

Numérisation 3D et déroulé photographique des 134 colonnes de la Grande Salle Hypostyle de Karnak

■ Laure CHANDELIER - Bertrand CHAZALY - Yves EGELS - Emmanuel LAROZE - Daniel SCHELSTRAETE

■ MOTS-CLÉS

Scanner laser 3D, relevé 3D, modèle 3D maillé, lasergrammétrie, photogrammétrie, orthophotographie, relevé épigraphique, Egypte Antique.

Les décors pariétaux des colonnes monumentales de la Grande Salle Hypostyle du temple de Karnak résistent depuis toujours à la représentation graphique qui permettrait de les apprécier dans leur ensemble. Clichés photographiques, parties de relevé, dessins etc. : ces techniques ne permettent généralement de saisir qu'une partie du décor. Or pour les chercheurs, une représentation globale des décors est souvent une base indispensable pour mener une étude épigraphique ou archéologique. En Egypte, où les décors couvrent l'ensemble des parois des temples, la problématique du relevé est particulièrement intéressante. Ainsi, malgré leur renommée, les décors des 134 colonnes n'ont jamais pu être relevés ni représentés dans leur globalité. La difficulté réside d'abord dans la géométrie des colonnes qui est un support non planaire. Un ambitieux programme de relevé a été initié, mettant en œuvre des techniques de pointe fondées sur la photogrammétrie et le scannage laser 3D. Ce projet doit produire une documentation inédite : le déroulé ortho-photographique des décors pariétaux des 134 gigantesques colonnes, ainsi que des coupes architecturales sur la grande salle. Pour mener à bien ce défi technique, une recherche approfondie sur les outils et les méthodologies de relevés a été menée entre différents partenaires. Le Centre National de la Recherche Scientifique, l'Ecole Nationale des Sciences Géographiques et la société ATM3D spécialisée en lasergrammétrie, collaborent sur ce programme, sous la tutelle du Centre Franco-Égyptien d'Étude des Temples de Karnak et avec le soutien financier de la Fondation Simone et Cino del Duca¹. Au-delà des questions de représentation graphique, l'enjeu était aussi la mise au point d'une procédure d'intervention visant à optimiser au maximum l'opération, compte tenu du nombre de colonnes, de la fréquentation touristique du site et du temps imparti pour réaliser les travaux.

Le contexte

La salle hypostyle de Karnak se situe entre le IIe et le IIIe pylône construits respectivement par Horemheb (-1323 à -1295) et Amenhotep III (-1391 à -1353). Dans ce vaste espace d'environ un demi hectare, se dressent 122 colonnes de part et d'autre de l'allée centrale composée de 12 grandes colonnes papyrifères à chapiteau ouvert. Cette forêt de colonnes évoquant un fourré de papyrus succède à la grande cour et forme une sorte d'anti-chambre avant d'entrer dans le temple proprement dit : l'Ipet-Sout. Il semble que la construction ait été entreprise en plusieurs étapes ; les 12 colonnes de la nef centrale pourraient avoir été dressées par Horemheb pour former une sorte de colonnade d'entrée comme celle du temple de Louqsor. Les autres, disposées au nord et au sud de cette nef auraient été construites plus tard par Séthi Ier (-1291 à -1278). La décoration a été réalisée au cours de trois

régnes. Séthi I^{er} n'a décoré que les colonnes de la moitié Nord de la salle alors que Ramsès II (-1278 à -1213) et Ramsès IV (-1153 à -1146) sont intervenus sur toutes les colonnes sauf pour

ce dernier, sur certaines au sud-ouest et trois dans l'angle sud-est. Chaque colonne a une, deux ou plusieurs scènes gravées qui comportent elle-même une, deux ou plusieurs divinités².



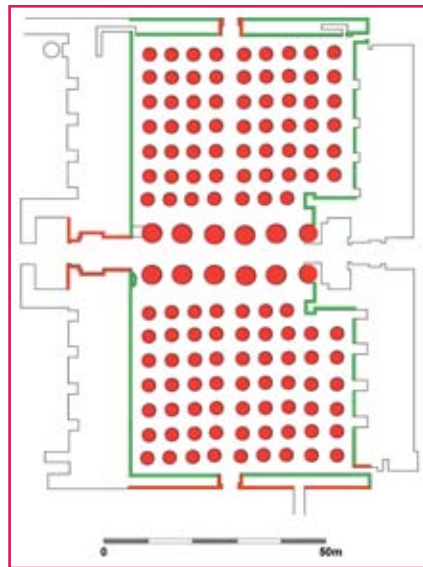
La salle hypostyle de Karnak succède à la grande cour et forme une anti-chambre avant l'entrée dans le temple proprement dit.

► L'histoire

Au sein même de l'équipe du CFEETK, le photographe Antoine Chéné (CNRS), a mis au point et breveté un système ingénieux pour photographier "en développé" les décors des vases : la périphotographie³. Le principe consiste à faire tourner le vase devant un appareil photographique qui reste fixe, obturateur ouvert et dont le film se déroule simultanément avec le mouvement de rotation du vase. Grâce à ce système de prise de vue, on obtient un cliché photographique avec une représentation déroulée du décor. Pour photographier en déroulé des supports cylindriques de plus grande dimension telle que des colonnes ou des bornes milliaires, Antoine Chéné développa un autre système : le périgyrophot, une variante du système précédent. L'objet ne pouvant pas subir de rotation, c'est l'appareil photographique lui-même, monté sur un rail circulaire, qui tourne autour de la colonne. Les prises de vues se faisant dans l'obscurité, le projecteur tournant en même temps que l'appareil photo permet d'obtenir un éclairage homogène de la surface de la colonne. C'est dans le cadre du projet documentaire des parois de la salle hypostyle que l'usage du périgyrophot a été envisagé puisqu'il était le seul moyen technique de l'époque, capable de photographier sur un cliché l'ensemble du décor des colonnes. Toutefois, deux problèmes se sont posés pour l'emploi de cette solution mécanique :

- La forme et les dimensions extrêmes des colonnes qui, de 2 à 3,5 mètre de diamètre et de 13 à 20 mètres de haut, demandaient une adaptabilité du système et la mise en place d'un échafaudage impressionnant.
- Si radialement, le déroulé pouvait convenir, verticalement, la projection géométrique restaient une projection centrale et ne correspondait pas à une projection cartographique exacte, surtout si l'objet présentait un relief irrégulier comme c'est le cas des colonnes.

Finalement, face à la lourdeur des moyens à mettre en place et dans l'attente d'une nouvelle solution



Etat de la documentation du CFEETK sur la salle hypostyle. En vert, les zones traitées, en rouge celles restant à publier.

technologique, la documentation photographique s'est concentrée dans un premier temps sur l'ensemble des parois de la salle⁴. Parallèlement, dès le début des années 80, Yves Egels avait réalisé au sein de l'IGN une projection de mercator d'une coupole peinte de Saint Aignan sur Cher, avec un orthoprojecteur OR1 de Wild, puis le déroulé conique de la chemise du donjon du Louvre pendant les fouilles préparatoires de la pyramide de Pei, et le déroulé intérieur et extérieur de la tour de Pise, dans les années 1990. La solution réside aujourd'hui dans une approche totalement numérique. Depuis plus de 10 ans, sont développés des programmes informatiques qui, à partir d'une série de prises de vues et des mesures topographiques, aboutissent à la génération d'une image numérique déroulée d'un objet de révolution (colonnes, tours, dômes)⁵. Cette solution informatique a l'avantage d'être applicable à n'importe quel objet, pourvu qu'il soit de révolution. Elle a par exemple été utilisée en 2000 pour restituer au 1:50° toutes les élévations intérieures des tours cylindriques du Château de Blandy-les-Tours en Seine-et-Marne, dont son donjon de 8 m de diamètre et de 30 m de haut⁶. Plus récemment Elise Meyer⁷ s'est intéressée au sujet en consacrant son mémoire de fin d'étude sur la problé-

matique de représentation d'un décor appliqué sur des surfaces non planes⁸.

Dans notre cas, la solution optimum pour produire une représentation déroulée des décors fut établie grâce à un couplage de la technique du scannage 3D à une couverture photographique. D'un point de vue technique, la procédure élaborée requière l'association de deux types de données : un modèle numérique 3D de la salle – c'est-à-dire une représentation de la géométrie du support des décors – et une couverture complète d'images photogramétriques. La mise en place d'un réseau topographique très précis est également indispensable pour permettre de géoréférencer et donc d'unifier l'ensemble de ces données. Les capteurs et les techniques d'acquisition étant différents l'opération s'est déroulée en deux étapes : une première campagne organisée en novembre 2007 fut consacrée à la numérisation 3D tandis que la seconde qui s'est déroulée six mois plus tard s'est intéressée aux prises de vues photogramétriques.

Numérisation 3D géométrique

La numérisation 3D ou lasergrammétrie est une science ou une technique en plein essor qui exploite la technologie des scanners laser 3D (mesure laser haute densité, sans contact et longue portée). Un scanner 3D lève plusieurs millions de points en trois dimensions en



Le scanner Riegl LMS Z 390 dans la salle hypostyle.



Caractéristiques du scanner Riegler LMS Z 390 utilisé

- Portée mini 1 m
- Portée maxi 300 m à 400m
- Précision sur 1 point (1 sigma): 6 mm
- Précision par compensation : 2 mm
- Champ horizontal: 360°
- Champ vertical : 80°
- Système d'inclinaison calibré permettant de basculer la tête de -90° à +90° au pas de 5°
- Résolution angulaire maxi : 0.0025° (soit un point tous les 4 mm à 100 m)
- Vitesse d'acquisition : de 6500 à 10 000 points à la seconde
- Information enregistrée pour chaque point acquis : coordonnées XYZ, intensité de réflexion
- Capteur laser de classe I

Extrait du nuage de points 3D acquis dans la salle hypostyle.

quelques minutes, Le principe consiste à enregistrer en 3D tout ce qui est visible dans le champ de vision de l'appareil, généralement sur 360°. Les points 3D peuvent être tellement denses que l'on parle de nuage de points.

Le paramètre de base étant la résolution angulaire de l'appareil, la densité des points mesurés à la surface de l'objet à numériser varie beaucoup selon la distance et l'orientation de chaque élément de surface de l'objet. Si le scanner n'est pas face à l'objet et si la surface est irrégulière, la densité ne sera pas homogène et des masques vont apparaître. C'est systématiquement le cas. Pour compenser ce problème, il faut multiplier les positions de numérisation autour de l'objet, pour assurer la couverture la plus dense et la plus homogène possible.

Si la lasergrammétrie est devenue aujourd'hui performante, le contexte de la salle hypostyle de Karnak était très contraignant. Les espaces entre les colonnes sont en effet si étroits qu'ils empêchent l'installation convenable des capteurs. Ce manque de recul associé à l'effet de masque des 134 colonnes qu'il faut contourner a contraint à multiplier les stations de scannage. A ces difficultés s'est également ajoutée l'obligation d'œuvrer sans perturber les circulations quotidiennes des milliers de visiteurs.

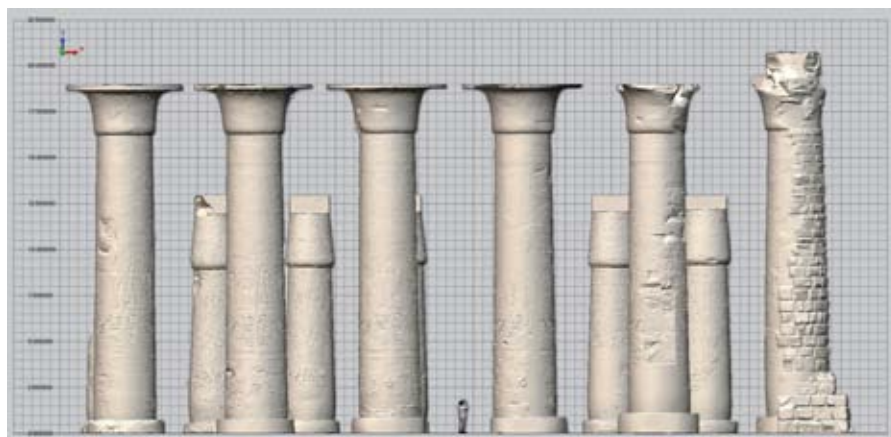
C'est donc après une longue période de réflexion que la stratégie d'intervention fut établie dont les objectifs

visaient essentiellement à optimiser le nombre de stations de l'appareil, tout en garantissant une densité suffisante et un recouvrement convenable des mesures. Au total, ce sont près de 300 stations de scan qui ont été réalisées. Pour chaque station, une acquisition tête droite et deux acquisitions tête inclinée à + et -50° a permis l'enregistrement d'un nuage totalement sphérique de 3.8 millions de points. Afin de couvrir l'ensemble de la salle à raison d'un point tous les 5 mm en moyenne, ce sont près d'un milliard de points qui ont été enregistrés.

Brut d'acquisition, ce nuage topographique flotte dans l'espace. C'est pourquoi, le scanner doit également numériser finement des repères disposés sur et autour de l'objet et dont on aura préalablement déterminé les coordonnées par un levé tachéométrique de précision pour que

les données soient transformées dans un système connu de coordonnées. Afin d'éliminer l'erreur de positionnement relative entre les positions de scan, une consolidation a ensuite été opérée à l'aide du logiciel Polyworks d'Innovometrics, appuyée sur une position de référence réalisée au centre de la salle (algorithme ICP, Iterative Closest Point).

Le traitement de ces données 3D a permis de réaliser pour chaque colonne un modèle numérique 3D précis dont la modélisation s'appuie sur la reconstitution la plus fine possible de la surface de la colonne. La mesure issue d'un scanner est discrète et non continue, c'est-à-dire que l'espace entre chaque point mesuré reste vide. Pour les combler, des solutions informatiques ont été développées pour cette technologie en reliant les points du nuage par des



Les modèles 3D maillés des colonnes au nord de la travée centrale.



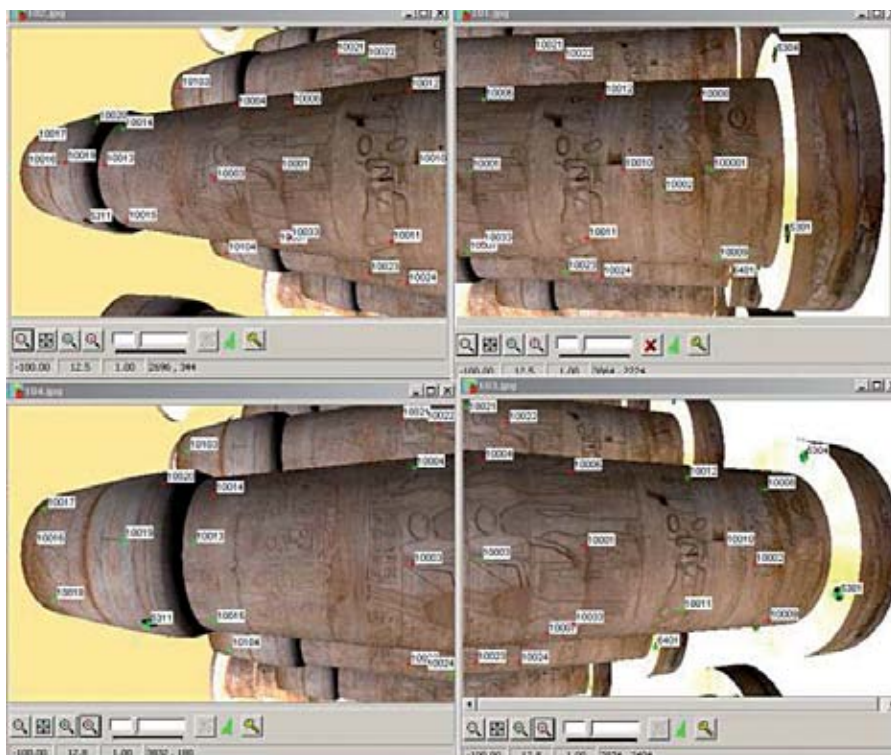
triangles. Cette opération permet d'obtenir un modèle maillé triangulé qui constitue une véritable archive 3D. Bien entendu, la qualité de ce modèle dépend directement de la densité et de l'homogénéité du nuage de points sur la totalité de l'objet scanné. Sur la base de cette archive numérique il est possible d'extraire toutes les informations géométriques possibles dont par exemple : l'orientation exacte de l'axe de chaque colonne, le volume précis et par conséquent le poids de chacune, la surface des zones décorées, etc...

La campagne de relevé photogrammétrique

L'information acquise par un scanner, aussi précise soit elle, reste exclusivement géométrique. Or toutes les géométries ne se distinguent pas seulement par leur relief mais aussi parfois par leur couleur. Ce problème, récurrent en archéologie et en architecture, c'est posé dans notre cas avec les motifs peints des décors pariétaux des colonnes. Pour répondre à cette problématique, les scanners 3D sont donc fréquemment couplés à des chambres de prises de vues photogrammétriques dont la calibration permet de lier géométriquement chaque pixel d'une photographie numérique aux points 3D acquis dans le même temps.

Dans le cas de la salle hypostyle cependant, les prises de vues photographiques acquises depuis les scanners ne permettent pas d'obtenir des résultats satisfaisants. Il s'agit d'une question de résolution des images et surtout d'incidence des rayons perspectifs des prises de vues. Pour obtenir une couverture photographique exploitable, il fallait optimiser la prise de vues en vis-à-vis qui garantisse une résolution suffisamment fine pour enregistrer les détails.

C'est donc lors d'une seconde campagne que l'acquisition photographique a été entreprise⁹ en collaboration avec une équipe de huit étudiants de l'École Nationale Supérieure des Sciences Géographiques (ENSG-IGN), dirigée par Yves Egels, Daniel



Test d'aérotriangulation sur images de synthèse calculées sous POV-Ray.

Schelstraete et Laure Chandelier. Avant toute chose, les enseignants du DIAS (Département d'Imagerie Aérienne et Spatiale de l'ENSG) ont défini la méthodologie à suivre pour mener à bien le relevé. Les élèves géomètres ont été impliqués dans cette phase de préparation. Ce travail était indispensable car de nombreuses questions étaient en suspens.

Comment réaliser la prise de vue en respectant les contraintes de la photogrammétrie, de résolution image (2-3 mm) et le temps disponible



(4 semaines de travail sur place), entre 134 colonnes monumentales (13 m de haut pour la plupart, 20 m pour les 12 colonnes de l'allée centrale) espacées de seulement 2 m en moyenne ?

Une étude poussée a été entreprise afin de déterminer les paramètres à fixer avant la mission : configuration de la prise de vue (nombre de stations autour de la colonne, de photos sur une verticale), choix de l'appareil photo, nombre et localisation des points d'appui. Le but était d'obtenir une précision de l'ordre de 1 à 2 pixels correspondant à la résolution terrain de 2 à 3 mm.

Une configuration jugée optimale a été définie "sur le papier" en fonction de la géométrie de la salle et des différents appareils photos envisageables. Pour couvrir entièrement la hauteur des colonnes, il a fallu placer respectivement à 2 et 8 m de hauteur (base de la prise de vue), 2 x 2 appareils photographiques orientés vers le haut et le bas afin d'obtenir un angle de champ suffisant. L'intégralité de la colonne est acquise en tournant autour selon 8 positions. Des simulations informatiques ont été réalisées à la fois pour valider cette configuration et définir le réseau de points d'appui : la salle a été dessinée schématiquement (toutes les colonnes



sont identiques !) sous Moray, logiciel de modélisation de données en 3D pour POV-Ray. POV-Ray, quant à lui, a permis de simuler des prises de vue photo par des techniques de "lancer de rayon". Pour s'approcher de la réalité, les colonnes virtuelles ont été texturées avec un échantillon des décors d'une des colonnes. Quatre points d'appui à la base de chaque colonne ont été ajoutés ainsi que des points de contrôle sur le haut des colonnes.

Une aérotriangulation de ces 32 images de synthèse a ensuite été calculée avec le logiciel Comp3D pour vérifier la robustesse de la configuration de prise de vue envisagée, en assurant au sommet des colonnes une précision équivalente au bruit du scanner laser (moins de 5mm). Les mesures de points de liaison avaient été faites manuellement, ce qui a permis d'estimer la durée de cette opération, environ une journée par colonne, avec un risque d'erreurs assez élevées en raison de la répétitivité des hiéroglyphes couvrant les colonnes. Cela a mis en évidence la nécessité d'automatiser autant que possible cette phase cruciale. Mais les tests de faisabilité et de précision ne pouvaient pas être menés sur les images de synthèse, dont la radiométrie et la résolution n'étaient pas assez représentatives de la réalité du terrain.

Ces différents tests ont permis de valider le nombre et la position des photos et des points d'appui. Au final, 32 photos étaient donc nécessaires pour couvrir chaque colonne : 4 photos sur 8 positions "verticales". Il a par ailleurs été confirmé que quatre points d'appui sur les bases de chaque colonne sont suffisants pour effectuer le calage des images dans le système du laser.

Il est apparu indispensable de réaliser simultanément les 4 photos verticales pour accélérer au maximum l'acquisition photographique.

Le choix des appareils photo à utiliser a été un compromis entre les différentes contraintes, opérationnelles autant que photographiques. La simulation avait montré que 10 mégapixels avec une focale équivalente de 35 mm convenaient. Pour des raisons pratiques, il

fallait utiliser quatre appareils identiques, qu'il fallait pouvoir commander et contrôler (cadrage, ombres et contre-jours, qualité radiométrique, visibilité des cibles) à partir d'un PC.

Le choix s'est porté sur du matériel Canon G9 non réflex, acquis par ATM3D, d'un poids raisonnable pour être manipulés sur une perche de 8 mètres. Ils ont pu être pilotés par ordinateur à distance avec le logiciel "PSRemoteMulti100" de Breeze qui offre toutes les possibilités de réglages, de prévisualisation des images, et qui permet de nommer efficacement les images acquises. Une déconvenue, malheureusement, avec le matériel choisi : l'incompatibilité de la télécommande avec l'enregistrement des images en format brut, et un lissage de débruitage trop violent des images JPEG, qui pénalise les traitements photogrammétriques automatiques. Les quatre Canon G9 ont été étalonnés géométriquement à l'ENSG avant la mission terrain. Et, par sécurité, un polygone d'étalonnage a été mis en place au CFEETK, ce qui a permis de plus d'étalonner plusieurs appareils du centre, et de former plusieurs archéologues du site et d'Alexandrie à la prise de vues et aux traitements photogrammétriques simples, qui ont été appliquées sur d'autres monuments (Temple d'Opet).

Il restait à confronter la théorie à la pratique : Huit élèves¹⁰ et trois enseignants du DIAS se sont envolés pour l'Égypte le 26 avril 2008. Cette équipe a été renforcée par deux ingénieurs d'ATM3D¹¹ et par des membres du CFEETK¹². Ensemble, il a fallu faire preuve d'ingéniosité et de sens pratique pour construire le mât de 8m de haut qui supporterait les quatre appareils photos reliés à un ordinateur portable. Ce mât devait être facilement déplaçable dans les allées de la salle hypostyle.

Au total, pendant les 4 semaines de mission, environ 1000 stations photos ont été effectuées et complétées par des prises de vues spécifiques pour les cas particuliers (colonnes du bord de la salle, pour lesquelles il n'y a pas de recul suffisant et grandes colonnes de l'allée centrale). Les qualités d'organisation des élèves ont été mises à rude



Le mât de prise de vue accueille 4 appareils photo numériques pilotés au sol par un ordinateur portable.

épreuve : entre les facéties des touristes et l'éclairement du soleil à gérer, une organisation rigoureuse était indispensable. Afin d'obtenir des photos ayant un éclairage le plus constant possible, il a été décidé d'effectuer la totalité des prises de vue lorsque la zone d'intérêt de la colonne est à l'ombre.

Le nombre final d'images s'élève à environ 4400. Un important travail de vérification de ces photos a été réalisé sur place afin de s'assurer de leur bonne qualité radiométrique et de leur exhaustivité. Les élèves ont donc été sensibilisés aux notions de qualité géométrique et radiométrique des photos.

Parallèlement, pour permettre le géoréférencement des images, des cibles de 5cm de diamètre (visibles sur les photos), avaient été collées sur la base des colonnes. Chaque point de calage a été déterminé par topométrie à partir de plusieurs stations avec des tachéomètres. Le logiciel de compensation Comp3D a été utilisé pour calculer leurs positions à une précision millimétrique. Enfin, une base de données de ces points a été constituée afin de documenter et pérenniser ce travail.





Extrait de la base de données photographiques.

► Un traitement monumental !

Reste à exploiter cette montagne de pixels... Pour l'ENSG, cela signifie en premier lieu la détermination du géoréférencement des images dans le système du modèle 3D laser acquis par ATM3D.

Pendant la mission, les élèves ont entamé le calcul des aérotriangulations (il y en aura 134...). Réalisé manuellement, ce travail est long et fastidieux et doit impérativement être réduit (la simulation avait montré que cette phase devait consommer plus de 6 mois opérateur à plein temps...).

Des développements ont donc été entrepris sur place pour automatiser au maximum ce processus. Les méthodes traditionnelles de corrélation étaient ici inefficaces, car toutes les images sont assez fortement convergentes (environ 45° d'une station à la suivante, et la plupart des points sont visibles sur 3 images de chaque station et sur 3 stations successives). On a donc opté pour des techniques modernes de traitement d'images et notamment sur la mise en correspondance d'images avec SIFT¹³ (Scale Invariant Feature Transform), qui est bien adaptée aux images présentant de grandes variations d'échelle et de rotation. Cette phase, utilisant un algorithme programmé dans le processeur de la carte graphique (implémentation SiftGPU¹⁴), ne prend que 3 à 4 secondes par image.

L'appariement des points d'intérêt a été développé spécifiquement sur place, en tenant compte de la géométrie parti-

culière et répétitive de la prise de vues, la caractéristique principale étant la recherche directe de points de multiplicité maximale, en ajoutant les contraintes photogrammétriques données par la connaissance approchée des stations et des colonnes. Cette phase, assez combinatoire mais entièrement automatique, consomme environ une heure de temps processeur. Elle fournit environ 4000 points de liaison par colonne, vus en moyenne sur 3 images ; le taux de faux appariement atteint souvent 30%, et parfois 50 %, cela étant dû aux fortes ressemblances entre les décors des diverses colonnes. Comp3D, logiciel de compensation multicapteurs (topo, scanner, photogrammétrie) a été aménagé de façon à rendre la détection et l'élimination de ces faux appariements entièrement automatiques.

Reste à réaliser manuellement la mesure des quelques points d'appui visibles sur chaque image. Les écarts-types obtenus sont proches de 1 pixel, c'est-à-dire 3 mm sur la colonne cible.

Les enseignants du DIAS ont finalisé la chaîne de traitement qui a été transmise à ATM3D pour le calcul complet des aérotriangulations.

Cette étape est achevée. Elle précède une nouvelle phase, la plaquage des images photogrammétriques sur les modèles 3D, qui aboutit à la réalisation du résultat définitif : les déroulés photographiques haute résolution des colonnes.

Cette nouvelle phase est en cours de traitement et devrait aboutir à la fin de l'année 2009. Ce plaquage des images,

réalisé mathématiquement par méthodes photogrammétriques, est la clef qui ouvre la porte à la représentation graphique globale, complète et détaillée des décors des colonnes. Pour chaque photographie, elle prend en compte les déformations dues à la perspective, les imperfections de l'objectif utilisé, le relief de l'objet lui-même et sa forme cylindrique.

Le processus mis en œuvre au final utilise les mêmes transformations mathématiques qui sont utilisées pour générer un planisphère. La projection est ici cylindrique. La détermination de l'emplacement exact dans un système de coordonnées cylindrique de chaque 'pixel' des photographies permet de dérouler numériquement chaque colonne de manière à la mettre à plat, en 2D. Le document technique issu de ce processus offre aux épigraphistes une représentation globale et détaillée de l'ensemble des décors.

Conclusion

Le traitement des données en cours ne s'achèvera pas complètement d'ici la fin de l'année.

Un atlas présentant un déroulé ortho-photographique des décors de chaque colonne et une cartographie complète de la salle seront réalisés dans la perspective d'une publication. Sur la base de cette documentation inédite, l'étude épigraphique sera conduite par les docteurs Peter Brand et Jean Revez professeur d'histoire à l'UQAM (Université de Québec à Montréal) et membre du GRCAO,



Vue en élévation et déroulé orthophotographique de la colonne 2n (travée centrale, coté nord).

tous deux en charge des travaux scientifiques de la salle.

Par ailleurs, il est envisagé de diffuser les résultats de ce programme à un public plus large, sous la forme d'une interface interactive (dvd, site internet...) afin que chacun puisse facilement étudier ou contempler cette magnifique œuvre architecturale. A partir de la documentation numérique produite, il sera en effet possible de réaliser le chemin inverse, c'est-à-dire d'enrouler chaque image numérique haute résolution pour la draper sur le modèle 3D de la colonne correspondante. Le modèle numérique texturé complet de la salle est donc parfaitement envisageable. Il sera ainsi possible, nous l'espérons, de naviguer virtuellement dans la salle hypostyle. ●

Contacts

Laure CHANDELIER (IGN/ENSG)

Bertrand CHAZALY (ATM3D)

Yves EGELS (IGN/ENSG)

Emmanuel LAROZE (UMR8152 CNRS)

Daniel SCHELSTRAETE (IGN/ENSG)

Liens

www.cfeetk.cnrs.fr

www.ensg.ign.fr

www.atm3d.com

<http://history.memphis.edu/hypostyle/>

www.grcao.umontreal.ca/

Références

- (1) Ce prix, sans lequel ce programme n'aurait pu aboutir, a été décerné au CFEETK par l'Institut de France. Une note d'information relative aux premiers résultats des travaux a été présentée à l'Académie des Inscriptions et Belles-Lettres le 15 mai 2009. Bertrand Chazaly et Emmanuel Laroze "Relevés des colonnes de la grande salle hypostyle de Karnak", CRAIBL, à paraître.
- (2) Louis - A. Christophe 1954, *Les divinités des colonnes de la grande salle hypostyle et leur épithètes*, IFAO, Le Caire, p. 1-5.
- (3) A. Chéné, *Une nouvelle méthode pour photographier les inscriptions sur support cylindrique : le périgraphot*, Bulletin de l'Ecole Antique de Nîmes n°20, Nîmes, 1990, pp. 113-118.
- (4) Arnaudès A., Chéné A., *Les parois de la salle hypostyle de Karnak*, Études égyptologiques 2, Éditions Cybèle, Paris, 2003. (DVD compatible Mac OSX/PC, UNIX/LINUX).
- (5) Karras G.E., Patias P., Petsa E., Ketipis K., 1997. *Raster projection and development of curved surfaces*. International Archives of Photogrammetry & Remote Sensing, 32(5C1B), pp. 179-185.
- (6) Chazaly B., 2001. *Cylindrical orthophotography. Complete coverage of inside/outside cylindrical surfaces such as castle towers*, Proc. XVIIIth international symposium of CIPA, Potsdam.
- (7) Elise Meyer, *la photogrammétrie pour le relevé épigraphique des colonnes de la salle hypostyle du temple de Karnak*, revue XYZ, n°102, 1^{er} trimestre 2005
- (8) Meyer, E., Parisel, C., Grussenmeyer, P., Revez, J., Tifadi, T., 2006. *A computerized solution for the epigraphic survey in*

Le chantier en résumé

- 264 positions de scan laser 3D réalisées en 3 semaines
- 3.8 millions de points par position
- Précision des mesures 3D après consolidation : 6mm
- 4400 prises de vues numériques enregistrées en 4 semaines
- 12 millions de pixels par image
- Résolution à la surface des colonnes : 2mm
- 133 Déroulés cylindriques centré sur l'axe moyen du tronc principal de chaque colonne
- Résolution des déroulés ortho : 3mm

Egyptian Temples. In, Journal of Archaeological Science, Volume 33, Issue 11, November 2006, Pages 1605-1616.

- (9) G. Véron, *134 colonnes à la une*, Le journal du CNRS, n° 231, avril 2009, pp. 28-30 ; Anonyme, "L'ENSG au temple du soleil", IGN Magazine 49, 2008, pp. 16-17.
- (10) Sylvain Audel, Julie Cheikbossian, Stéphane Coetmeur, Basile Jouan, Jeremy Maillard, Cédric Melet, Nicolas Pourre et David Bourdon.
- (11) Bertrand Chazaly et Yvan Robin.
- (12) Topographes : Antoine Marmousez et Louis Elia ; photographes : Jean-François Gout, Clément Apffel et Lucie Moraillon.
- (13) Lowe, David G., 1999. *Object recognition from local scale-invariant features*. Proceedings of the International Conference on Computer Vision. 2. pp. 1150-1157
- (14) Changchang Wu, University of North Carolina at Chapel Hill, <http://cs.unc.edu/~ccwu>.

Photos : © CFEETK, ATM3D et l'ENSG

ABSTRACT

The Temple of Karnak is one of the largest Temple in the World. The Great Hypostyle Hall contains 134 papyrus columns, each column is between 13 and 20 m in height and 3.5 m in diameter. The hieroglyphic engravings of the columns still had to be study. 3D laser scanning and photogrammetric surveys, undertaken in November 2007 by a french team have already produced a complete coverage of the columns with accurate 3D models and high resolution stereo photography. Using cylindrical projection, the data will soon lead to the production of an accurate unrolled true color image of each column.