



**HAL**  
open science

**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**

Laurent Borel, Sandrine Dubourg, Magali Cabarrou, Yves Egels

► **To cite this version:**

Laurent Borel, Sandrine Dubourg, Magali Cabarrou, Yves Egels. 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. Virtual Retrospect 2009, Robert Vergniew, Nov 2009, Pessac, France. pp.215-228. hal-02539703

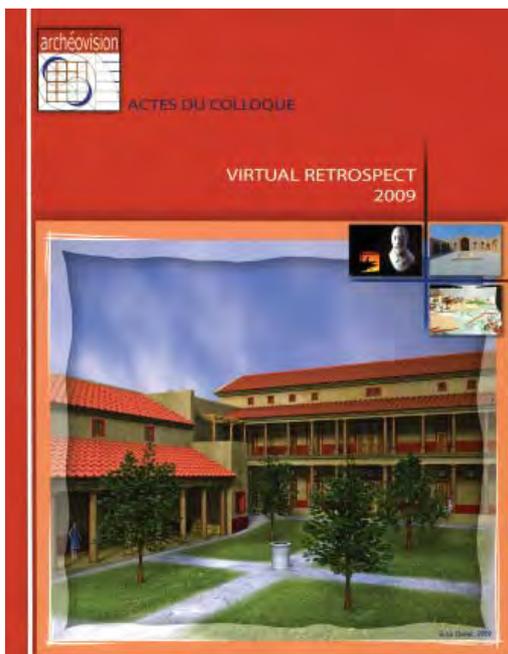
**HAL Id: hal-02539703**

**<https://hal.science/hal-02539703v1>**

Submitted on 10 Apr 2020

**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.



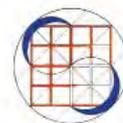
Vergnieux R. et Delevoie C., éd. (2010),  
Actes du Colloque Virtual Retrospect 2009,  
Archéovision 4, Editions Ausonius, Bordeaux

## Tiré-à-part des Actes du colloque **Virtual Retrospect 2009**

Pessac (France) 18, 19 et 20 novembre 2009



L. BOREL, M. CABARROU, S. DUBOURG, Y. EGELS  
*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*

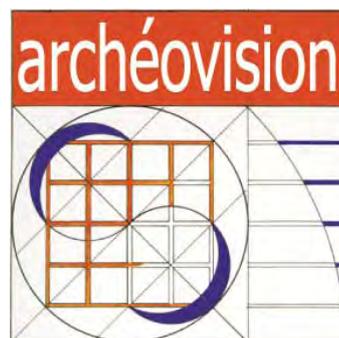


pp. 215-228

tge **ADONIS**



Conditions d'utilisation :  
l'utilisation du contenu de ces pages est limitée à un usage  
personnel et non commercial.  
Tout autre utilisation est soumise à une autorisation  
préalable.  
Contact : [virtual.retrospect@archeovision.cnrs.fr](mailto:virtual.retrospect@archeovision.cnrs.fr)





# Virtual Retrospect 2009

Collection Archéovision  
Volume 4

---

AUSONIUS ÉDITIONS

*Ouvrage financé avec le concours du  
Très Grand Équipement ADONIS du CNRS*



— Bordeaux 2010 —

# 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

Laurent Borel\*, CEAlex, USR 3134 du CNRS  
[laurent.borel@cea.com.eg](mailto:laurent.borel@cea.com.eg)  
Magali Cabarro, Architecte DPLG  
[magali.cabarrou@free.fr](mailto:magali.cabarrou@free.fr)  
Sandrine Dubourg\*, CEAlex, USR 3134 du CNRS  
[sandrine.dubourg@cea.com.eg](mailto:sandrine.dubourg@cea.com.eg)  
Yves Egels\*\*, ENSG  
[yves.egels@free.fr](mailto:yves.egels@free.fr)

\* Centre d'Études Alexandrines, 50 rue Soliman Yousri, 21131 Alexandrie – Égypte  
[www.cealex.org](http://www.cealex.org)

\*\* École Nationale des Sciences Géographiques, 6 et 8 Avenue Blaise Pascal, Cité Descartes – Champs-sur-Marne, 77455  
Marne-la-Vallée Cedex 2  
[www.ensg.ign.fr](http://www.ensg.ign.fr)

**Résumé** : L'utilisation des nouvelles technologies 3D, appliquées au domaine de l'étude architecturale et archéologique, s'est généralisée au cours de ces dix dernières années. On a pu constater, du fait de la réduction des coûts d'acquisition et de la simplification de la mise en œuvre de ces techniques, que quelques responsables de chantier ont franchi le pas et troqué leur crayon gris et leur planchette pour un scanner laser 3D. Notre équipe CNRS, qui avait déjà acquis une certaine expérience dans le domaine de la restitution 3D appliquée à l'archéologie, a souhaité expérimenter l'apport de la lasergrammétrie et de la photogrammétrie sur l'un de ses chantiers en cours : la citerne el-Nabih à Alexandrie. Entamées en 2003, les campagnes de relevé et de fouilles touchent aujourd'hui à leur fin. À l'heure où démarre la phase du traitement des données de terrain, nous nous proposons de présenter succinctement les caractéristiques du chantier de la citerne el-Nabih, la méthode développée durant et après la fouille, et les premiers résultats de l'apport de l'utilisation de ces nouvelles technologies.

**Mots-clés** : étude architecturale, étude archéologique, 3D, lasergrammétrie, photogrammétrie, citerne, Alexandrie, Égypte

**Abstract** : The application of new 3D technology to the fields of architectural and archaeological study has become more common during the past ten years. With the reduction in purchase costs and the simplification in operation of these techniques, one has noticed that certain site directors have traded in their pencils and drawing boards for a 3D laser

scanner. Having already acquired a certain experience in the domain of 3D reproduction as applied to archaeology, our CNRS team was looking to experiment with the potential contribution of lasergrammetry and photogrammetry to one of its ongoing study projects, el-Nabih cistern in Alexandria. The surveying and excavation campaigns begun in 2003 are now approaching the end. As we start the phase of post-excavation data analysis, we would like to present in brief the characteristics of el-Nabih site, the methods developed during and after the dig, and the initial results of the contribution provided by the use of this new technology.

**Keywords** : architectural study, archaeological study, 3D, lasergrammetry, photogrammetry, cistern, Alexandria, Egypt

## LA CITERNE EL-NABIH

La citerne el-Nabih, grand réservoir public de la fin de la période médiévale, est l'un des derniers témoignages visibles qui fonctionnaient avec l'étonnante infrastructure d'alimentation en eau de l'antique Alexandrie. Elle est située à moins de 800 mètres au sud-ouest de la Bibliotheca Alexandrina, dans l'angle sud-est du jardin Nubar Pasha aménagé sur l'emprise d'un tronçon de la muraille de la ville arabe, démantelée au début du xx<sup>e</sup> siècle (fig. 1a et 1b). Le Centre d'Études Alexandrines (CEAlex), en collaboration avec le Service des Antiquités égyptien, place

ce monument au cœur d'un vaste projet de conservation et de mise en valeur<sup>1</sup>.

Cet édifice, aujourd'hui entièrement enterré, comporte un réservoir, de volume approximativement cubique (13 m x 11,50 m x 12 m), dont la contenance est d'environ 1 000 m<sup>3</sup> (fig. 2). Les murs de cette cuve, d'une épaisseur de près de 1,20 m, sont constitués d'un appareil de petits moellons. Afin de résister à la poussée des terres, la stabilité de la structure est assurée par un système de contreventement composé de quatre rangées de quatre colonnes, entrecroisées d'arcs et étagées sur trois niveaux. L'ensemble des points d'appui verticaux (bases, tambours et chapiteaux), au nombre de quarante-huit, est constitué d'éléments d'architecture réemployés provenant d'édifices antérieurs (fig. 3). Les éléments maçonnés (parois verticales, sol et arcs) de la structure de la cuve sont couverts d'un enduit hydraulique destiné à assurer l'étanchéité du réservoir. La citerne est dotée de deux systèmes de couverture différents. En partie nord, le couvrement 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 l'assemblage d'arcs diaphragmes et de voûtes en berceau<sup>2</sup>.

#### PROBLÉMATIQUE DE L'ÉTUDE ARCHITECTURALE ET ARCHÉOLOGIQUE

Alors que de nombreuses études ont été consacrées<sup>3</sup> à l'ensemble du système d'alimentation en eau de la ville, dont le fonctionnement débute dès la fondation de la cité par Alexandre Le Grand et s'interrompt au début du *xx*<sup>e</sup> siècle au moment du démantèlement récent du réseau ancien<sup>4</sup> – héritage de près de 23 siècles de l'Histoire de l'hydraulique alexandrine –, nos connaissances sur les techniques mises en œuvre pour la construction de ces réservoirs médiévaux, restent lacunaires, voire inexistantes. Il en est de même pour les datations de ces citernes. Outre l'aspect patrimonial du projet, c'est dans la perspective de répondre à ces questions que l'étude architecturale et archéologique a été conduite.

#### BREF HISTORIQUE DE L'ÉTUDE

Entamée en 2003, par les relevés de l'intérieur de la cuve, la phase de terrain de l'étude préalable au projet touche aujourd'hui à sa fin. Cinq campagnes de fouilles

ont été conduites, entre 2006<sup>5</sup> et 2009. Les données archéologiques ainsi que le matériel issu des fouilles sont en cours d'étude et doivent donner lieu à une monographie consacrée au monument et à ses environs immédiats. Ne disposant pas des moyens techniques en lasergrammétrie et en photogrammétrie au moment du démarrage du chantier, l'édifice et les structures bâties mises au jour durant la fouille ont d'abord fait l'objet d'un relevé à l'échelle 1/20° (fig. 4a). Les pièces d'architectures, que l'on trouve en réemploi dans les points d'appui de la cuve, ont, quant à elles, été relevées<sup>6</sup> à l'échelle 1/5°. Dans ces deux cas, les techniques mises en œuvre ont fait appel aux outils traditionnels employés jusque là pour le dessin en architecture et en archéologie : tachéomètre, planchette, etc. C'est sur la base de cette documentation graphique (plans, coupes et élévations) qu'un premier modèle tridimensionnel a été réalisé (fig. 4b). L'objectif de cette modélisation était triple : d'une part, appréhender le monument dans son ensemble afin de mieux comprendre la diversité de sa mise en œuvre, d'autre part, posséder un outil qui nous permette une réflexion sur les différentes hypothèses des remaniements qu'a connus le bâtiment, et enfin, disposer d'une aide pour la conduite de la fouille. Par exemple, les choix de l'implantation et de la profondeur maximum des sondages ont ainsi été déterminés avec précision en amont (fig. 5a et 5b) afin de pallier tout risque d'effondrement<sup>7</sup>.

#### MISE EN ŒUVRE DU SCANNER LASER 3D ET DE LA PHOTOGRAMMÉTRIE

Ce n'est qu'à partir de 2008, suite à la dotation par le CNRS d'un scanner laser 3D<sup>8</sup>, que notre équipe a pu envisager d'entreprendre le relevé tridimensionnel de la citerne et de ses abords. S'est alors posée la question du bien-fondé d'une telle démarche. Que pouvait-on attendre d'une telle entreprise alors que nous possédions déjà une documentation graphique assez conséquente ? La raison principale qui a motivé notre équipe, outre l'attrait pour ces nouveaux outils, est le fait que nous allions enfin pouvoir comparer les méthodes traditionnelles de relevé avec ces nouvelles en, terme de temps de mise en œuvre, de précision des levés et de coûts, et ce, sur un même bâtiment. L'acquisition tridimensionnelle des structures bâties, des blocs d'architecture et des coupes

1. Borel & March 2006a ; Borel & March 2009.

2. Pour les premiers résultats de l'étude historique et architecturale, voir Borel & March 2006b ; March & Borel 2007 ; March & Borel 2009.

3. Pour un état complet et récent sur la question de l'hydraulique à Alexandrie, voir Hairy 2009.

4. En 1911, un arrêté municipal ordonne, pour des raisons sanitaires, la fermeture des puits et des citernes d'Alexandrie. March & Borel 2009, 422 fig. 2.

5. Pour les résultats de la première campagne, voir Borel & March 2006b.

6. Les premiers relevés des pièces d'architectures ont été effectués en 1997 par L. Borel, E. Combe, Chr. Pigounaki. Ils ont été complétés et achevés de 2007 à 2008 par M. Cabarro et S. Dubourg.

7. Lors de la fouille extensive de la couverture de la cuve, parfois seuls les 30 cm d'épaisseur des claveaux des voûtes en berceau nous séparaient du sol de celle-ci situé environ 10 mètres plus bas.

8. Le scanner laser 3D, Trimble® GX, a été acquis dans le cadre d'une demande d'équipement mi-lourd accordée à notre unité à la fin de l'année 2007.

stratigraphiques a donc été effectuée sur la globalité du site étudié. En complément et avec l'aide d'Yves Egels, Ingénieur général de l'IGN, la photogrammétrie des parois internes de la cuve a été entreprise et est en voie d'achèvement.

MÉTHODOLOGIE : PARTICULARITÉS DES LIEUX, DIFFICULTÉS, ADAPTATION DES OUTILS

Le contexte particulier des lieux – un bâtiment 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 (fig. 6) – nous a contraint à adapter et développer certains outils<sup>9</sup> ainsi qu'à multiplier le nombre de stations<sup>10</sup> et, de fait, le nombre de cibles et de sphères<sup>11</sup> indispensables au géoréférencement des nuages de points (fig. 7). S'ajoutait à cela la difficulté d'accéder au niveau supérieur de la cuve, tant pour la mise en station du scanner que pour les prises de vue nécessaires à la photogrammétrie, l'installation d'un échafaudage n'étant pas envisageable lors de l'acquisition des données.

TRAITEMENT DES DONNÉES

L'ensemble des nuages de points a été géoréférencé par le positionnement de toutes les données lasers dans un référentiel géométrique unique<sup>12</sup>. Celui-ci, réalisé à partir d'un réseau topographique<sup>13</sup>, réunit dans un même repère orthonormé les coordonnées approchées des cibles et des sphères mises en place à l'intérieur et à l'extérieur de la citerne. Une fois géoréférencés, les nuages de points ont été triangulés, avant d'être colorisés par la radiométrie des photographies<sup>14</sup> préalablement redressées à l'aide du logiciel *Redresseur* (fig. 8). De plus, une expérimentation

9. Mini trépied, "chevalet" pour la mise en station sur les arcs, équerre pour les stations horizontales (plan fourni par Yves Egels), etc.

10. À l'issue de la dernière campagne, le nombre total des stations extérieures est de trente-trois et celui des stations intérieures est de soixante-quatre.

11. Soixante et onze cibles ont été posées et trente-huit sphères ont été mises en place. Pour des problèmes de coût, nous avons utilisé des boules de pétanque pour enfant qui ont été peintes et disposées, à l'aide d'un fil de nylon, au centre des travées.

12. Les calculs topographiques approchés ont été réalisés avec le logiciel *Cap*, ceux de la compensation micro-géodésique avec le logiciel *Comp3D*, la consolidation des nuages de points a été opérée avec le logiciel *Cumulus* et les orthophotos ont été obtenues avec le logiciel *Redresseur*. Tous les logiciels cités ont été conçus et développés par Yves Egels. Ils ont été gracieusement mis à notre disposition par leur auteur que nous tenons ici à remercier chaleureusement à la fois pour sa générosité et aussi pour son aide précieuse dans cette entreprise.

13. Les levés de terrain ont été réalisés par le service topographique du CEAlex, sous la direction de Cécile Shaalan.

14. Les clichés ont été réalisés avec un appareil photographique numérique dont l'étalonnage géométrique (définition en fonction de la focale, du centrage et de la distorsion de l'optique) a été réalisé sur un banc.

de modélisation 3D par photogrammétrie<sup>15</sup>, procédé en cours de développement par Marc Pierrot-Deseilligny, Directeur de Recherche à l'IGN, a été réalisée sur le point d'appui vertical n° 103.

PREMIERS RÉSULTATS

Tout comme les données archéologiques, les données issues de la lasergrammétrie, de la photogrammétrie et de la modélisation 3D par photogrammétrie sont en phase de traitement. Les travaux présentés ici sont le résultat d'une étude en cours (fig. 9a, 9b et 10). Ils ont été obtenus lors des premières phases de calcul alors que l'acquisition de terrain n'avait pas encore été achevée<sup>16</sup>. La documentation réalisée, au fil de l'avancement des calculs, nous a permis de visualiser graphiquement les zones qui n'avaient pas encore été couvertes au moment de l'acquisition avec le scanner laser 3D. Cette interaction, entre le traitement des données, et les levés *in situ*, nous a guidés afin d'optimiser au mieux la suite de l'avancée des opérations de terrain et ainsi éviter d'éventuels manques dans la couverture laser du monument.

CONCLUSION

Dans le cadre de l'étude de la citerne el-Nabih, comme sur de nombreux autres chantiers archéologiques, la donnée altimétrique – le Z du repère orthonormé – a d'abord simplement été exploitée comme une valeur renseignant la documentation stratigraphique et planimétrique (cotes altimétriques, montage des coupes). Ce n'est qu'avec l'introduction du modèle 3D, conçu pour enrichir la réflexion sur le monument, que notre équipe a pu appréhender et entrevoir l'objet étudié en volume et non plus au travers d'une représentation issue d'une projection. La première volumétrie schématique, voire illustrative, du bâtiment ne nous permettait pas, du fait de son imprécision tridimensionnelle, d'envisager de mettre en corrélation les faits archéologiques avec les déformations structurelles observées à l'intérieur et à l'extérieur de la cuve. Cette approche n'a pu être envisageable qu'avec l'apport des résultats obtenus conjointement par la lasergrammétrie et la photogrammétrie ; lasergrammétrie pour la précision du *fac-similé* tridimensionnel et photogrammétrie pour l'exactitude de la colorisation des surfaces générées par les orthophotos.

15. Pierrot-Deseilligny & Pappadimitriou 2006 ; Pierrot-Deseilligny 2007.

16. Les documents présentés ont été réalisés à l'issue de la campagne 2008.

---

## Bibliographie

- Borel, L. et Chr. March (2006a) : "La citerne el-Nabih : Projet de conservation et mise en valeur", in : [www.cealex.org](http://www.cealex.org).
- (2006b) : "La citerne el-Nabih : Étude historique, architecturale et première campagne de fouille", in : [www.cealex.org](http://www.cealex.org).
- (2009) : "Le projet el-Nabih. Conservation d'un symbole du patrimoine hydraulique alexandrin", in : *Hairy 2009*, Alexandrie, 444-457.
- Hairy, I. (2009) : *Du Nil à Alexandrie, histoires d'eaux*, catalogue d'exposition, Alexandrie, 717.
- March, Chr. et L. Borel (2007) : "La citerne el-Nabih à Alexandrie : témoin remarquable de la redécouverte d'un patrimoine unique", in : *Actes du troisième colloque de L'Année Francophone Internationale, Alexandrie métaphore de la Francophonie, La transmission des connaissances, des savoir et des cultures*, 12-15 mars 2005, Alexandrie, Paris, 85-92.
- (2009) : "Citerne el-Nabih un dispositif remarquable de l'hydraulique alexandrine", in : *Hairy 2009*, 420-443.
- Pierrot-Deseilligny, M et N. Paparoditis (2006) : "A Multiresolution and Optimization-based Image Matching Approach: An Application to Surface Reconstruction From SPOT5-HRS Stereo Imagery", in : *IAPRS vol XXXVI-1/W41 in ISPRS Workshop On Topographic Mapping From Space (With Special Emphasis on Small Satellites)*, Ankara, Turquie.
- Pierrot-Deseilligny, M. (2007) : "MicMac, un logiciel pour la mise en correspondance automatique d'images dans le contexte géographique", *Bulletin d'information de l'Institut Géographique National*.

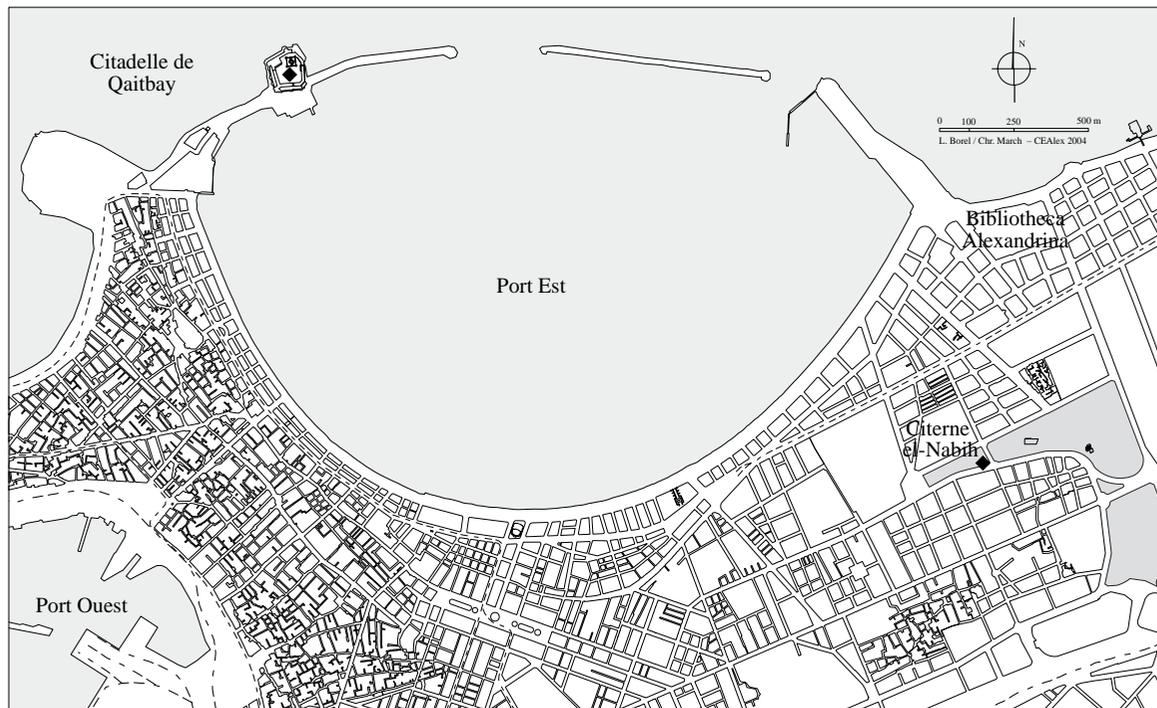


Fig. 1a. Plan de situation de la citerne el-Nabih. Fond de carte CEALex, infographie L. Borel, Chr. March © CEALex.



Fig. 1b. Vue extérieure des environs de la citerne montrant les aménagements touristiques datant de la première moitié du xx<sup>e</sup> siècle. Cl. L. Borel © CEALex.

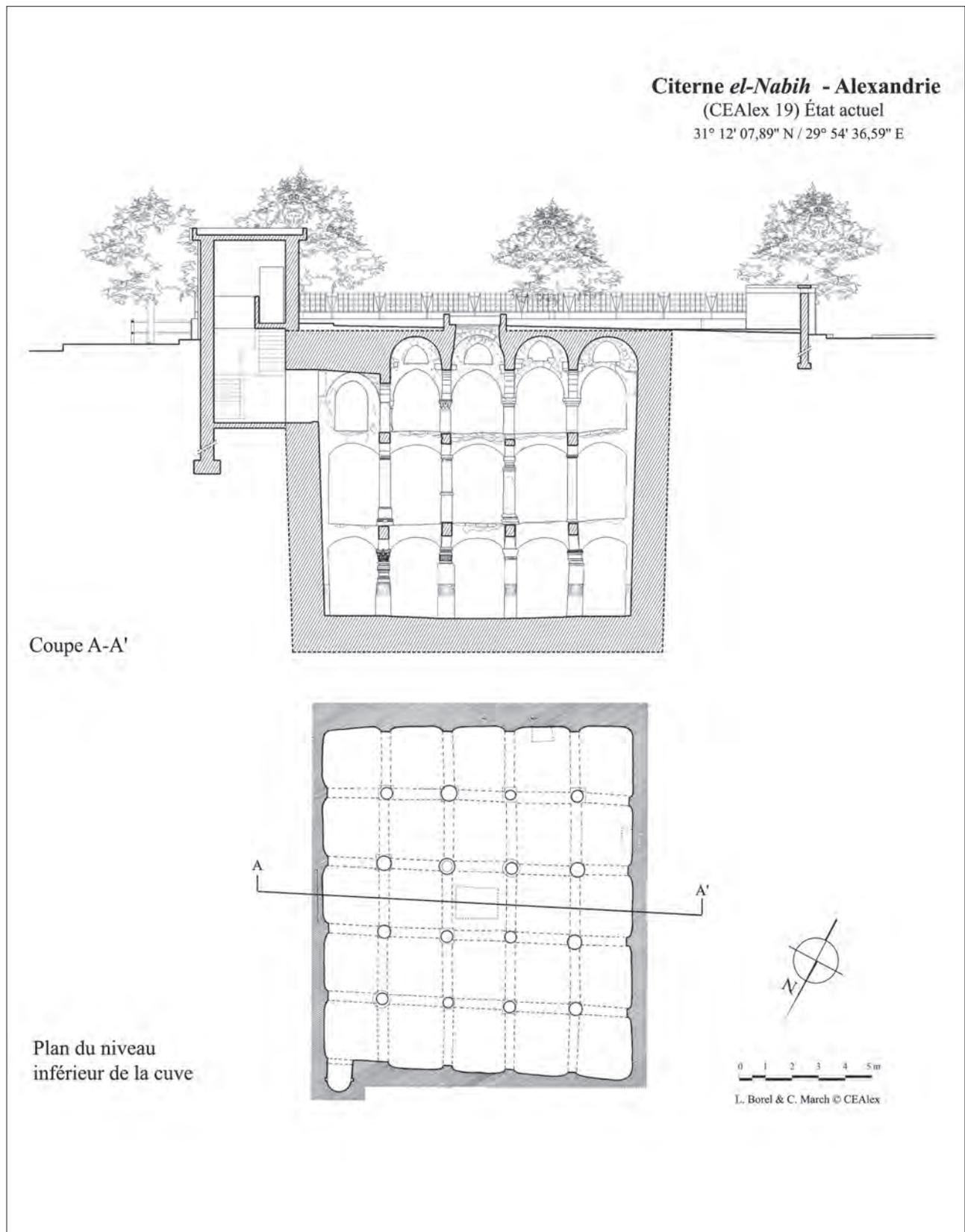


Fig. 2. Plan et coupe est/ouest sur la citerne. D'après : Y. Guyard, I. Hairy, E. Hardy, C. Shaalan.  
Recollement et infographie : L. Borel, Chr. March © CEAlex.



Fig. 3. Vues intérieures de la citerne.  
Cl. L. Borel, R. Collet © CEALex.

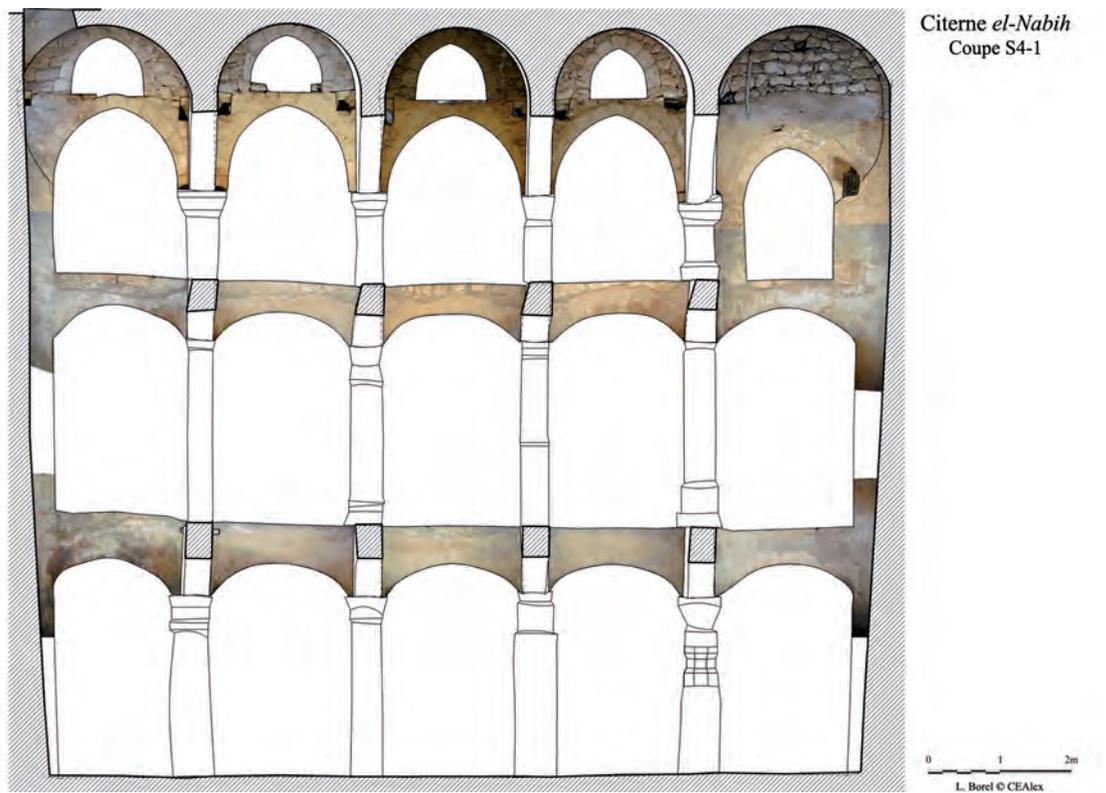


Fig. 4a. Coupe ouest/est (S4-1) avec "l'habillage" des surfaces obtenues par redressement photo. L. Borel © CEALex.

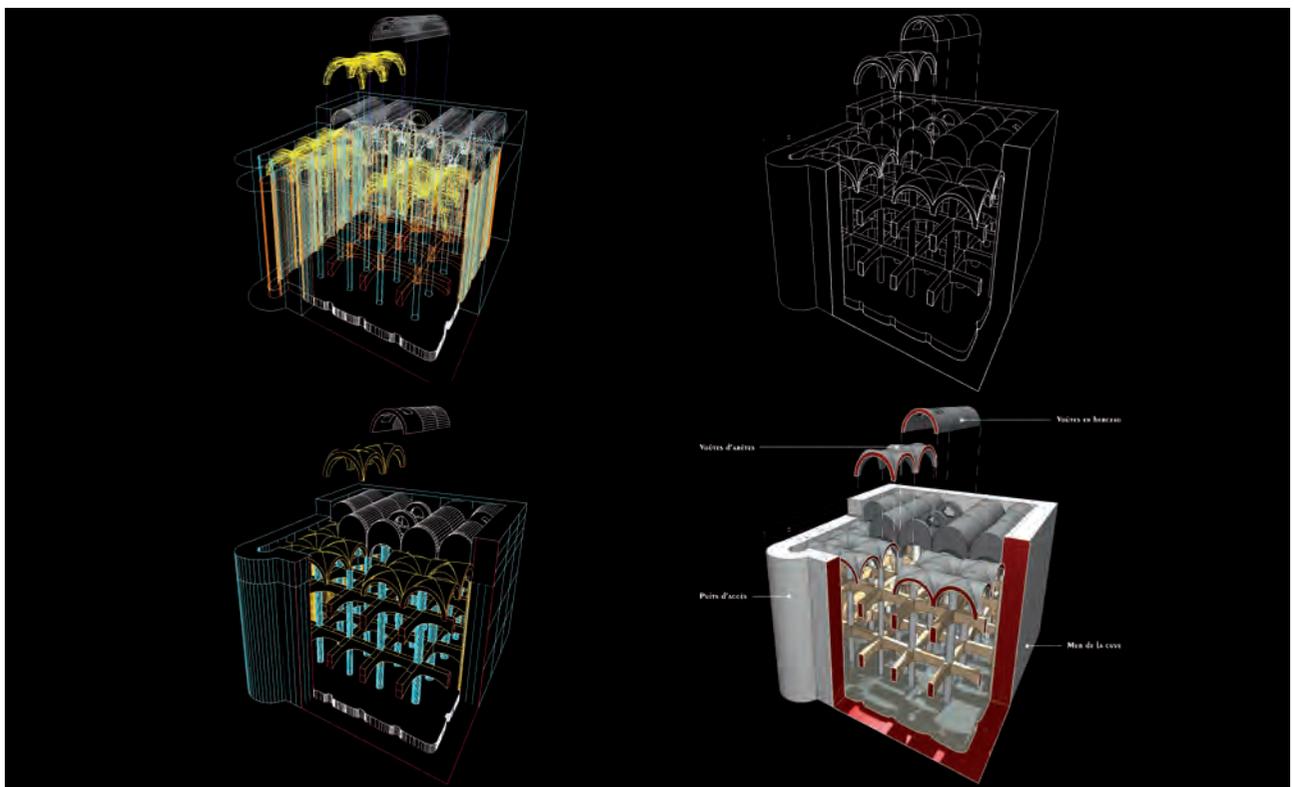


Fig. 4b. Modèle tridimensionnel de la citerne. L. Borel © CEALex.



Fig. 5a. Sondage ouest dans le pavement des voûtes d'arêtes. Cl. L. Borel © CEALex.

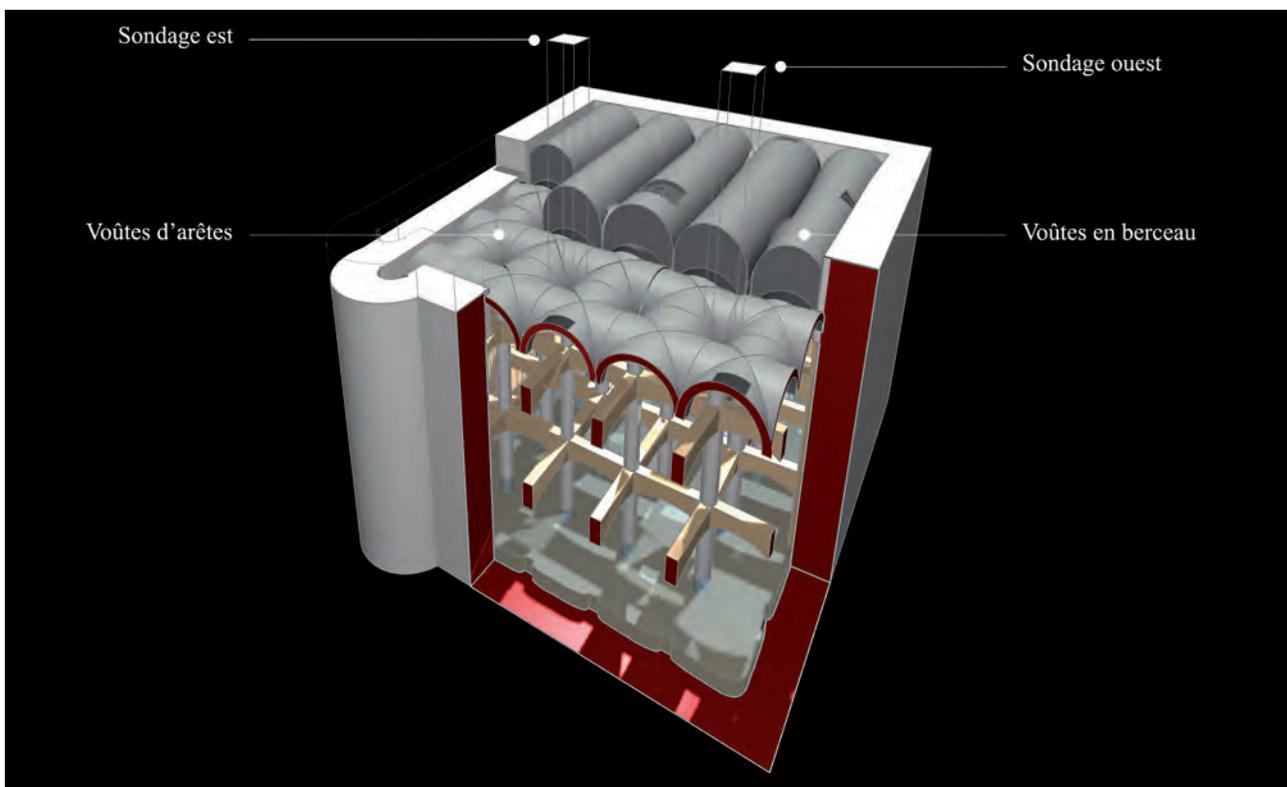


Fig. 5b. Utilisation du modèle tridimensionnel pour l'implantation des sondages dans les remblais du pavement des voûtes d'arêtes. Modélisation L. Borel © CEALex.



Fig. 6. Vues panoramiques de la citerne : la couverture, les niveaux supérieur, intermédiaire et inférieur de l'intérieur de la cuve.  
Cl. L. Borel © CEALex.



Fig. 7. Différents outils mis en œuvre pour l'acquisition tridimensionnelle de la citerne : cibles et sphères, "chevalet", équerre.  
Cl. L. Borel © CEALex.

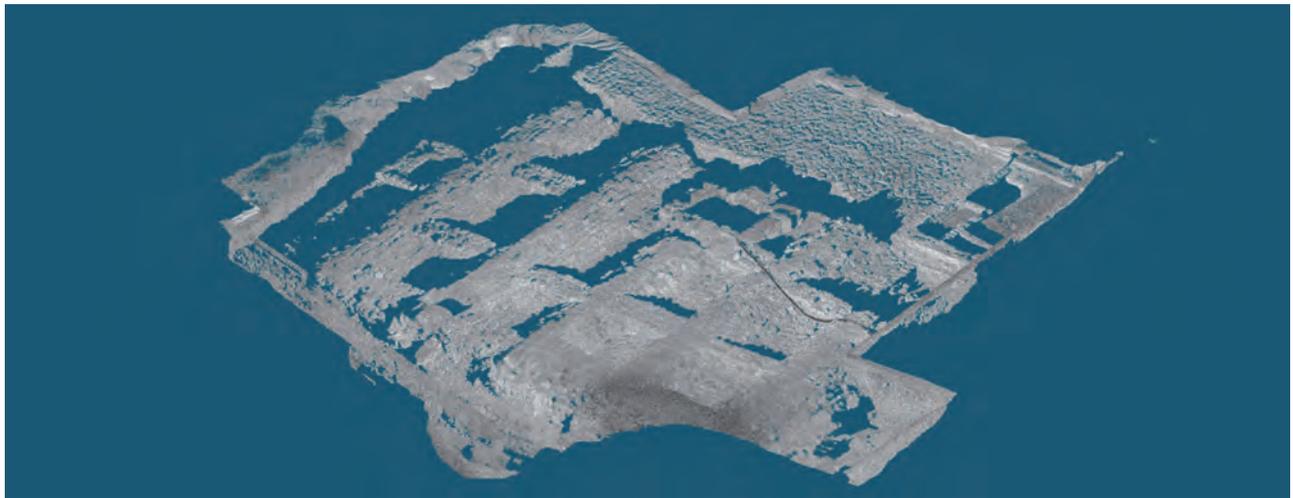


Fig. 8. Nuages de points de la couverture et de la travée centrale de la citerne. Redressement des photographies à l'aide du logiciel Redresseur. L. Borel © CEALex, Y. Egels © IGN.

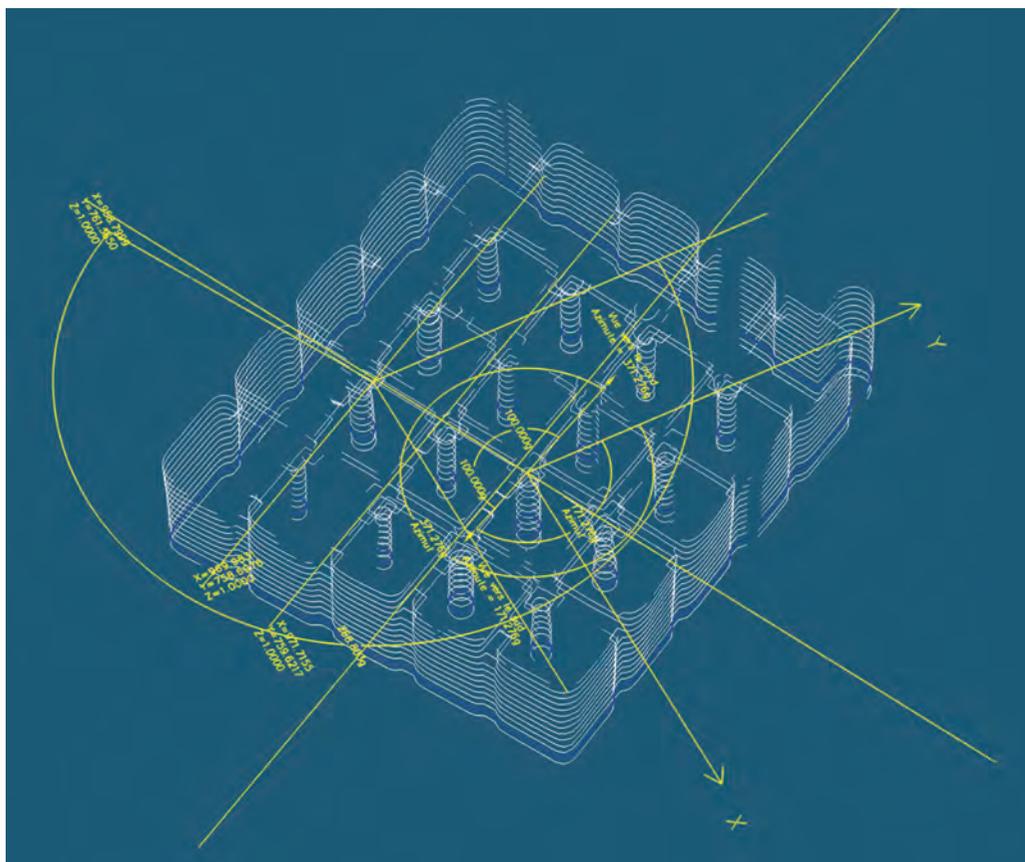


Fig. 9a. Coupes tous les 25 cm du niveau inférieur de la cuve. L. Borel © CEALex, Y. Egels © IGN.

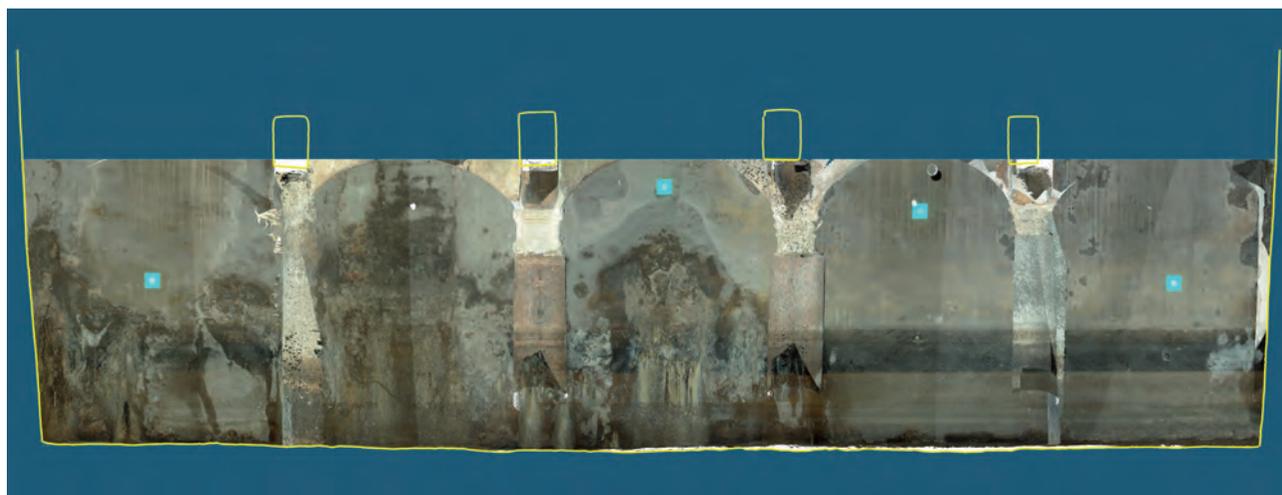


Fig. 9b. Orthophoto partielle de la paroi ouest de la cuve. L. Borel © CEALex, Y. Egels © IGN.

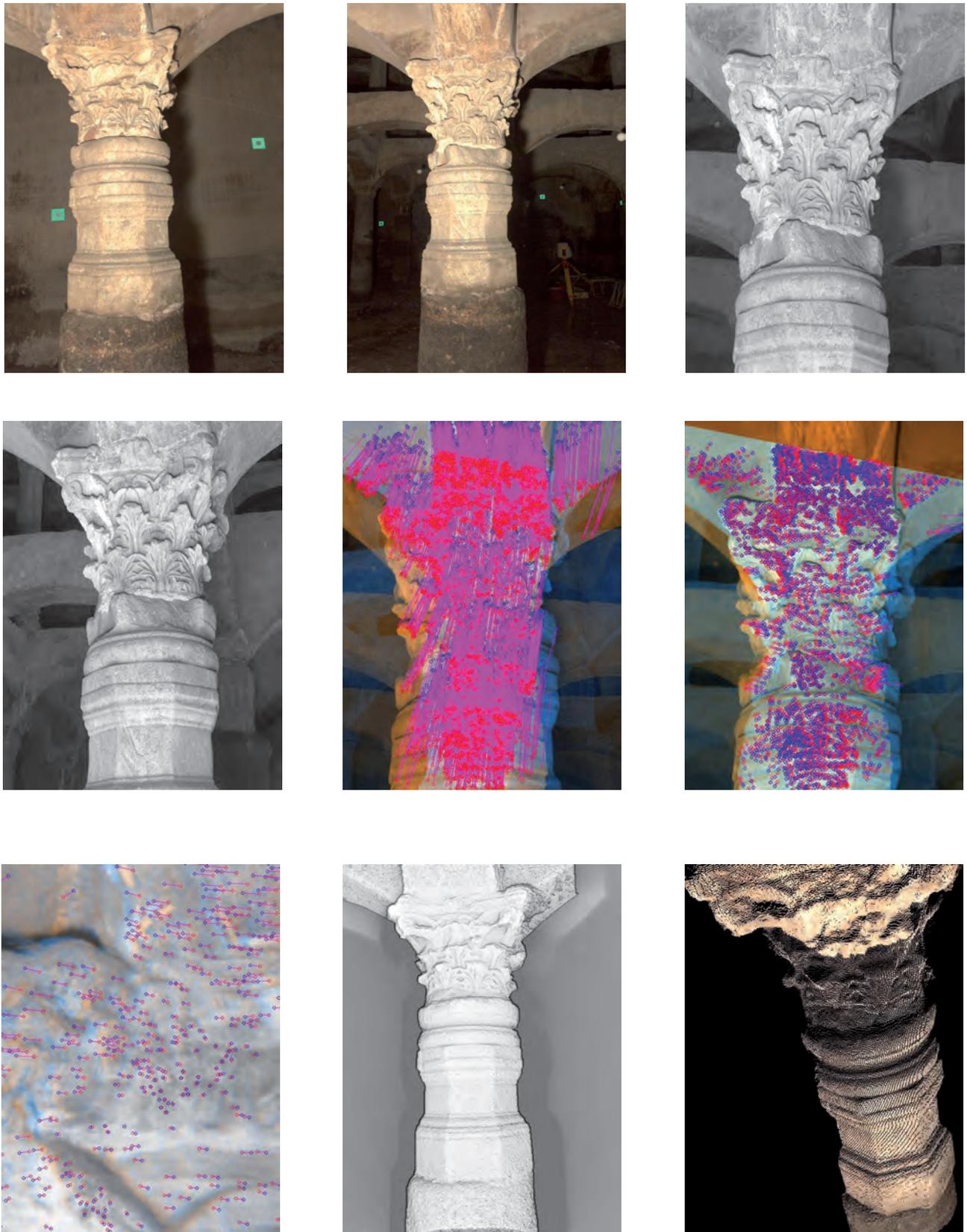


Fig. 10. Différentes étapes de la modélisation 3D par photogrammétrie du point d'appui n°103. Y. Egels, M. Pierrot-Deselligny © IGN.