alléger considérablement le maillage couvrant les surfaces relativement planes. Le but est d'obtenir un fichier le plus léger possible qui conserve un maximum de précision géométrique. La perte de précision graphique est compensée en utilisant les orthophotos comme texture

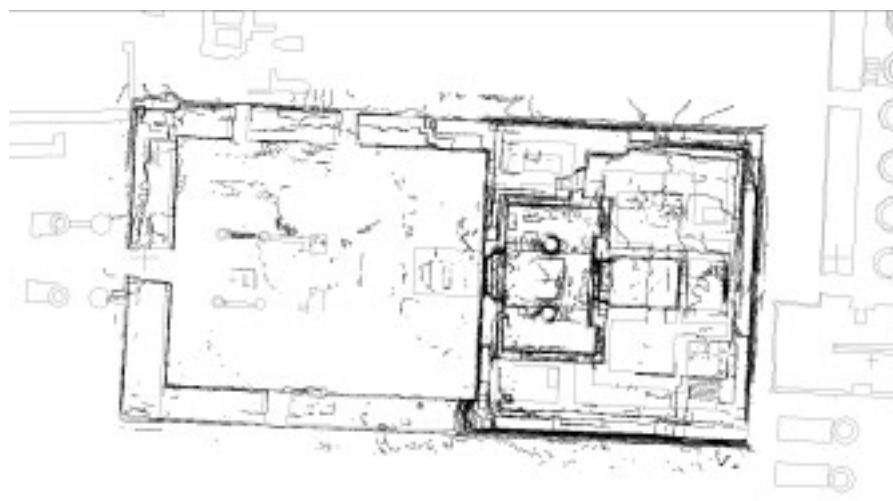


Fig. 5 : extraction de 52 coupes horizontales, à raison d'une coupe tous les 20 cm



Fig. 6 : vue de l'élévation intérieure Nord de la Salle hypostyle et orthophotographie correspondante

drapée sur chaque élévation. Le résultat est un modèle très réaliste exploitable en imagerie de synthèse pour des productions vidéos destinées au grand public.

Les perspectives

Les performances et la rapidité d'acquisition de cette technologie de relevé entraîne de profonds changements dans la méthode d'analyse de l'étude architecturale.

Traditionnellement, c'est pendant le relevé dessiné qu'est menée l'étude proprement dite. Bien que longue et parfois fastidieuse, cette étape du travail impose une concentration et une attention qui assure une bonne observation du vestige. Désormais avec le scannage 3D, les étapes sont dissociées : le relevé devient plus objectif et se rapproche du document photographique. Si la méthode se généralise, l'analyse et l'observation minutieuse de l'architecte se feront désormais en aval, une fois le relevé réalisé.

D'autre part, la précision de cette technique permet de procéder en une seule étape au relevé architectural et épigraphique, où habituellement la discipline

égyptologique dissocie les deux types d'observation. Cet aspect fédérateur qu'apporte le scannage 3D photogrammétrique est une avancée déterminante dans l'observation des monuments de l'Égypte antique car elle permet de mettre en relation architecture et décors.

Ces changements dans l'acquisition des données et la méthode d'analyse impliqueront inévitablement une modification du regard sur les vestiges étudiés. Mais ces dernières remarques demeurent sans doute insignifiantes au vu des bouleversements qu'apportera l'usage généralisé du scannage 3D. ●

Quelques liens Internet

<http://cipa.icomos.org>: le 6^e groupe de travail du CIPA, Comité International pour la Documentation du Patrimoine Culturel (comité mixte ISPRS/Icomos), étudie les outils et méthodes d'acquisition par scannage 3D appliqués au Patrimoine Culturel.

<http://www.cfeetk.cnrs.fr>: le site internet du Centre Franco-Egyptien des Etudes des Temples de Karnak.

<http://www.atm3d.com/scan3d.htm>: quelques exemples de réalisation dans le domaine du Patrimoine Culturel.

Contact

Bertrand CHAZALY

Ingénieur Géomètre Topographe
Société ATM3D

Savoie technolac - House Boat n° 7 - BP 269
73375 Le Bourget du Lac CEDEX
Tél. : 04 79 25 11 73

Mel: contact@atm3d.com

Site internet: <http://www.atm3d.com>

Emmanuel LAROZE

Architecte CNRS

CFEETK - Karnak

Tél./fax: 00 20 95 376227

Mel: laroze@ifrance.com

ABSTRACT