



HAL
open science

La citerne el-Nabih à Alexandrie: un exemple d'utilisation de la photogrammétrie, de la lasergrammétrie et du modèle 3D sur un chantier de fouille archéologique

Laurent Borel

► **To cite this version:**

Laurent Borel. La citerne el-Nabih à Alexandrie: un exemple d'utilisation de la photogrammétrie, de la lasergrammétrie et du modèle 3D sur un chantier de fouille archéologique. *Revue Française de Photogrammétrie et de Télédétection*, 2013, 201, pp.27-36. 10.52638/rfpt.2013.43 . hal-03325381

HAL Id: hal-03325381

<https://hal.science/hal-03325381>

Submitted on 25 Aug 2021

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

LA CITERNE EL-NABIH À ALEXANDRIE : UN EXEMPLE D'UTILISATION DE LA PHOTOGRAMMÉTRIE, DE LA LASERGRAMMÉTRIE ET DU MODÈLE 3D SUR UN CHANTIER DE FOUILLE ARCHÉOLOGIQUE

Laurent Borel

CEAlex, USR 3134 du CNRS Centre d'Études Alexandrines
50 rue Soliman Yousri, 21131 Alexandrie – Égypte
laurent.borel@cea.com.eg
www.cealex.org

Résumé

Parmi les grands réservoirs publics de la fin de la période médiévale que compte encore la ville d'Alexandrie, l'un d'entre eux fait l'objet d'une étude architecturale et archéologique approfondie. Entreprise en 2003 par le Centre d'Études Alexandrines (CEAlex), en collaboration avec le Service égyptien des Antiquités, l'analyse de la citerne El-Nabih a fait appel, dans un premier temps, à la mise en œuvre des outils traditionnellement utilisés par les archéologues et les architectes sur les chantiers de fouilles. Ce n'est qu'à partir du printemps 2008, à la suite de notre rencontre avec Yves Egels, Ingénieur Général à l'Institut Géographique National (IGN), et à la dotation par le Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS) d'un scanner laser 3D (Trimble® GXTM), que notre équipe a pu envisager d'utiliser la photogrammétrie et la lasergrammétrie en complément des levés manuels précédemment réalisés. L'irruption récente de ces technologies dans le domaine de l'archéologie nous a permis d'entrevoir, avec l'exemple du chantier de la citerne El-Nabih, l'étendue des potentialités que nous apportaient ces nouveaux outils dans nos travaux de recherche. Une fois nos besoins clairement définis, c'est grâce à l'échange entre les utilisateurs que nous étions devenus et les « producteurs de méthodes », que nous avons pu optimiser et adapter l'outil afin qu'il réponde au mieux à nos attentes. Cette communication porte sur l'utilisation de la photogrammétrie et de la lasergrammétrie dans l'étude architecturale et archéologique de la citerne El-Nabih. Nous abordons, en premier lieu, les caractéristiques du site, les outils et méthodes mis en œuvre et les difficultés rencontrées. Dans un second temps, nous faisons le point sur l'apport de ces techniques avant de conclure sur les perspectives qu'elles offrent dans notre domaine de recherche.

Mots clés : Alexandrie, citerne, étude architecturale, étude archéologique, lasergrammétrie, nuages de points, corrélation dense, photogrammétrie, modèle 3D.

Abstract

Of the great public water reservoirs dating from the end of the medieval period that still exist in Alexandria, one such has been the object of an in-depth architectural and archaeological study. Begun in 2003 by the Centre d'Études Alexandrines (CEAlex) in collaboration with the Egyptian Antiquities Authority, the analysis of El Nabih cistern involved, in the first instance, the traditional methods and tools employed by architects and archaeologists on an excavation site. It was only from early 2008, after an encounter with Yves Egels, Ingénieur général with the Institut Géographique National (IGN), and the donation by the Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS) of a 3D laser scanner (Trimble® GXTM), that our team could envisage the use of photogrammetry and lasergrammetry as a complement to the manual surveying already undertaken. The recent arrival of such technology in the field of archaeology allows us to foresee, through the example provided by the El Nabih cistern excavation, the extensive possibilities that these new tools could bring to our research work. Once we had clearly defined our needs, it was through a process of exchange between us, the employers, and the "producers of the means" that we were able to optimise and adapt the tool so that it better met our requirements. This paper will present the use of photogrammetry and lasergrammetry in the architectural and archaeological study of El Nabih cistern. First, we will introduce the characteristics of the site, the tools and methods employed and the difficulties encountered. Secondly, we will look at the application of these techniques before concluding with the potential they offer within our field of research.

Keywords : Alexandria, cistern, architectural study, archaeological study, lasergrammetry, point cloud, photogrammetry, dense correlation, 3D model.

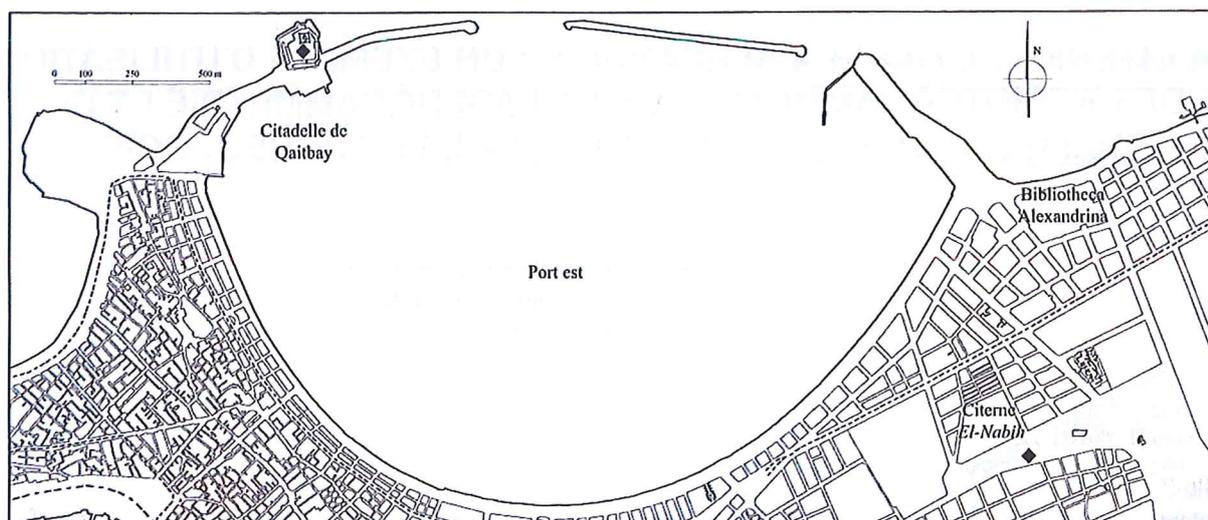


FIGURE 1 : Plan de situation de la citerne El-Nabih. Fond de carte CEALex, infographie L. Borel, Chr. March ©CEALex.

1. Introduction

L'un des axes de recherche du Centre d'Études Alexandrines (CEALex) est l'étude sur la longue diachronie de l'approvisionnement en eau de la cité fondée par Alexandre en Égypte. Ce programme fait appel à des approches pluridisciplinaires et porte sur l'intervalle de temps compris entre 331 av. J.-C. et le tout début du XXe siècle. Il concerne l'étude des structures du système hydraulique à l'échelle de la cité et de toutes les infrastructures qui y sont associées (Hairy, 2009; Empereur, 2009). Parmi celles-ci Figure un grand nombre de citernes de toutes capacités et de toutes périodes. C'est dans le cadre de ces travaux de recherche, et plus précisément dans celui du projet portant sur la conservation et la mise en valeur d'un de ces réservoirs, que l'étude architecturale et archéologique approfondie de la citerne El-Nabih a été entreprise en 2003 (Borel, 2006; Borel et al., 2009). Certainement édifié à la fin de la période médiévale, comme l'ont démontré les derniers résultats des fouilles récemment conduites par le CEALex sous la responsabilité conjointe de Samuel Desoutter et de l'auteur du présent article, ce maillon final du réseau d'alimentation en eau de la ville nous renseigne notamment sur la morphologie urbaine d'Alexandrie à cette période. Situé dans l'angle sud-est de l'actuel jardin Nubar Pacha, non loin de la Bibliotheca Alexandrina (Figure 1), cet édifice utilitaire a été élevé au rang de Monument en mai 1898 lors de son classement par le Comité de Conservation des Monuments de l'Art Arabe (CCMAA). Il est aujourd'hui l'un des derniers témoins de l'ingénieux système d'approvisionnement en eau de la cité médiévale. Ce système a perduré jusqu'en 1911, date à laquelle la municipalité a promulgué, pour des raisons sanitaires, un arrêté ordonnant la fermeture des puits et citernes. Celui-ci a entraîné l'abandon progressif du réseau et par la suite son démantèlement et sa disparition (March et Borel, 2010).

2. La citerne El-Nabih

Ce grand réservoir public, de forme à peu près cubique (13 m x 11,5 m x 12 m), est aujourd'hui entièrement enterré. D'une contenance approchant les 1000 m³, sa cuve est formée par quatre murs périphériques bâtis en blocs de calcaire de petit appareil. D'une épaisseur d'environ 1,20 m, ces murs reposent sur un épais radier qui sert de fondation à l'ensemble du bâtiment et encaisse les charges résultant de la pression de la colonne d'eau (Figure 2).

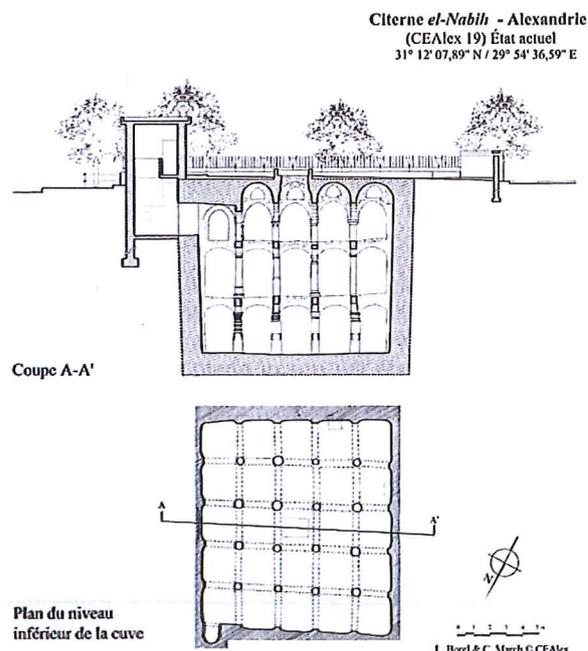


FIGURE 2 : Plan et coupe est/ouest de la citerne. Relevé : Y. Guyard, I. Hairy, E. Hardy, C. Shaalan. Recollement : L. Borel, Chr. March ©CEA.

La partie sommitale de l'enveloppe de la cuve est formée par deux systèmes de couverture différents. En partie

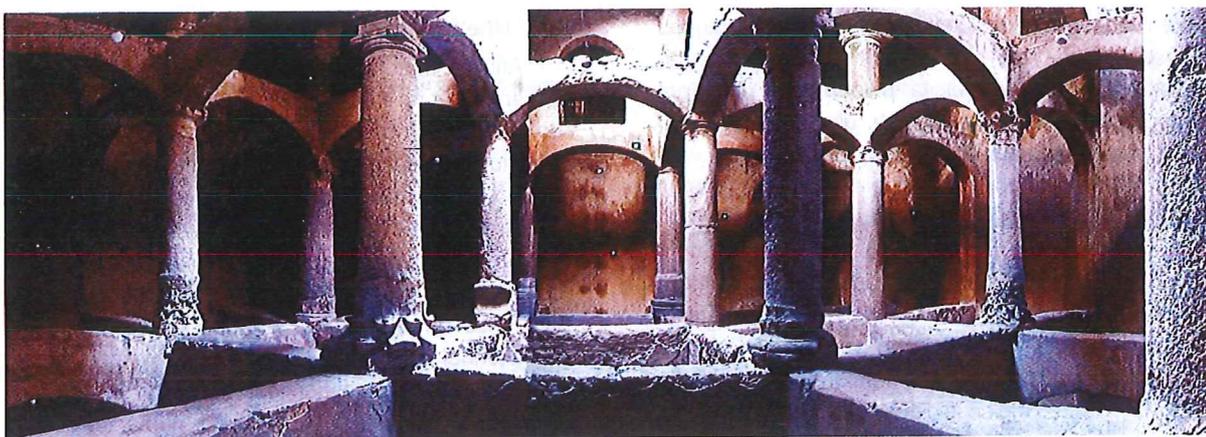


FIGURE 3 : Vue intérieure de la cuve de la citerne montrant les dispositifs mis en œuvre pour le géoréférencement des nuages de points (sphères et cibles). Cliché L. Borel ©CEAlex.

nord, le couverture est assuré par des voûtes d'arêtes, tandis qu'au sud, les voûtes d'arêtes ont laissé place, lors d'une restauration tardive, à un dispositif faisant appel à la combinaison d'arcs diaphragmes et de voûtes en berceau (Figure 4).

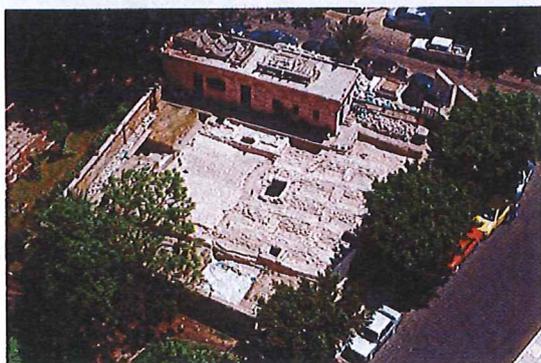


FIGURE 4 : Depuis le sud-ouest, vue du dispositif de couverture de la citerne durant la campagne de fouille de 2007. À gauche le pavement des voûtes d'arêtes, à droite l'extrados des voûtes en berceau. Cliché L. Borel ©CEAlex.

Sur tout le pourtour de la cuve, ces deux dispositifs de couverture reposent sur les murs périphériques. Pour la partie centrale, ils sont portés par quatre rangées de quatre colonnes, entrecroisées d'arcs et étagées sur trois niveaux. Cet ensemble de points d'appui verticaux (bases, tambours et chapiteaux), au nombre de quarante-huit, est constitué d'éléments d'architecture réemployés provenant d'édifices plus anciens (Figure 3). Outre le fait d'assurer la descente des charges, cet assemblage hétéroclite d'arcs et de points d'appui verticaux permet de fractionner la portée de la couverture et d'assurer la cohésion de l'ensemble des structures bâties ainsi que la stabilité de l'édifice qui doit pallier, en l'absence d'eau, la poussée des terres.

Les éléments maçonnés (parois verticales, sol et arcs) composant la cuve sont revêtus d'un enduit de mortier hydraulique destiné à assurer l'étanchéité du réservoir (Borel et March, 2009; March et Borel, 2009).

3. Les outils et méthodes de relevé mis en œuvre sur le chantier de la citerne El-Nabih

3.1. Les méthodes de relevé traditionnelles

L'étude architecturale et archéologique approfondie du monument a été engagée en 2003. Dans un premier temps, entre 2003 et 2005, l'essentiel du travail de terrain a porté sur le relevé de l'intérieur du volume de la cuve. Au total, ce sont vingt coupes, positionnées sur les axes des travées, et quatre plans, un par niveau et un plan miroir de l'intrados des voûtes, qui ont été réalisés. Pour ces documents, l'échelle qui a été choisie est le 1/20 (Figures 6-7). Il en est de même pour les structures bâties mises au jour au cours des différentes campagnes de fouilles qui se sont déroulées entre 2006 et 2009. Pendant ce même laps de temps, les pièces d'architecture utilisées en réemploi dans les points d'appui de la cuve ont été relevées à l'échelle 1/5 afin d'en dresser un inventaire exhaustif (Figure 5).

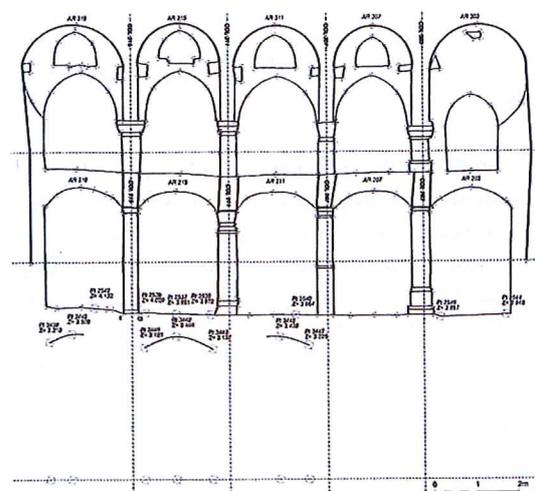


FIGURE 5 : Exemple d'une minute de terrain. Bloc n°109 Sup. Dessin M. Cabarrou ©CEAlex.

Pour l'ensemble de ces relevés, les techniques mises en œuvre ont fait appel aux outils traditionnellement employés sur la plupart des chantiers archéologiques : théodolite, niveau, distancemètre, décimètre, planchette, mines de plomb, photographie.

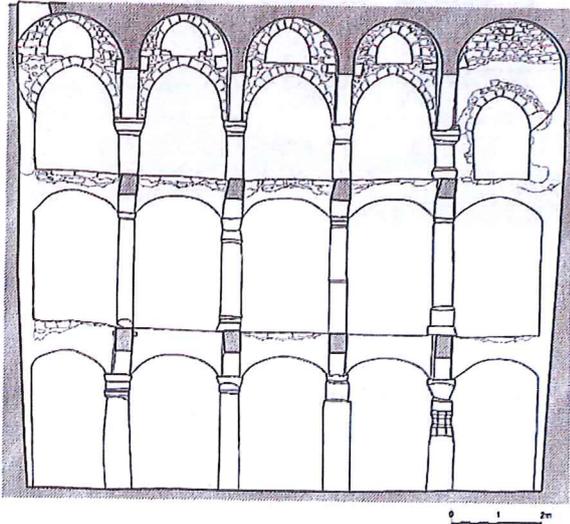


FIGURE 6 : Exemple d'une minute de terrain. Coupe est-ouest S4-1 montrant les points géoréférencés du canevas topographique. Dessin Y. Vigouroux, J. Badr ©CEAlex.

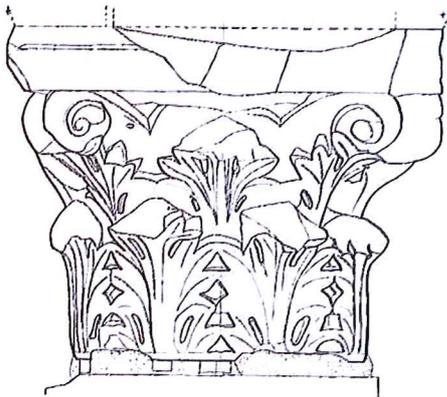


FIGURE 7 : Coupe est-ouest S4-1 mise au net. Dessin L. Borel ©CEAlex.

À l'intérieur de la cuve, la mise en place d'un échafaudage s'est avérée nécessaire afin de pouvoir accéder en toute sécurité aux parties les plus hautes de l'édifice. Pour éviter les masques, lors des visées avec le théodolite, celui-ci n'a été monté qu'une fois le canevas topographique des points géoréférencés réalisé. C'est sur la base de ces points que l'ensemble du relevé des plans, des coupes et des élévations a été effectué par triangulation. La mise au net des minutes de terrain a été accomplie sur le logiciel de DAO AutoCAD®. Pour les pièces d'architectures, le même protocole a été adopté mais, pour ces relevés au 1/5, les points géoréférencés n'ont pas été utilisés, car le canevas mis en place n'était pas pertinent à cette échelle.

3.2. Une première approche tridimensionnelle

Afin de mieux appréhender le monument dans son ensemble et de matérialiser plus aisément les relations entre les structures bâties internes et externes, une modélisation tridimensionnelle a été entreprise sur la base de la documentation graphique précédemment établie. Cette maquette numérique a aussi servi à apporter un éclairage sur les imbrications des différentes techniques constructives mises en œuvre, notamment pour les deux systèmes de couverture. À l'aide de ce support tridimensionnel, il a été facilement possible de vérifier les hypothèses de restitution des différents remaniements qu'a connu le bâtiment. Le modèle numérique est dans cette démarche un outil au même titre que peut l'être la maquette d'étude construite en «dur». Il n'a pas pour vocation de servir uniquement le discours lié à la démarche de la restitution graphique, mais permet d'étendre le champ de la réflexion à la vision dans la troisième dimension. Pour notre chantier, ce modèle nous a aussi servi dans les choix de certains aspects de la stratégie de fouille.

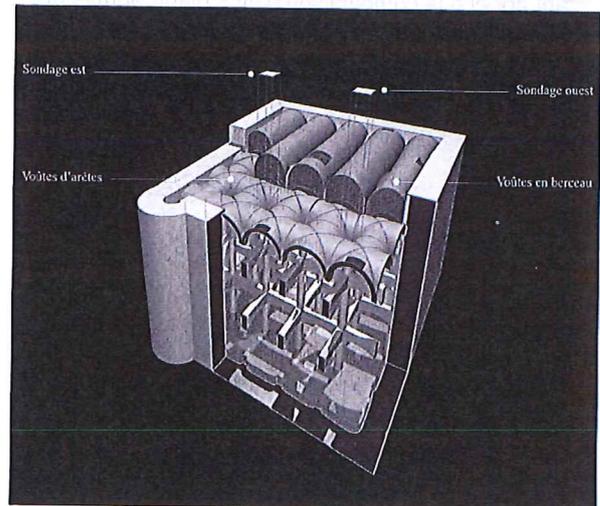


FIGURE 8 : Utilisation du modèle 3D pour l'implantation des sondages dans le pavement des voûtes d'arêtes. Écorché sur l'angle nord-ouest de la citerne la citerne. Modélisation L. Borel ©CEAlex.

Les emplacements des sondages dans les remblais du pavement des voûtes d'arêtes, ainsi que les coordonnées des points qui ont servi à les implanter, ont été déterminés à l'aide de la maquette numérique préalablement géoréférencée (Figure 8). Même si, comme nous l'avons vu, cette modélisation offre un large panel d'outils d'aide à la réflexion pour l'étude architecturale, elle ne permet pas, du fait de la schématisation des volumes en formes géométriques primaires, une analyse fine des désordres structurels du bâtiment.

3.3. Lasergrammétrie et photogrammétrie

3.3.1. Présentation et objectif

Les premiers essais de l'emploi de la lasergrammétrie et de la photogrammétrie sur le chantier de la

citerne El-Nabih ont eu lieu dans le courant de l'année 2008. C'est la conjonction de plusieurs facteurs qui nous a amené à envisager d'entreprendre le levé tridimensionnel de la citerne et de ses abords, ainsi que le levé des sondages archéologiques et des coupes stratigraphiques (Figure 9). Il y a eu, d'une part, la dotation par le CNRS d'un scanner laser 3D (Trimble® GXTM) et, d'autre part, durant une mission à Karnak, notre rencontre avec Yves Egels, Ingénieur Général à l'Institut Géographique National (IGN) (Borel et al., 2009).



FIGURE 9 : Acquisition des coupes stratigraphiques et des structures bâties dans le sondage profond situé à l'ouest de la citerne. Cliché L. Borel ©CEAlex.

Au-delà de l'attrait pour ces nouveaux outils, ce qui nous a motivé dans cette entreprise est le fait que nous allions pouvoir, sur un bâtiment que nous connaissions déjà bien, entrevoir les réels apports de ces techniques de relevé par comparaison avec les outils traditionnels (Figures 5 et 10). Que sortirait-il de cette confrontation et quelles conclusions pourrions-nous, à notre tour, en tirer sachant que nous n'étions pas les premiers à nous lancer dans une telle expérimentation sur un chantier de fouilles mêlant étude archéologique et étude architecturale ? (Fuchs et al., 2003; Chazaly et Laroze, 2009; Chandelier et al., 2009)



FIGURE 10 : Photo et nuage de points du bloc n°109Sup. Cliché L. Borel ©CEAlex.

Outre l'expérimentation en elle-même, les objectifs que nous nous étions fixés étaient de compléter notre documentation graphique de la manière la plus exhaus-

sive possible, d'obtenir, grâce au laser, un modèle tridimensionnel de la citerne qui rendrait de façon fidèle les déformations subies par la cuve, et enfin, par l'emploi d'un maillage de résolution supérieure, de parfaire notre nomenclature de blocs d'architecture par un catalogue tridimensionnel. En complément de l'acquisition par lasergrammétrie, une campagne de photogrammétrie des parois internes et de la couverture de la cuve a été conduite. Nous avons pu expérimenter, à l'aide du logiciel MicMac, basé sur l'utilisation de la méthode de la corrélation dense de photographies numériques, une reconstruction tridimensionnelle du point d'appui vertical n° 103 (Figure 11). Ce logiciel est en cours de développement à l'IGN par Marc Pierrot-Deseilligny et une interface ergonomique a récemment été conçue par Isabelle Cléry (Pierrot-Deseilligny et Paparoditis, 2006; Pierrot-Deseilligny, 2007; Cléry et Pierrot-Deseilligny, 2011).

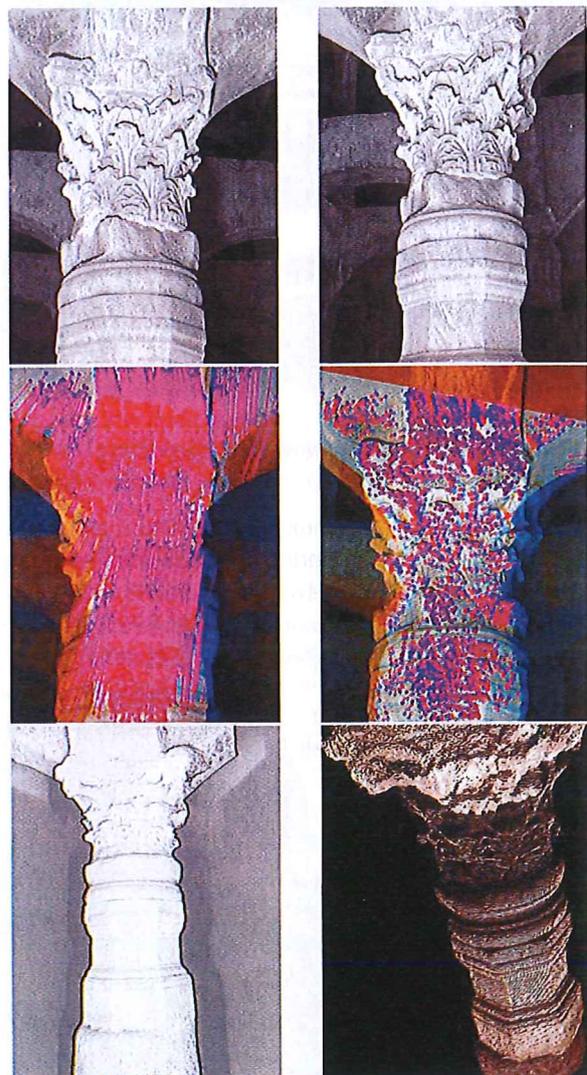


FIGURE 11 : Photos, corrélation des images, modèle 3D du point d'appui n°103. Y.Egels, M.Pierrot-Deseilligny ©IGN.

3.3.2. Particularités des lieux, difficultés et solutions adoptées

La citerne El-Nabih, du fait de sa typologie et de la particularité de son système constructif, est un lieu dont les spécificités impliquent une adaptation des outils et des méthodes. Le fait que le bâtiment soit enterré, la présence des nombreux points d'appuis et d'arcs, qui sont autant de masques pour l'acquisition du volume interne de la cuve, le rapport entre l'intérieur et l'extérieur du réservoir, ont contribué à complexifier la mise en œuvre d'une telle entreprise (Figure 12).

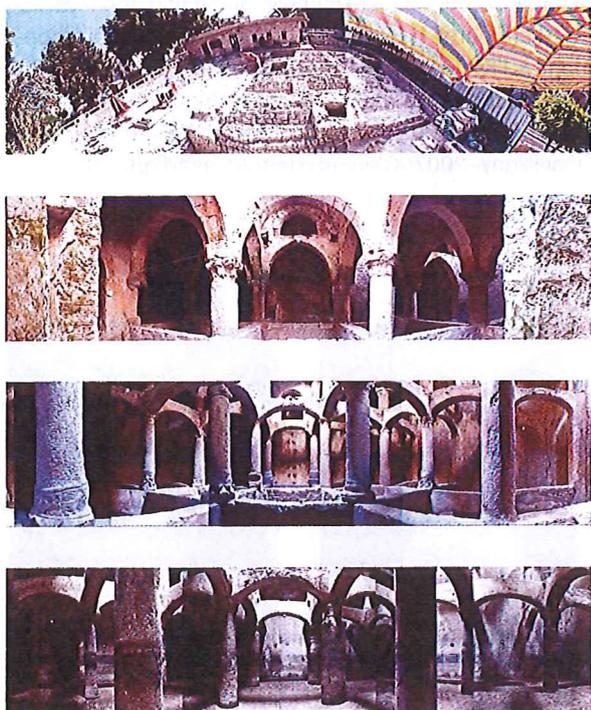


FIGURE 12 : Vues panoramiques de la couverture et des trois niveaux de l'intérieur de la cuve. Clichés L. Borel ©CEALex.

La combinaison des caractéristiques du scanner utilisé (cf. Annexe) avec la particularité des lieux nous ont contraint à combiner et à développer certains outils : mini trépied, « chevalet » pour la mise en station sur les arcs, équerre pour les stations horizontales (Figures 13-14).

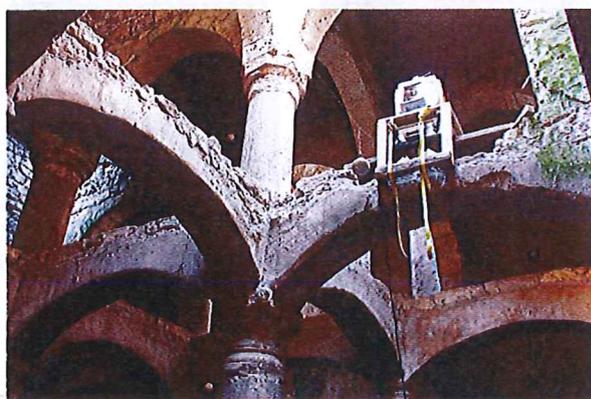


FIGURE 13 : Scanner en station sur le «chevalet» durant l'acquisition du niveau supérieur. Cliché L. Borel ©CEALex.

Pour réaliser la couverture laser de l'ensemble du volume de la citerne, les stations du scanner ont dû être multipliées. À l'issue de la dernière campagne, en mars 2010, trente-trois stations extérieures et soixante-quatre stations intérieures ont été réalisées et validées. Soixante et onze cibles et trente-huit sphères ont été posées pour assurer le géoréférencement des nuages. Pour des problèmes de coût, nous avons utilisé des boules en plastique pour enfant qui ont été peintes en blanc et disposées, à l'aide d'un fil de nylon, au centre des travées. L'effet de pendule a été amoindri grâce à la mise en place d'un lest de plomb (Figure 15).

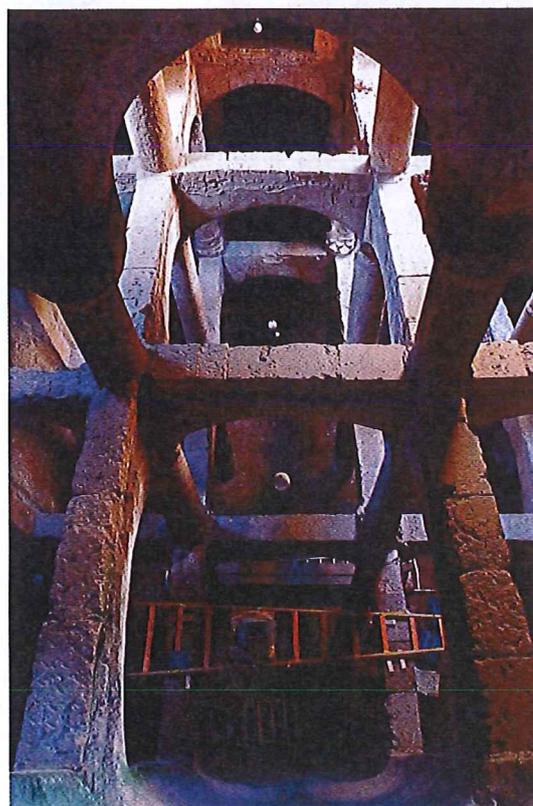


FIGURE 14 : Scanner en station horizontale durant l'acquisition de l'intrados des voûtes. Cliché L. Borel ©CEALex.

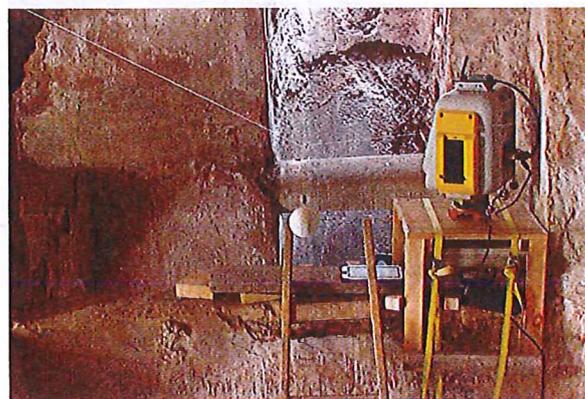


FIGURE 15 : Une sphère et son lest, en arrière-plan, le scanner en station sur un arc. Cliché L. Borel ©CEALex.

Durant les opérations d'acquisition avec le laser, l'échafaudage, monté précédemment afin d'effectuer les relevés avec les outils traditionnels, a été déposé. Ceci nous a contraint, pour la mise en station du scanner et pour les prises de vue nécessaires à la photogrammétrie, à grimper au niveau supérieur de la cuve par divers moyens. Il a parfois fallu s'encorder pour assurer notre sécurité.

3.3.3. Résolutions et densité des nuages de points

De même que pour la documentation graphique déjà réalisée, nous souhaitons disposer *in fine* et après traitement des données issues de l'acquisition avec le scanner laser, de modèles tridimensionnels permettant une exploitation des nuages à différentes échelles. Sur les terrains de fouilles archéologiques, par empirisme et habitude, les échelles ordinairement utilisées pour les levés sont le 1/25 ou le 1/50 pour l'étude de bâti, le 1/5 pour les blocs d'architecture et le 1/10 ou le 1/20 pour les coupes stratigraphiques. La question de l'adéquation entre la résolution de la maille des divers nuages de points et les échelles des différents documents graphiques escomptés s'est donc posée dès les premiers essais du scanner laser.

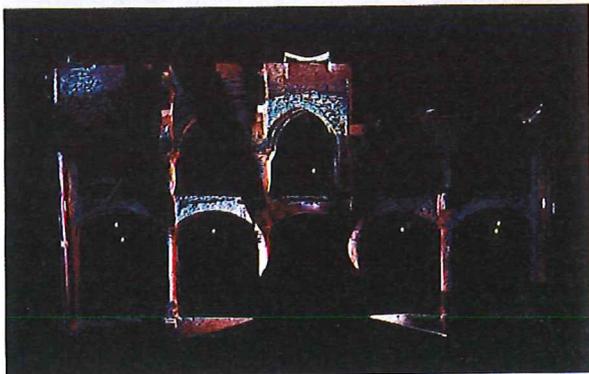


FIGURE 16 : Exemple d'un nuage de points brut du volume intérieur obtenu avec le scanner en station horizontale. L. Borel ©CEAlex.

Après plusieurs tests réalisés *in situ*, prenant en compte divers paramètres techniques (caractéristiques du scanner, bruit et densité des nuages, précision de la documentation graphique souhaitée, puissance de calcul des ordinateurs, etc.) et les différentes contraintes matérielles du chantier (durée des temps d'acquisition, horaires d'accès au site, etc.), la même résolution a été adoptée pour les trames horizontales et verticales des nuages de points. Les quatre résolutions retenues sont les suivantes :

- pour le volume intérieur de la citerne, résolution 15 mm avec 15 tirs laser par point,
- pour la couverture (pavement), l'extrados des voûtes et les structures bâties extérieures, résolution 5 mm avec 15 tirs laser par point,
- pour les pièces d'architectures, résolution 2,5 mm avec 15 tirs laser par point,

- pour les coupes stratigraphiques, résolution 5 mm avec 15 tirs laser par point.

Ces résolutions ont été appliquées en prenant toujours comme référence le centre de l'entité à acquérir ou, dans le cas de l'intérieur de la citerne, la distance horizontale entre le scanner et la paroi de la cuve la plus éloignée par rapport à ce dernier. Sur notre chantier, les distances entre le scanner et les structures bâties varient de 2,5 m au minimum à 20 m au maximum (Figure 16).

Au final, pour chacune des entités des quatre grands ensembles définis ci-dessus, la résolution moyenne obtenue pour la maille des nuages de points est moins dense d'une dizaine de pour cent que la valeur de la résolution initialement paramétrée sur le logiciel qui pilote le scanner lors de l'acquisition (PointScape®). Ce résultat découle de la multiplication des stations. Cela nous donne des nuages de points d'une densité convenable et appropriée pour chacune des échelles de travail préalablement définies dans le cahier des charges que nous nous étions fixé (Figure 17).

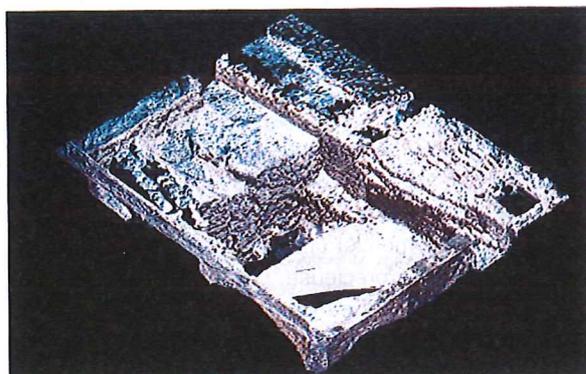


FIGURE 17 : Exemple des nuages de points du sondage ouest, état à l'issue de la campagne de fouille 2008, après leur géoréférencement et leur traitement. Neuf stations ont été nécessaires. L. Borel ©CEAlex.

3.3.4. Traitement des données

Sur le terrain, les opérations de levés des mesures topométriques ont été accomplies par le service de topographie et de cartographie du CEAlex, placé sous la direction de Cécile Shaalan. Les calculs topographiques approchés ont été effectués avec le logiciel Cap et la compensation micro-géodésique ainsi que le géoréférencement de l'ensemble des nuages de points, dans un référentiel géométrique unique, ont été réalisés avec le logiciel Comp3D. Ce référentiel géométrique unique réunit dans un même repère orthonormé les coordonnées connues de certains points, les coordonnées calculées des cibles et des sphères mises en place à l'intérieur et à l'extérieur de la citerne, ainsi que les coordonnées calculées des quatre-vingt-dix-sept stations du scanner laser réalisées entre 2008 et 2010.

Une fois géoréférencés, le traitement et l'exploitation des nuages de points ont été opérés avec le logiciel Cumulus. Pour des questions de logistique et d'organisation de chantier, notamment la gestion des déblais de fouilles,

l'acquisition de la couverture de la citerne a été réalisée en deux temps : déblaiement et acquisition du pavement complet des voûtes d'arêtes ainsi que d'un tiers de l'extrados des voûtes en berceau, puis, remblaiement de cette partie de la couverture avec le reste des déblais afin de compléter l'acquisition des voûtes en berceau. De fait, un grand nombre de nuages de points ont dû être nettoyés afin d'ôter les zones non exploitables issues du recouvrement entre les différents nuages de points.

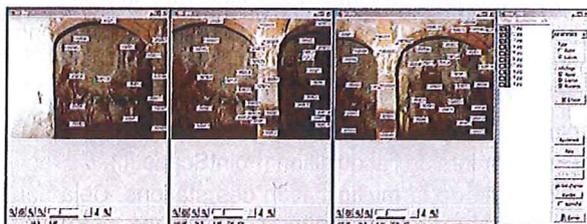


FIGURE 18 : Interface du logiciel Redresseur utilisé pour la triangulation photographique. Y. Egels ©IGN.

Par la suite, les nuages de points ont été triangulés, avant d'être colorisés par la radiométrie des photographies préalablement redressées à l'aide du logiciel Redresseur (Figure 18). Tous les logiciels cités ci-dessus ont été conçus et développés par Yves Egels dans le cadre des ses activités au sein de l'IGN. Ils ont été gracieusement mis à notre disposition par leur auteur que nous tenons à remercier chaleureusement pour son implication, son aide précieuse, ses conseils, et pour les améliorations qu'il a bien voulu apporter à ces logiciels en fonction des nouveaux besoins nés de nos échanges tout au long de cette entreprise.

4. Point sur les apports et premiers résultats

Nous sommes aujourd'hui entrés dans la phase finale du traitement des données issues de la lasergrammétrie et de la photogrammétrie. L'exploitation optimale des résultats n'a cependant pas encore débuté par faute de temps. Les premiers résultats présentés ici ne concernent donc que la documentation réalisée, au fil de l'avancement des calculs et des premiers traitements. Elle nous a cependant permis d'entrevoir quelques-unes des possibilités offertes par ces nouvelles techniques de relevés que nous sommes impatients de pouvoir exploiter pleinement. Il est important de souligner qu'une fois l'acquisition et le traitement des données achevés, ce qui n'est pas toujours une mince affaire, le fait de posséder, quelque part sur un ordinateur, un fac-similé du monument étudié peut présenter d'énormes avantages durant la phase dite de «post-fouille ». En effet, il n'est pas toujours possible, du fait de l'absence d'autorisation administrative, d'accéder physiquement au site étudié

après la fin des campagnes de fouille. Il est alors très utile de pouvoir consulter au bureau ce fac-similé tridimensionnel et d'en extraire, par exemple, un plan, une coupe ou une élévation dont le besoin se fait ressentir du fait de l'avancement de notre réflexion (Figures 19-20). Et que dire pour les cas où les vestiges ont disparu ? Cependant ce fac-similé a un double prix, celui du matériel à proprement parler et celui du temps en jours, voire en mois, consacré au traitement des données accumulées sur le terrain. Reste la possibilité de faire appel à des prestataires de service : là aussi il y a un prix et parfois peu de résultats du fait de l'absence de l'établissement d'un cahier des charges précis et surtout du fait de l'absence de besoins clairement définis.

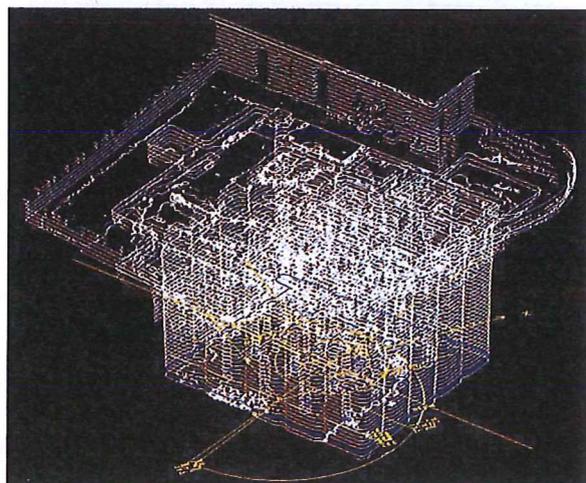


FIGURE 19 : Coupes horizontales tous les 25 cm sur l'ensemble du chantier. L. Borel ©CEALex, Y. Egels ©IGN.

5. Conclusion et perspectives

Ces opérations de «transformations iconiques», telles que les dénomme René Ginouvès dans un article sur les techniques du relevé (Ginouvès, 1987), servent à établir la base de la documentation graphique indispensable à l'analyse et à la réflexion dans le domaine de l'archéologie, tout comme dans celui de l'archéologie du bâti et de l'étude architecturale. Au-delà des outils conventionnels eux-mêmes, il y a dans l'utilisation des techniques de relevé traditionnel une part non négligeable d'observation et d'interprétation de la réalité dont l'auteur du document doit rendre compte à la communauté. Il ne s'agit pas seulement de produire des illustrations, mais bel et bien d'enregistrer de l'information et de la mettre en forme de manière graphique afin d'étayer la construction d'un raisonnement scientifique. Durant les phases de relevé, le fait d'avoir le «nez sur la pierre» est un moment clef dans l'appréhension des vestiges dont on aura *in fine* à réaliser l'analyse au moment de la rédaction de la monographie d'architecture (Reveyron, 2002).

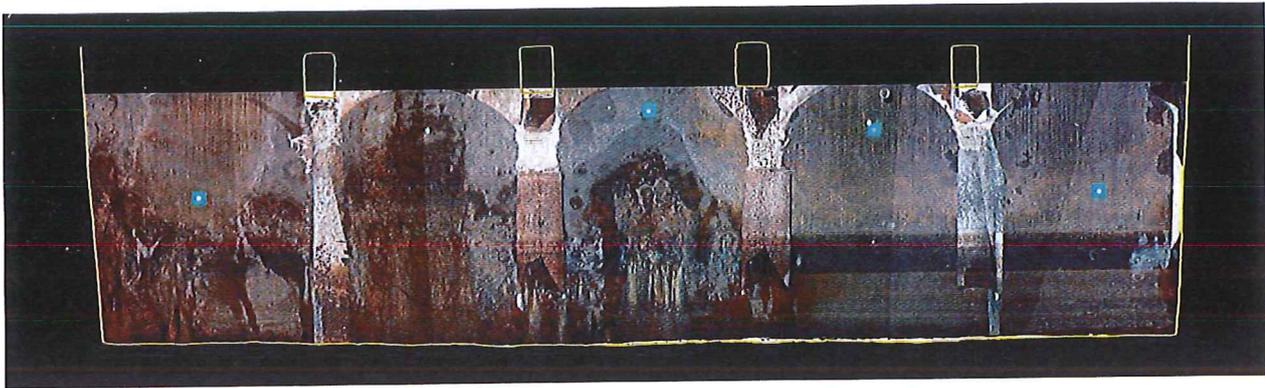


FIGURE 20 : Orthophoto partielle de la paroi ouest de la cuve. L. Borel ©CEAlex, Y. Egels ©IGN.

Si la lasergrammétrie et la photogrammétrie nous apportent aujourd'hui des résultats concluants, il semble qu'à l'échelle de l'histoire des techniques du relevé (Collectif, 2011) nous ne possédions pas encore, à l'égard de ces technologies récemment apparues sur les chantiers archéologiques, le recul nécessaire pour affirmer avec certitude qu'elles sont en passe de remplacer la planchette et la mine de plomb.

En revanche, il est certain que le fait de croiser les techniques de relevé traditionnel avec la lasergrammétrie et la photogrammétrie ne peut qu'enrichir la matière graphique qui est la base de la construction du discours de l'étude architecturale.

Annexe : Caractéristiques du scanner Trimble® GXTM utilisé

- Portée minimum constatée par l'utilisateur : 2 m
 - Portée maximum : 200 à 350 m selon la réflexion de la surface
 - Précision sur un point : 12 mm à 100 m
 - Précision par compensation : 1,5 mm à 50 m
 - Champ horizontal : 360°
 - Champ vertical : 60° (avec un scanner bullé, 38° au dessus et 22° en dessous de l'horizontale)
 - Système d'inclinaison calibré : 0,3"
 - Résolution angulaire maximum : 60 à 70 μ rad
 - Vitesse d'acquisition : 5 kHz
 - Informations enregistrées pour chaque point acquis : coordonnées XYZ, couleur RVB, intensité de réflexion
 - Capteur laser de classe : 2 / 3R
 - Capteur photographique : vidéo couleur intégrée avec grossissement optique 5,5x
- Le chantier en résumé :
- 97 stations scanner laser 3D réalisées au gré des autorisations administratives des différentes campagnes de fouille.
 - 2,8 millions de points par station en moyenne.
 - 270 millions de points pour l'ensemble du chantier.
 - Précision des mesures 3D par compensation : 2,5 mm à 1σ .

- 74 blocs d'architectures acquis en 3D.

Références

- Borel, L., 2006. La citerne el-Nabih : Projet de conservation et mise en valeur.
URL www.cealex.org
- Borel, L., Cabarrou, M., Dubourg, S., Egels, Y., 2009. D'X,Y à X,Y,Z, de nouveaux outils pour l'étude architecturale et archéologique. Restitution 3D, lasergrammétrie et photogrammétrie : le cas de la citerne el-Nabih à Alexandrie. Dans : Quatrième colloque Virtual Retrospect, pp. 215-228. Bordeaux, France.
- Borel, L., March, C., 2009. La citerne el-Nabih : Étude historique, architecturale et première campagne de fouille'. Dans : Du Nil à Alexandrie, histoires d'eaux, catalogue d'exposition. pp. 444-457.
- Chandellier, L., Chazaly, B., Egels, Y., Laroze, E., Schelstraete, D., 2009. Numérisation 3D et déroulé photographique des 134 colonnes de la Grande Salle Hypostyle de Karnak. Revue XYZ 102, 21-26.
- Chazaly, B., Laroze, E., 2009. Le relevé par scannage 3D du temple d'Opet. Revue XYZ 102, 21-26.
- Cléry, I., Pierrot-Deseilligny, M., 2011. Interface ergonomique de calculs de modèles 3D par photogrammétrie. Revue Française de Photogrammétrie et de Télédétection 196, 40-51.
- Collectif, 2011. Le relevé en architecture ou l'éternelle quête du vrai, journées internationales d'études. Dans : Cité de l'architecture et du patrimoine. Paris, France.
- Empereur, J., 2009. Alexandrie, l'eau du Nil dans les citernes. Archéologia 471, 38-49.
- Fuchs, A., Perrin, J., Grussenmeyer, P., 2003. Confrontation de la lasergrammétrie aux techniques de relevé conventionnelles et développement d'outils numériques pour la restitution architecturale. Revue Française de Photogrammétrie et de Télédétection 173-174, 36-47.
- Ginouvès, R., 1987. Les techniques du relevé dans : 'le décor romain, les méthodes de relevé et de restitution'. Dossiers Histoire et Archéologie 119 (7), 36-41.
- Hairy, I., 2009. Du Nil à Alexandrie, histoires d'eaux, catalogue d'exposition. Alexandrie, Egypte, 717 p.
- March, C., Borel, L., 2009. Citerne el-Nabih un dispositif remarquable de l'hydraulique alexandrine'. Dans : Du Nil à Alexandrie, histoires d'eaux, catalogue d'exposition. pp. 420-443.
- March, C., Borel, L., 2010. La citerne el-Nabih à Alexandrie : témoin remarquable de la redécouverte d'un patrimoine unique. Dans : Troisième colloque de L'Année Francophone Internationale, Alexandrie métaphore de la Francophonie, La

transmission des connaissances, des savoirs et des cultures.
Paris, France, pp. 85–92.

Pierrot-Deseilligny, M., 2007. MicMac, un logiciel pour la mise en correspondance automatique d'images dans le contexte géographique. Bulletin d'Information Scientifique et Technique de l'IGN 77.

URL www.micmac.ign.fr

Pierrot-Deseilligny, M., Paparoditis, N., 2006. A multiresolution and optimization-based image matching approach : An ap-

plication to surface reconstruction from SPOT5-HRS stereo imagery. Dans : Proc. of the ISPRS Conference Topographic Mapping From Space (With Special Emphasis on Small Satellites). Ankara, Turquie.

Reveyron, N., 2002. L'apport de l'archéologie du bâti dans la monographie d'architecture. Dans : Analyse architecturale, la monographie d'architecture, séminaire sous la direction de J.-M. Pérouse de Montclos, Direction de l'architecture et du patrimoine. Paris, France.