

Une nouvelle colonne dans la salle hypostyle de Karnak

récit d'une méthode de restitution

■ Yves EGELS - Emmanuel LAROSE - Jean REVEZ - Owen MURRAY - Peter BRAND

Lorsqu'il est question de restituer des monuments de pierre effondrés, on peut penser que la méthode la plus évidente consiste à numériser en 3D des blocs, afin que l'intelligence artificielle d'une machine puisse retrouver leur position relative dans la construction. La vérification des connexions entre les blocs se ferait ainsi virtuellement sur la base d'un modèle 3D. Si la méthode est séduisante, les archéologues qui sont confrontés à de telles problématiques préfèrent généralement déplacer les blocs à l'aide d'un engin de levage. La manipulation d'objets virtuels demeure en effet encore difficile et souvent l'affaire de spécialistes. Quant à la recherche des éventuelles connexions entre ceux-ci, le contrôle se fait encore presque toujours manuellement et de manière empirique, sur la base de dessins ou de photographies, de la même manière que le ferait un joueur devant les pièces d'un puzzle.

NDLR : sauf indication contraire les illustrations sont des auteurs.

Ces pratiques se confrontent néanmoins régulièrement à des contraintes budgétaires ou administratives : d'une part, la mise à disposition d'une grue sur un chantier de fouille est onéreuse et d'autre part, la manipulation de pièces archéologiques n'est pas toujours autorisée (quand les éléments à rapprocher ne sont pas

disséminés sur plusieurs lieux de stockage). Cette réalité peut ainsi conduire à employer d'autres méthodes basées en particulier sur des relevés, qui ont bénéficié en une décennie d'importants progrès techniques. Les outils de photogrammétrie en particulier se sont considérablement développés et simplifiés : il est désormais possible

■ MOTS-CLÉS

Relevé 3D, photogrammétrie, orthophotographie, anastylose, restitution, Égypte Antique, temple, colonne.

de modéliser rapidement et à moindre coût un objet quelconque. À l'heure actuelle, les relevés demeurent une base d'étude essentielle pour les archéologues qui se sont emparés de ces nouveaux outils d'acquisition, dont les performances et la polyvalence ouvrent jour après jour de nouvelles perspectives de recherche.

L'expérience récemment menée à Karnak pour tenter de restituer des colonnes aujourd'hui disparues illustre les possibilités offertes par ces récentes évolutions techniques. Le résumé de ce travail, dont il est ici question, présente une méthode originale qui a été élaborée et utilisée pour retrouver l'emplacement relatif de blocs de tambour.

Le contexte

La mission Karnak Great Hypostyle Hall Project dirigée par Peter Brand de l'Université de Memphis et Jean Revez de l'Université du Québec à Montréal

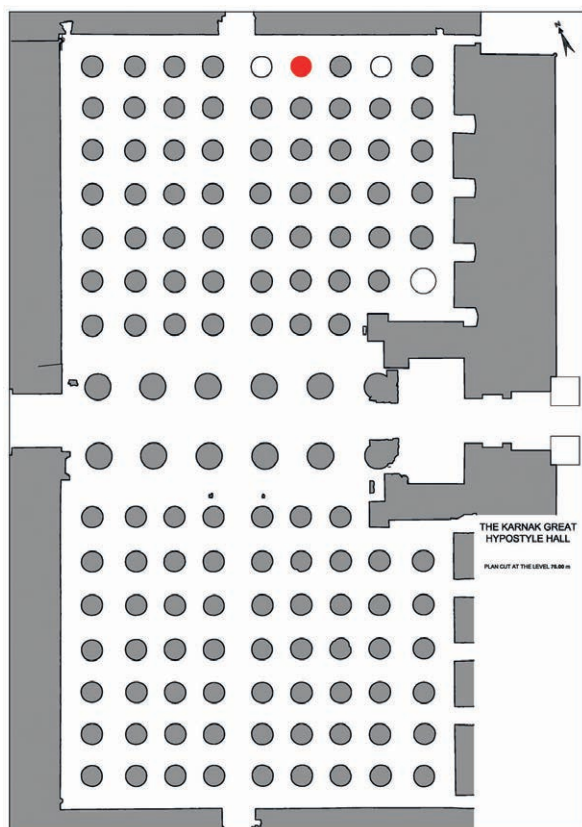
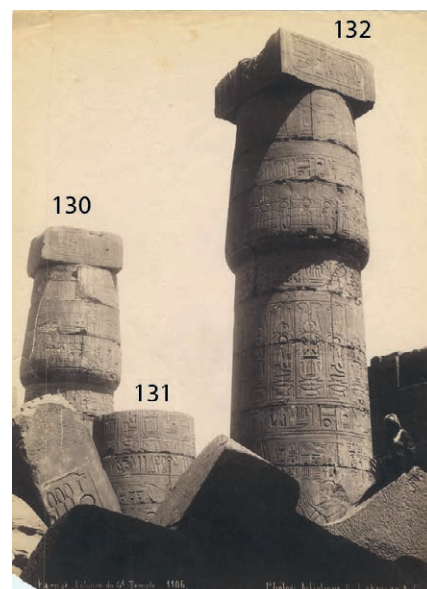


Figure 1. Plan de la salle hypostyle de Karnak. En rouge, position de la colonne 131.

Figure 2. Vue aérienne de la partie nord de la salle hypostyle montrant l'emplacement des colonnes manquantes.

Figure 3. La colonne 131 à la fin du XIX^e siècle avant son démontage.



(UQÀM) étudie les décors qui couvrent les parois de la fameuse salle aux 134 colonnes du grand temple dynastique d'Égypte [Brand, 2011 & 2013]. Depuis 2004, elle a entrepris l'ambitieux projet de relever l'ensemble des décors de ses colonnes. Outre le gigantisme des structures et donc l'importance de la superficie à couvrir — près de 1,5 hectare —, l'opération s'est confrontée au défi technique de produire des images à plat de surfaces courbes [Chandelier, 2009]. Les prises de vues qui ont été saisies au fil des différentes campagnes ont permis de produire deux séries de déroulés : des représentations de la colonne complète et des images en haute définition des scènes, c'est-à-dire des parties du décor dans lesquelles apparaissent les figures du roi et des dieux, là où l'information épigraphique est la plus riche¹. L'ensemble de cette documentation est traité et devrait prochainement être mis en ligne. Sur le terrain, l'équipe s'intéresse désormais aux blocs de tambour

appartenant aux colonnes de la salle qui sont dispersées sur le site. Les grandes colonnes centrales étant complètes, cette étude ne concerne que les "petites", c'est-à-dire celles qui se répartissent en nombres égaux dans les deux nefs latérales. Parmi les 122 colonnes de ce type que comptait jadis la salle, trois d'entre elles situées sur la rangée la plus septentrionale ont totalement disparu. Les autres sont majoritairement entières ; seules 13 ont une assise manquante ou plus. Les colonnes complètes sont composées, à quelques rares exceptions près, de 14 assises et mesurent du sol au sommet de l'abaque (gros monolithes de section carrée qui sont situés entre le chapiteau et l'architrave) 12,84 m de hauteur en moyenne. Chaque tambour est constitué de deux demi-blocs adossés disposés de façon à ce que le joint montant se croise alternativement d'une assise à l'autre. La colonne 131 dont il est ici question est l'une de celles qui ont disparu (*figures 1 et 2*). Comme en témoignent quelques notes écrites et des clichés tirés d'archives conservées principalement en France et en Égypte, la colonne était encore partiellement debout à la fin du XIX^e

siècle [Azim, 2004] (*figure 3*) tandis que gisaient au pied plusieurs tambours de ses assises supérieures. En fait, bien que la colonne voisine 130 ait été démontée en 1898, tout porte à croire que ses assises en place n'ont été démontées qu'au début de l'année 1901, afin de faciliter les dégagements et refaire de nouvelles fondations pour les colonnes qui s'étaient écroulées dans ce secteur, après le dramatique effondrement de la partie nord de la salle hypostyle en 1899. Les blocs ont alors été stockés avec d'autres à l'extérieur de la salle, principalement au nord, à l'endroit même où nous les avons retrouvés un siècle plus tard (*figure 4*).

¹ Pour les détails techniques de cette opération, voir le blog du photographe Owen Murray : <https://owensark.com/2015/02/hypostyle-hall/>

La méthode

La restitution² de la colonne 131 s'est faite en plusieurs étapes. La première a nécessité de rechercher tous les blocs appartenant aux colonnes de la salle hypostyle sur le site de Karnak. Les blocs ont été retrouvés en différents endroits, souvent regroupés en petits lots. Leur identification n'a pas posé de problème compte tenu de leurs spécificités : il s'agit de demi-tambours d'environ 2,50 m de diamètre et de 0,93 m de hauteur, avoisinant 7 tonnes (figure 5). À ces blocs se sont également ajoutés quelques abaques. Enfin, un croquis sommaire et des mesures ont été réalisés pour chacun d'eux. Ce corpus établi, la seconde étape a consisté à rechercher les connexions entre les blocs.

Deux cas de figures devaient être étudiés : les liaisons horizontales, c'est-à-dire la recherche du bloc complémentaire qui permet de former un tambour complet, et les liaisons verticales entre des blocs situés sur les assises inférieures et supérieures.

Sur le plan iconographique et épigraphique, les rapprochements se sont essentiellement basés sur l'analyse du décor. Celui-ci a pour avantage d'être bien normalisé, étant constitué par ce que l'on appelle des scènes de don et de contre-don, dans lesquelles le pharaon et une série de divinités qui lui font face s'échangent des offrandes, une action rituelle qui vise à symboliser la paix et l'ordre qui régnait entre les sphères royale et divine. Une même scène et les textes l'accompagnant se chevauchaient ainsi horizontalement et verticalement sur plusieurs blocs de pierre, ce qui rend possible l'assemblage de tambours de colonne en fonction de plusieurs critères : l'orientation des personnages dans les scènes ; le type de gravure utilisé par les lapicides (le relief étant taillé soit en champlevé, soit en creux) ; l'emplacement sur le tambour de la reproduction dans la pierre du décor végétal évoquant la plante de papyrus ; le contenu stéréotypé et

2 Le mot "restitution" n'a pas la même signification en photogrammétrie : *relevé métrique d'un objet à partir de photographies*, et en archéologie : *reconstitution de l'état primitif hypothétique d'un monument à partir de ses composants ruinés*.



Figure 4. La zone de dépôt de blocs au nord de la salle hypostyle où sont stockés plusieurs tambours de la colonne 131.



Figure 5. Deux blocs formant un tambour complet dans la zone de stockage sud. Remarquer les deux demi-mortaises taillées dans le lit d'attente qui s'alignent parfaitement.

redondant des textes hiéroglyphiques qui sont bien connus des égyptologues ; et enfin, la présence ou non d'inscriptions palimpsestes dans une scène, lorsque les traces d'un décor ancien sont toujours visibles sous une phase plus récente de regravure. Tous ces indices permettent de déterminer à quelle hauteur dans la colonne chaque tambour de colonne pouvait se loger [Revez, 2012 & 2015].

Du point de vue architectural, toute cette information est par ailleurs corroborée par le diamètre du tambour qui variait en fonction de sa position en hauteur dans la colonne ; celle-ci est en effet

de forme tronconique. La hauteur des blocs n'était pas non plus homogène d'une assise à l'autre, ce qui permet d'identifier deux demi-tambours appartenant à une même rangée. Le contrôle de la connexion entre deux demi-tambours d'une même assise pouvait d'autre part compter sur un détail constructif : des mortaises taillées sur le lit d'attente. Ces petits logements creusés presque toujours par paire, à cheval sur deux blocs à liasonner, étaient destinés à recevoir une agrafe en bois. L'information donnée par cet indice est discriminante car la position des mortaises, taillées au moment de la



pose, était toujours différente. La bonne correspondance deux à deux des 4 demi-mortaises était par conséquent un moyen sûr pour valider le recollement entre deux blocs d'une même assise.

Malgré ces indices, il était pour plusieurs raisons très difficile de retrouver des connexions entre les tambours. La première était relative à l'aspect non planaire des surfaces décorées. Quand une simple photographie aurait suffi à comparer le décor d'une surface plane, il aurait fallu dans notre cas multiplier les clichés entraînant par conséquent une gestion plus complexe des données. Si les blocs que nous avons étudiés étaient dans l'ensemble relativement bien regroupés, les conditions très serrées de leur stockage rendaient leur observation peu commode. Dans l'idéal, il aurait été utile de les regrouper dans un même endroit et de les organiser par type, mais cela aurait nécessité d'importants moyens, tant financiers que techniques, que la mission ne pouvait pas envisager. Les blocs étant fragiles ou incomplets, cette opération aurait dans tous les cas été délicate et problématique. Pour toutes ces raisons, il fut décidé d'opter pour une solution non "intrusive" basée sur une manipulation virtuelle des blocs. Ainsi chacun d'eux fut modélisé en 3D par photogrammétrie. Dans un premier temps, ils furent photographiés lorsqu'ils étaient à l'ombre, ce qui était relativement contraignant en termes de temps de travail. En effet, nous ne disposions pour le faire que d'une plage horaire quotidienne de deux heures. On avait préalablement posé trois cibles sur le sommet du bloc et mesuré leur distance pour pouvoir mettre le modèle à l'échelle. Plus tard, les prises de vues furent réalisées sous une structure mobile permettant de faire de l'ombre, et un flash fut utilisé afin d'assurer un éclairage homogène mais contrasté sur l'objet. Les blocs n'ayant pas été déplacés, seuls le parement et un des lits peuvent être traités, avec parfois l'amorce du contre-parement si le bloc est assez dégagé.

Sur la base d'un petit corpus de blocs modélisés, nous avons ensuite procédé au déroulé individuel des demi-tambours. Après plusieurs années de travail sur les colonnes de la salle, nous



Figure 6. Ortho-image en plan d'un couple de demi-tambours et déroulés des décors correspondants.

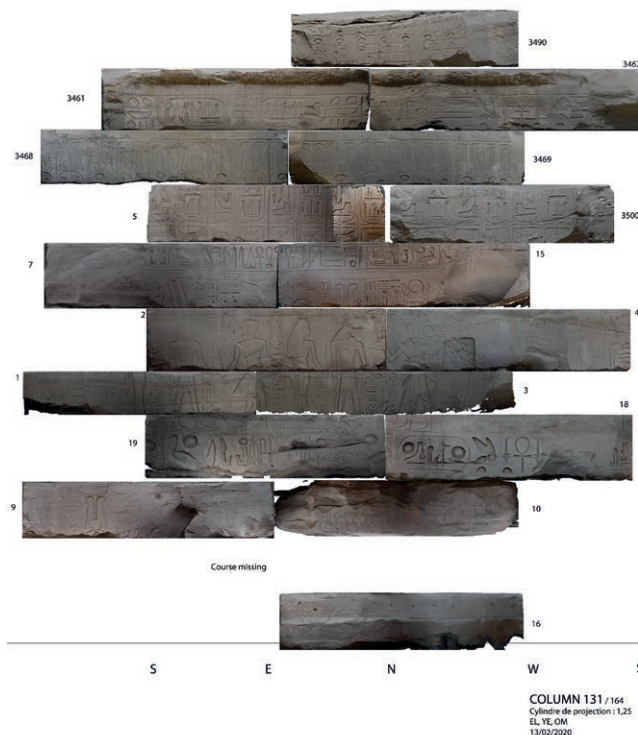


Figure 7. Restitution de la position des blocs de la colonne 131 à partir des images déroulées.

avons en effet élaboré plusieurs outils et acquis une bonne expérience sur cette technique. Il nous semblait d'autre part plus commode de travailler avec une documentation bidimensionnelle plutôt qu'avec les modèles 3D, leur manipulation demeurant encore assez complexe (figure 6). Ainsi à partir de celle-ci, nous avons produit des déroulés en projetant l'image du décor sur des cylindres moyens. Il fallait toutefois pour cela déterminer avec précision leur centre à partir de modèles qui ne présentaient qu'une portion de courbe. Cette difficulté technique fut résolue par le développement d'une fonction dans le logiciel *Cumulus* qui permettait par une procédure par itération de déterminer l'axe moyen d'une surface cylindrique ou conique. Par le biais de ce procédé,

nous avons produit une collection de bandelettes qu'il était facile de visualiser dans le but de les assembler. Le travail de restitution consistait alors à les faire coulisser les unes en dessous des autres, afin de vérifier un rapport étroit entre les divers éléments du décor (figure 7). L'étude attentive de quelques clichés anciens sur lesquels pouvait apparaître une partie de la colonne en place ou des blocs en chute ont par ailleurs été très utiles pour établir certaines connexions. Notons à cet égard, que la grande salle hypostyle du temple de Karnak est vraisemblablement le monument d'Égypte ayant été le plus photographié, après les fameuses pyramides de Gizeh, une conjoncture propice qui nous a grandement facilité le travail de reconstitution du monument. Dans ce cas, le travail



consistait à les identifier sur les images, mais également sur le terrain. De la trentaine de blocs que nous avons étudiés, nous sommes donc ainsi parvenus à en regrouper 17 appartenant à la colonne 131 et à établir des connexions sur une seconde colonne.

Un outil adapté

Déplacer virtuellement des solides dans l'espace est un processus informatique très simple. Tout visualiseur 3D doit y parvenir sans effort, par exemple en utilisant l'interface graphique OpenGL, qui fournit toutes les fonctions nécessaires. Le choix d'un logiciel sera plutôt guidé par des considérations d'ergonomie. La restitution des 20 demi-tambours de la colonne a permis de spécifier les fonctionnalités souhaitables. Le développement a été réalisé à partir de *Cumulus*, logiciel libre d'exploitation de modèles 3D à finalité archéologique, développé par un des membres de l'équipe. Cette option permettait de profiter de fonctions déjà présentes dans le logiciel, en y ajoutant les fonctionnalités propres à l'anastylose et de développer une interface de commande adaptée.

Nous sommes partis du postulat que l'automatisation du remontage des blocs n'était ni possible dans une opération de relativement faible ampleur comme c'est le cas ici, ni même probablement souhaitable, dans la mesure où les critères de remontage sont très variés. Bien entendu, la forme géométrique est impérative, mais encore faut-il qu'elle ait été conservée depuis la ruine du monument. Certains blocs sont cassés, ont été retaillés, réemployés, des joints y sont restés collés et seule la moitié des faces est modélisée. Rappelons que par principe, les blocs n'ont été ni déplacés ni restaurés. Le logiciel doit permettre de s'assurer que les blocs sont en contact, ou, sinon, aider l'architecte à déterminer pour quelle raison ils ne le sont pas.

Mais d'autres critères géométriques sont également à prendre en compte. Dans le cas particulier de la colonne, la forme générale est un fuseau de révolution (qui a été ravalé après la construction). L'alignement des centres et la perpendicularité de l'axe aux plans de joints sont



Figure 8. Un chantier de remontage à Médamoud. L'installation d'un bloc nécessite deux opérateurs : le grutier assure le déplacement du bloc dans l'espace, tandis que le tailleur de pierre, posté devant le lieu de pose, agit manuellement sur sa rotation et son éventuelle inclinaison.

des critères déterminants, de même que le diamètre et la conicité des parements. Les colonnes des temples égyptiens portent une riche épigraphie, en grande partie sculptée (et dans ce cas visible dans le modèle 3D), mais aussi simplement gravée ou peinte, qui ne peuvent être représentés que par une texture photographique détaillée. Et le passage par un puzzle 2D d'orthophotos déroulées de chaque demi-tambour accélère grandement la recherche des blocs connexes. Toutes ces fonctionnalités étaient déjà présentes dans *Cumulus*, plusieurs ayant été développées pour des phases antérieures du programme de documentation de la salle hypostyle. Restait donc à concevoir un dispositif ergonomique de déplacement de blocs.

Un moyen simple de concevoir une interface efficace est de recopier un système ayant donné satisfaction depuis longtemps (Interface Homme-Machine métaphorique) ; ce n'est pas très original, mais c'est efficace. L'observation de plusieurs chantiers de reconstruction (bien réels, cette fois) montre qu'il faut deux opérateurs : un grutier, qui manœuvre sa grue en général axe par axe (monter, descendre, droite, gauche, etc.) — tout au moins dans la phase fine du remontage —, et un tailleur de pierre qui dirige le grutier par signes en se plaçant au bon endroit pour évaluer le positionnement du bloc et son accord avec les éléments déjà remontés (*figure 8*). Tout cela fonctionne très bien, à une exception près : l'orientation du bloc, qui ne peut être modifiée que par rotation autour

de l'axe vertical, et à la main. Pour les autres axes, il faut reposer le bloc et le soulever à nouveau. L'interface pourra mimer ce fonctionnement, l'important étant de permettre simultanément et simplement des déplacements du bloc et de l'observateur, et de découpler autant que possible les mouvements de translation et de rotation suivant chaque axe. L'implémentation choisie ne permet effectivement qu'un seul des six mouvements à la fois, avec des pas de déplacement liés au zoom appliqué à l'image, ce qui permet de les affiner autant que nécessaire. Contrairement à la grue, il est possible de déplacer des groupes de blocs, et donc de créer des sous-ensembles cohérents qui seront ensuite assemblés. On pourra aussi retirer un bloc inférieur sans risque d'écroulement de la structure.

Reste le problème du contrôle des accostages. Il peut être séparé en deux : détecter des intersections de volumes, et estimer l'écart entre les deux faces du joint. Une méthode simple a été implémentée pour le premier cas : il suffit d'inverser le sens de la surface d'un des blocs pour voir apparaître la partie d'un autre bloc qui se trouverait à son intersection. Mais son efficacité n'a pas pu être réellement testée sur ce chantier, parce que les blocs y sont de forme assez stéréotypée, et que les faces arrière et inférieure n'ont pu être modélisées en raison des masques sur les photos. Pour l'estimation de l'écart entre blocs, le manipulateur pourra s'aider d'une carte en teinte hypsométrique, calculée en temps réel en manipulant





Figure 9. Contrôle d'accostage. Modèle 3D de la statue d'Isis du phare d'Alexandrie aimablement communiqué par Isabelle Hairy, Architecte-archéologue au CRES (Mondes Pharaoniques), CNRS, UMR8167 (Orient & Méditerranée). En haut à gauche, relief normal. En haut à droite, le modèle des jambes est inversé : la mortaise d'assemblage apparaît. En bas, cartographie hypsométrie temps réel de la surface de contact : rouge = pénétration, noir = contact, vert = séparation.



les buffers de profondeur de OpenGL ; mais, pour la même raison, cela n'a pas encore pu être évalué en détail. Cette fonctionnalité a été testée sur des blocs provenant d'un autre site (la statue monumentale d'Isis du phare d'Alexandrie), dont les éléments avaient pu être modélisés en entier (figure 9). Sans doute une prochaine mission pourrait-elle fournir des données plus complètes pour Karnak.

Les résultats

Ces nouvelles fonctionnalités ont permis le remontage virtuel en 3D des blocs, et le positionnement de cette colonne à sa place dans la salle hypostyle (figure 10 et 11). À ce jour, environ 130 blocs provenant des colonnes de la salle hypostyle ont été identifiés sur le terrain. La plupart ont d'ores et déjà été photographiés et attendent d'être modélisés en 3D. Dans le sillage des premiers résultats, nous



Figure 10. Remontage virtuel en 3 dimensions de la colonne 131 à partir des modèles des blocs.

envisageons de retrouver leur position d'origine avec les mêmes procédés. Ce travail devrait en grande partie être poursuivi par les étudiants canadiens du département d'histoire de l'Université du Québec à Montréal sous la direction de Jean Revez. Ainsi, outre des résultats inédits, la capacité de la méthode à être partagée et appliquée par différentes personnes constitue l'autre réussite de cette expérience. ●

Contact

Yves EGELS (IGN/ENSG), yves.egels@free.fr
Emmanuel LAROZE (CNRS, UMR8167), Emmanuel.Laroze@univ-paris1.fr
Jean REVEZ (Université du Québec à Montréal), revez.jean@uqam.ca
Owen MURRAY (OMMPhotography), omurray@ommphoto.ca
Peter BRAND (University of Memphis), pbrand@memphis.edu

Bibliographie

- AZIM, M., REVEILLAC G. (2004). *Karnak dans l'objectif de Georges Legrain*. Catalogue raisonné des archives photographiques du premier directeur des travaux de Karnak de 1895 à 1917, Paris, p. 146-147, p. 160-161.
BRAND J., REVEZ J., KARKOWSKI J., LAROZE E., GOBEIL C. (2013). *Karnak hypostyle hall project, report on the 2011 field season of the university of the Memphis & the Université du Québec à Montréal*, Cahiers de Karnak 14, p.193-229.
BRAND J., LAROZE E., REVEZ J. (2013). *Le projet américano-canadien de relevé des colonnes de la grande salle hypostyle de Karnak : Objectifs globaux et méthodologie*, JSSEA 38, 2013, p.17-34.
CHANDELIER L., CHAZALY B., EGELS Y., LAROZE E., SCHELSTRAETE D. (2009). *Numérisation 3D et déroulé photographique*



Figure 11. Les colonnes 131 (remontée), 132 et 134 (en place).

des 134 colonnes de la Grande Salle Hypostyle de Karnak, XYZ n°120, p. 33-39.

MEYER E. (2005). *La photogrammétrie pour le relevé épigraphique des colonnes de la salle hypostyle du temple de Karnak*, XYZ n°102, p. 33-38.

REVEZ J., BRAND J. (2012). *Le programme décoratif des colonnes de la grande salle hypostyle de Karnak : bilan de la mission canado-américaine de 2011*, Bulletin de la société française d'égyptologie 184, p. 10-38.

REVEZ J., BRAND J. (2015). *The Notion of Prime Space in the Layout of the Column Decoration in the Great Hypostyle Hall at Karnak*, Cahiers de Karnak 15, p. 253-310.

Pour en savoir plus

<https://www.orient-mediterranee.com/>
<https://www.memphis.edu/hypostyle/>
<https://histoire.uqam.ca/>
<https://owensark.com/2015/02/hypostyle-hall/>

<http://www.cfeetk.cnrs.fr/>
<https://www.ensg.eu/>

ABSTRACT

This article deals with the virtual restitution of a 13 m high column standing initially inside the Great Hypostyle Hall of the Pharaonic temple at Karnak in Egypt. A dozen of the original 134 columns are incomplete and three of them have entirely disappeared. Hundreds of loose drums belonging to those columns are scattered all over the archaeological site; we have been able to identify most of them, making it now possible to rebuild the missing columns. Since these blocks are heavy and very difficult to move around, the decision was made to reconstruct the columns in a virtual environment. In order to do so, we have created a 3D model of the blocks by means of photogrammetric processing, with the help of specific tools that we have developed for this task.