

La photogrammétrie pour le relevé épigraphique des colonnes de la salle hypostyle du temple de Karnak

■ Élise MEYER

Le relevé épigraphique d'un temple est essentiel pour comprendre son fonctionnement et pour procéder à sa reconstitution. En effet, les hiéroglyphes forment un discours qui peut permettre de relier les blocs et fragments éparpillés de l'édifice. Il est nécessaire de pouvoir le réaliser aussi bien pour des murs que pour des éléments architecturaux plus complexes (colonnes, statues,...) et souvent inaccessibles. À l'heure actuelle, le relevé de l'épigraphie des temples égyptiens est effectué essentiellement à main levée sur un support papier. La plupart du temps il est réalisé uniquement sur des surfaces planes. L'étude présentée dans cet article propose une méthode permettant de relever par informatique des décors gravés sur des colonnes. Elle réalise l'adaptation et la programmation de formules de calcul générales de la photogrammétrie pour la reconstitution tridimensionnelle d'une colonne de la salle hypostyle du temple de Karnak et le relevé bidimensionnel de son épigraphie.

■ mots clés

photogrammétrie
architecturale, épigraphie,
modélisation informatique,
archéologie.

Cet article expose une méthode utilisant la photogrammétrie pour relever un décor pariétal gravé sur une surface non plane. L'étude réalisée a fait l'objet d'un Projet de Fin d'Études de l'INSA de Strasbourg. Elle s'inscrit dans le cadre de recherches menées conjointement par le GRCAO (Groupe de Recherche en Conception Assistée par Ordinateur) de l'Université de Montréal et le laboratoire MAP-PAGE (Photogrammétrie Architecturale et GEomatique) de l'INSA Strasbourg. Ces recherches portent sur un projet intitulé : "La modélisation informatique comme moyen de réflexion en archéologie : une approche nouvelle du relevé épigraphique et architectural appliquée au temple de Karnak." Le GRCAO en a été chargé par le Karnak Hypostyle Hall Project de l'Université de Memphis. Le contrat de collaboration signé entre les deux institutions permet au GRCAO de disposer de l'ensemble des données et matériels liés au projet de l'université américaine. Un des buts du projet est de relever les inscriptions des murs, mais aussi des 134 gigantesques colonnes de la Grande Salle Hypostyle. De plus, comme un des objectifs était notamment de pouvoir publier les textes hiéroglyphiques sous une forme papier, la méthode développée devait avoir un résultat bidimensionnel.

Ainsi, cette étude propose un moyen pour relever les décors pariétaux des colonnes dans un environnement bidimensionnel. Des outils informatiques ont donc été développés pour permettre aux épigraphistes de dessiner informatiquement des scènes et d'enregistrer leurs dessins avec leur signification, à des fins de manipulations ultérieures. La méthode mise au point est intéressante parce qu'elle se base uniquement sur une série de photographies de la surface de la colonne. Grâce au partenariat avec l'université de Memphis, elle a été testée au final sur une colonne de la Salle Hypostyle de Karnak.

Les outils de relevé ont été mis au point dans le logiciel AutoCAD, car il est universel, programmable et surtout accessible à tous. Le but des recherches effectuées étant de faire évoluer les méthodes de relevé épigraphique actuelles, il est nécessaire que les outils développés soient simples d'utilisation pour les épigraphistes à qui ils sont destinés.

La méthode de relevé épigraphique mise au point compte deux phases essentielles : la reconstitution tridimensionnelle d'une colonne, puis le développement de sa surface pour pouvoir y dessiner les signes hiéroglyphiques.

Cet article explique dans une première partie la construction d'un modèle filaire tridimensionnel de la colonne. Trois points sont à considérer : la stratégie d'acquisition des données, les données initiales de l'étude, et le tracé d'un cône théorique représentant la colonne.

La deuxième partie traite plus particulièrement du relevé épigraphique de la colonne. Elle se décompose aussi en trois phases : le développement du cône obtenu précédemment, l'orthorectification des photographies originales de la colonne, et enfin l'assemblage de ces orthophotographies pour pouvoir y dessiner les hiéroglyphes.

Reconstitution tridimensionnelle d'une colonne

La modélisation en trois dimensions d'une partie du fût de la colonne est réalisée par photogrammétrie, à partir de photographies couvrant toute la surface considérée et de points d'appui bien répartis sur cette surface.

■ ■ ■



Figure 1 : Colonnes de la salle hypostyle du temple de Karnak.

■ Stratégie d'acquisition des données

Comme on peut le voir sur les photographies ci-dessus (Figure 1), la densité des colonnes dans la salle hypostyle est très importante. Le diamètre des colonnes mesure autant que l'espacement entre elles : les fûts ont plus ou moins 2,8 mètres de diamètre alors que l'espace entre les fûts varie entre 2,6 et 3 mètres.

Il en résulte une telle compacité qu'il est difficile de trouver l'espace et le recul nécessaire pour prendre les photographies.

On peut cependant couvrir la colonne par huit prises de vues (situation idéale, mais on en a souvent moins) et assurer ainsi une couverture et un chevauchement suffisant de sa surface (Figure 2).

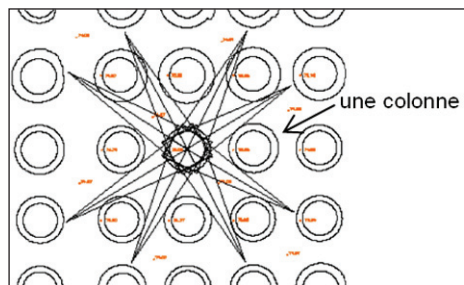


Figure 2 :
Configuration
idéale pour les
prises de vues
initiales.

Par contre, le recul maximal possible est de 8 à 9 mètres du centre de la colonne, soit 6.5 à 7.5 mètres de sa surface.

Étant donné la proportion de ces colonnes, la hauteur du fût est d'environ 12.5 mètres, ce qui représente "deux fois plus haut que loin". Il faut donc deux stations photographiques : une à 3 m pour couvrir de 0 à 6 m, et l'autre à 9 m pour couvrir de 6 à 12 m (plus justement deux fois huit stations pour toute la surface). Il reste que, près des murs de l'enceinte, le recul est encore réduit et il peut être nécessaire de prendre des clichés à trois niveaux. Ces contraintes sont imposées par le fait que l'on considère que les photographies vont être prises par l'épigraphiste lui-même avec le même appareil, sans changement d'objectif.

Le même problème se pose pour le levé topographique des points d'appui servant à la modélisation photogrammétrique. Ces points doivent être bien répartis sur toute la surface de la partie de colonne considérée et, l'espace étant restreint, il faut multiplier les stations topographiques. Cela demande du temps et des moyens matériels importants. Si on en dispose



Figure 3 : Photographies avec points homologues et polygones.

pas, il est toujours possible de créer un modèle indépendant de la colonne grâce au logiciel Photomodeler®. Ce modèle pourra ensuite être replacé "dans l'espace réel" grâce à trois points d'appui uniquement ou mis à l'échelle grâce à des mesures prises sur la colonne.

■ Données initiales de l'étude

Les seules données requises pour créer un modèle 3D d'une partie de la colonne sont donc huit clichés couvrant sa surface, et des points de calage bien répartis. Un minimum de six points homologues entre deux photos consécutives sont nécessaires, et trois points plus communs entre trois photos consécutives. Ces points sont cliqués sur les clichés dans Photomodeler® pour obtenir leur coordonnées 3D. Ils sont aussi placés sur les photos préalablement importées dans AutoCAD®, et reliés par des polygones pour une meilleure visualisation (Figure 3).

Le fichier des coordonnées tridimensionnelles des points, calculées par Photomodeler®, est aussi importé dans AutoCAD®. Un modèle filaire 3D de la colonne peut alors être réalisé.

■ Tracé d'un cône théorique à partir des points d'appui

La surface théorique des colonnes égyptiennes semble être celle d'un cône présentant un angle faible entre son axe et ses génératrices.

Pour mieux estimer la surface du fût de la colonne que l'on souhaite relever – et pour pouvoir ensuite développer cette surface (2^e étape de l'étude) – une polygone 3D a été tracée sur la base de points remarquables décrivant géométriquement ce cône (sommet, centre de la base...).

Elle nous permettra, à partir des points d'appui, d'avoir une vision filaire de la surface de la colonne à modéliser.

Les paramètres de la portion de cône qui forme le fût de la colonne sont obtenus grâce à un "algorithme de calcul du cône moyen d'un nuage de points"¹. Ces paramètres sont :

- les nombres directeurs de l'axe (a, b, c),
- un point de passage de l'axe (x, y, z),
- l'angle entre l'axe et une génératrice,
- la distance du point de passage à une génératrice.

On trouve une solution en modifiant de façon itérative les paramètres du cône, jusqu'à ce que la distance moyenne du nuage de points à la surface calculée du cône soit minimale.

Le cône est construit et mémorisé par les sept points suivants :

- le sommet [1]
- le point d'intersection entre l'axe du cône et un plan qui lui est perpendiculaire passant par le point de contrôle le plus haut (représenté par le "cercle haut [HC]") [2]
- le point d'intersection entre l'axe du cône et un plan qui lui est perpendiculaire passant par le point de contrôle le plus bas (représenté par le "cercle bas [LC]") [3]
- le point d'intersection entre "l'axe (OX)" et le cercle [LC] [4]
- le point d'intersection entre "l'axe (OX)" et le cercle [HC] [5]
- le point d'intersection entre "l'axe (OY)" et le cercle [HC] [6]
- le point d'intersection entre "l'axe (OY)" et le cercle [LC] [7]

Il est à noter que la recherche du meilleur cône passant par un nuage de points peut mener à un cône dont l'axe n'est pas nécessairement vertical, puisque la colonne peut avoir subi un léger affaissement ou inclinaison au cours du temps.

Le dessin suivant représente les points calculés dans Photomodeler® et la polygline 3D représentant le cône moyen de ces points (Figure 4).

(1) Shakarji, Craig M., [1998], Least-Squares Fitting Algorithms of the NIST Algorithm Testing System, Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology, Vol. 103, No. 6., november-december.

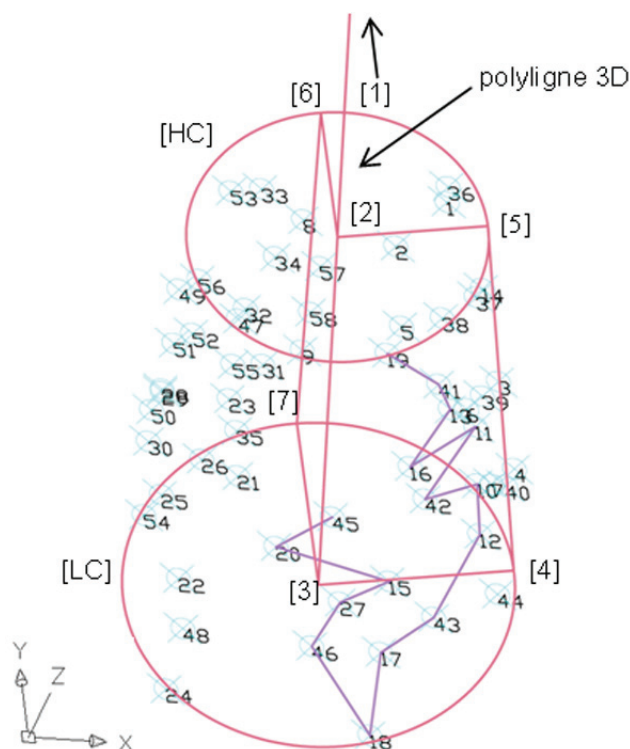


Figure 4 : Cône théorique dessiné à partir des points 3D.

Pour une meilleure visualisation en 3D, une des polyglines joignant les points communs entre deux photos a également été tracée. Grâce à cette représentation vectorielle de la colonne, il nous est désormais possible de développer la polygline précédente dans un plan, pour pouvoir y tracer l'épigraphie dans un environnement 2D.

Relevé épigraphique de la colonne

Afin de pouvoir restituer les hiéroglyphes de la colonne de manière fidèle (dessin à l'aide de courbes de Bézier), l'idée est de transformer cette surface conique en une surface plane. Ainsi, le relevé épigraphique des colonnes va pouvoir être assimilé au relevé des murs (ou autres surfaces planes). Des fonctions de dessin de hiéroglyphes, qui avaient déjà été développées par le GRCAO avant le début de cette étude, vont ainsi pouvoir être réutilisées également pour le relevé des surfaces coniques.

■ Développement du cône

Avant de pouvoir "aplatir" la surface de la colonne, il faut redresser le cône trouvé à partir des points d'appui. En effet, on se rappelle que le meilleur cône approximant le nuage de points n'est pas nécessairement vertical. Or, pour la simplicité des calculs de développement, il est plus simple de travailler sur un cône dont l'axe est vertical.

Un changement de repère a été calculé : il permet de déplacer le sommet du cône au point de coordonnées (0,0,0) et de

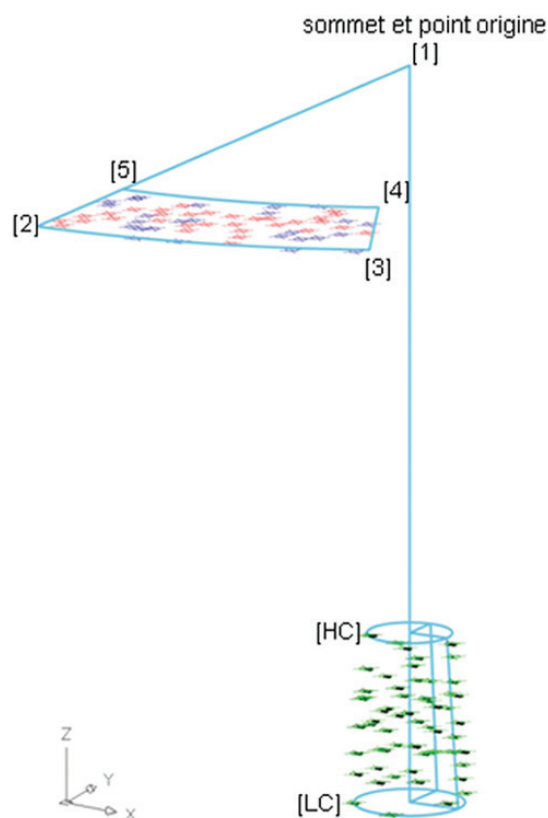


Figure 5 : Lien entre le modèle 3D et le développement du cône.

- rendre l'axe du cône parfaitement vertical. Le passage d'un système de coordonnées à un autre est possible à partir de quatre points homologues (non coplanaires) connus dans chaque système.

Ces quatre points sont choisis parmi les points de la polyligne décrivant le cône. Sachant que l'on souhaite amener le sommet à l'origine, les coordonnées de trois autres points dans le nouveau système se déduisent facilement.

Une matrice de transformation est calculée pour permettre le passage de tous les points du cône d'un système à l'autre. Les points d'appui sont replacés exactement "sur" la surface (théorique) du cône redressé par projection orthogonale. Le cône vertical peut alors être développé, c'est-à-dire que l'on va placer les points de la polyligne 3D dans un même plan.

Ainsi, la colonne peut aussi être décrite par le développement de sa surface soit :

- le sommet [1]
- la génératrice passant par le point d'intersection entre (OX) et le cercle [LC] (voir plus haut) [1-2]
- l'arc décrivant le développement de la circonférence du cercle, intersection entre [LC] et la surface du cône [2-3]
- la génératrice représentant la fin du déroulement [3-4]
- l'arc décrivant le développement de la circonférence du cercle, intersection entre [HC] et la surface du cône [4-5]

Soit un total de cinq points en plan (Figure 5).

Les points d'appui, qui avaient été projetés précédemment sur la surface du cône, sont également replacés sur le développement.

La méthode de calcul des coordonnées (X,Y) des points d'appui sur le développement est la même que pour les points de la polyligne (matrice de rotation). Leur coordonnée Z provient de la distance entre le point réel et le point projeté, qui est reproduite à la verticale de la surface développée.

Pour pouvoir dessiner les inscriptions hiéroglyphiques, il est désormais nécessaire d'orthorectifier les photographies originales de la colonne et de les insérer dans le développement.

■ Orthorectification des photographies

Pour placer les clichés "dans" le développement, il faut les transformer en orthophotographies. Les parties des photographies où apparaît le fût de la colonne vont être redressées, pour en avoir une "vue de face" sur laquelle l'épigraphie pourra être relevée en plan.

Le processus se fait en plusieurs phases :

- la première consiste à tracer sur la photographie de départ les bords du fût de la colonne (génératrices) et à générer leurs homologues sur le développement, de sorte à avoir les limites de l'orthophotographie à construire,
- la seconde réalise le transfert des "valeurs de couleur" des pixels de la photographie originale au développement.

Une nouvelle image est alors créée, à partir de l'assemblage de ces pixels, dans les limites tracées précédemment.

Pour obtenir les limites des sept photographies à construire sur le développement du cône, on utilise une fonction de "ré-enveloppement" permettant le passage de points du développement à la photographie originale.

Les étapes sont les suivantes :

- sur le développement, création d'un point et de la génératrice du cône passant par ce point,
- placement de ce point et de la génératrice sur le cône redressé : ceci se fait par changement de repère grâce à la polyligne décrivant le développement et à celle décrivant le cône normalisé,
- application des équations de la DLT inversées (passage "3D → photo") aux coordonnées-objets du point considéré (sur le cône redressé) et des deux points extrêmes de la génératrice, pour les replacer sur la photographie originale et tracer ensuite la génératrice.

Les équations de la DLT sont initialisées (calcul des coefficients de la transformation) en cliquant une polyligne reliant les points d'appui homologues entre une photographie et l'espace 3D du cône redressé.

La procédure d'enveloppement a été faite de sorte que l'on puisse voir "en temps réel" – simultanément aux mouvements de la souris – le déplacement du point choisi et de sa génératrice, en même temps sur le développement, le cône 3D redressé et la photographie.

Il est désormais possible de créer sur le développement les génératrices représentant les limites du fût de la colonne. Elles sont tracées en déplaçant la souris sur le développement et en contrôlant notre position sur la photographie originale (Figure 6).

Les photographies redressées sont ensuite générées de manière similaire, en appliquant la procédure de "ré-enveloppement" à toutes les positions (sur le développement) des pixels de l'image à générer dans les limites tracées précédemment.

Les pixels de la photographie originale correspondant à ces positions sont alors recherchés et leurs "valeurs de couleur" sont transférées dans le développement.

L'orthophotographie est alors créée en "assemblant" tous les pixels ainsi définis (Figure 7).

Il est possible de vérifier la position de l'orthophotographie créée grâce aux points d'appui, qui se retrouvent à la fois sur le cliché original et sur la photographie redressée.

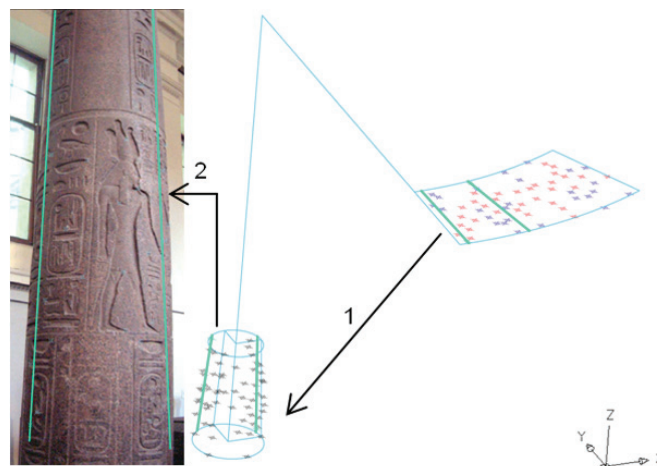


Figure 6 : Tracé sur le développement des limites de l'orthophotographie à construire.

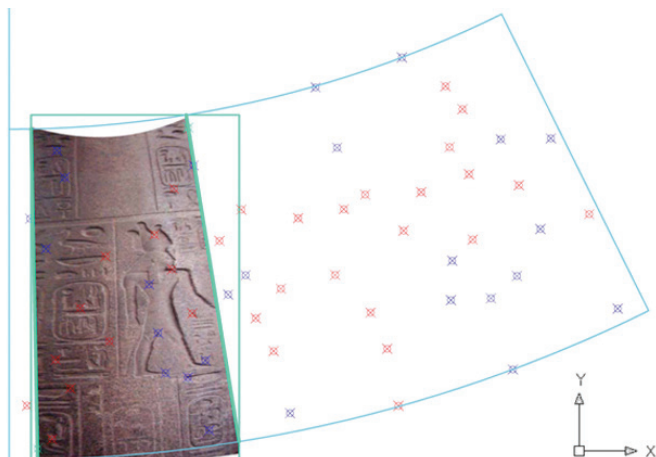


Figure 7 : Vue de face du développement avec une photographie orthorectifiée.

■ Assemblage des orthophotographies et dessin de l'épigraphie

Après avoir redressé tous les clichés, on peut en faire une seule image, sur laquelle toutes les inscriptions de la partie de colonne traitée pourront être dessinées.

L'assemblage des orthophotographies peut s'avérer délicat, car il faut impérativement respecter les positions exactes de différentes orthophotos les unes par rapport aux autres, ainsi que leurs échelles. De plus, il peut y avoir de grandes différences de luminosité entre les clichés (voir Figure 3), ce qui implique un traitement d'image ultérieur pour obtenir une image homogène de toute la surface de la colonne. Ce problème peut être évité en prenant les photos dans de bonnes conditions d'exposition (à différentes périodes de la journée).

L'assemblage des photos a été réalisé malgré tout, ce qui permet d'obtenir une "photographie" de la surface développée du fût de la colonne. L'image suivante est donc une surface plane sur laquelle les hiéroglyphes peuvent être dessinés (Figure 8).

Les signes hiéroglyphiques sont tracés sur la mosaïque d'images à l'aide de fonctions de construction en interactif de



Figure 8 : Mosaïque des orthophotos de la "colonne test" et dessin de quelques hiéroglyphes.



Figure 9 : Relevé épigraphique sur la surface développée d'une colonne de la salle hypostyle du temple de Karnak.

courbes de Bézier. Des procédures ont été développées pour que ces courbes soient modifiables à volonté, afin de les adapter au mieux au signe à dessiner.

Elles peuvent aussi être groupées puis enregistrées comme un "signe-type", qui peut ensuite être réinséré à un endroit particulier pour éviter de redessiner plusieurs fois le même signe. Chaque occurrence particulière d'un signe peut elle aussi être enregistrée avec sa position exacte sur la photographie.

À terme, ceci permettra de constituer une base de données de signes-types, qui sera manipulable et interrogeable, comme toute autre base de données. Le relevé épigraphique total d'un mur ou d'une colonne pourra alors être réalisé très rapidement et des fichiers plus pérennes des textes des temples égyptiens pourront être constitués. La publication de l'épigraphie d'un monument pourra toujours être faite sous forme papier (relevé 2D), mais désormais aussi de manière numérique.

De plus, la méthode développée par le GRCAO réunit la saisie du sens et de la forme particulière de chaque occurrence de signe. Ceci permettra de réaliser des études statistiques sur la forme des hiéroglyphes, de traduire automatiquement des textes ou de rechercher des éléments manquants, autant sur des critères géométriques que grammaticaux.

La méthode présentée dans cet article pour le relevé épigraphique de surfaces coniques (ou cylindriques) a été mise au point sur la base de photographies d'une colonne du British Museum (Red granite column with palm capital, 19th Dynasty, about 1250 BC, from Heracleopolis), parce qu'elle est de taille moyenne et que ses inscriptions hiéroglyphiques sont bien préservées. Elle a ensuite été appliquée sur une colonne de la Grande Salle Hypostyle du Temple de Karnak, pour laquelle nous disposons de sept photos en noir et blanc. Cette colonne est beaucoup plus grande que la précédente (2,8 m de diamètre et 13,2 m de haut), c'est pourquoi le développement de sa surface à l'air d'être rectangulaire. Quelques signes hiéroglyphiques y ont aussi été tracés (Figure 9).

■ ■ ■ Conclusion

Cet article présente une méthode de relevé épigraphique pour tous les éléments coniques et cylindriques des temples égyptiens notamment (mais elle peut être adaptée pour d'autres types d'inscriptions également). Un des buts du projet étant de publier les textes hiéroglyphiques et l'iconographie, le résultat est bidimensionnel. En conséquence, l'aspect tridimensionnel des colonnes est perdu. Mais sachant que les inscriptions de tous les monuments se dégradent très vite de nos jours, il était primordial de concevoir pour les archéologues du Karnak Hypostyle Hall Project, une méthode simple et rapide pour le relevé et la publication des textes de la Salle Hypostyle de Karnak. Cette étude a donc été menée dans ce sens. Les outils informatiques développés sont simples d'utilisation pour les épigraphistes sur le terrain, avec un équipement informatique minimal.

Le but ultime des recherches menées par le GRCAO est de concevoir un assistant informatique pour valider les hypothèses de reconstitution en archéologie, qui va intégrer les nouveaux outils développés ici. C'est un bon exemple de l'utilisation de la modélisation informatique dans les domaines de la conservation du patrimoine et de la reconstitution architecturale en archéologie.

Ce projet a été réalisé grâce au soutien du Conseil de Recherches en Sciences Humaines du Canada (CRSH). ●

Bibliographie

Références de livres

Karara, H. M., [1989], Non-topographic Photogrammetry, 2nd edition. Sciences and Engineering Series, Falls Church, Virginia. American Society for Photogrammetry and Remote Sensing. ISBN 0-944-42610-7, 445 p.

Kraus, K., Jansa, J., Kager H., [1997], Photogrammetry. Advanced Methods and Applications, vol. 2, 4th edition. Dümmler, Bonn. Translated by Peter Stewardson. ISBN 3-427-78694-3, 466 p.

Kraus, K., Waldhäusl, P., [1998], Manuel de Photogrammétrie. Principes et procédés fondamentaux, vol.1. Éditions Hermès, Paris. Translated by Pierre Grussenmeyer and Olivier Reis, Mayenne. ISBN 2-86601-656-4, 407 p.

Autres références

Parisel, C., [2002], Stratégie informatique: programme relevé, rapport de travail interne au GRCAO, mars, 17 p.

Parisel, C., [2003], Rapport de travail sur le relevé des colonnes et de l'épigraphie sur les colonnes, rapport de travail interne au GRCAO, janvier, 6 p.

Contact

Élise MEYER

Laboratoire MAP-PAGE, INSA de Strasbourg
24 bd de la Victoire 67084 Strasbourg
Courriel: meyer.elise@mail.insa-strasbourg.fr

Curriculum Vitae

Élise MEYER

Classe préparatoire intégrée à l'ENSAIS, puis intégration de la filière Topographie. Trois ans de formation pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur Géomètre-Topographe de l'INSA de Strasbourg (changement de statut de l'école en 2003) en septembre 2003.

En parallèle avec la 3^e année de formation d'ingénieur, DEA Modélisation et Simulation des Espaces Bâtis de l'École d'Architecture de Nancy. Obtention du diplôme en octobre 2003.

Projet de Fin d'Étude à l'INSA Strasbourg (confondu avec le stage de DEA) réalisé au sein du laboratoire MAP-PAGE de l'INSA Strasbourg, sous la direction de Pierre Grussenmeyer, en partenariat avec le GRCAO de l'Université de Montréal (collaboration entre les 2 laboratoires). Intitulé exact du projet de fin d'études/stage de DEA : "Modélisation Photogramétrique de l'épigraphie des colonnes de la salle hypostyle du temple de Karnak".

Désormais étudiante au Doctorat Modélisation et Simulation des Espaces Bâtis, rattachée au laboratoire MAP-CRAI de Nancy, basée au MAP-PAGE à l'INSA Strasbourg (directeurs de thèse : P. Grussenmeyer et J-P. Perrin).
Sujet : "Acquisition tridimensionnelle, Restitution et Imagerie en Archéologie : vers une plate-forme liant informatique graphique et données patrimoniales."

ABSTRACT

Key words : architectural photogrammetry, epigraphy, data processing modelling, archaeology

Epigraphic surveying of Egyptian temples is essential to understand and to reconstitute these ancient monuments. Since hieroglyphic engravings describe the nature of the rituals that took place in the temple, they are key elements enabling scattered blocks to be put back in their original place. It is important to be able to make this survey on walls as much as on more complex architectural elements (columns, statues, and so on). Nowadays, these surveys are still for the most part carried out in a traditional handmade fashion, and only on plane surfaces. The following paper presents a method to make a computerized epigraphic survey of inscriptions engraved on columns. It carries out the adjustment and the programming of photogrammetry general formulas, in order to reconstitute in three dimensions a column of the Great Hypostyle Hall of Karnak Temple and to achieve a two-dimensional surveying of its epigraphy.