



HAL
open science

La reconstitution de la colonne des danseuses de Delphes

Guillaume Thibault, Jean-Luc Martinez

► **To cite this version:**

Guillaume Thibault, Jean-Luc Martinez. La reconstitution de la colonne des danseuses de Delphes. Virtual Retrospect 2007, Robert Vergnienx, Nov 2007, Pessac, France. pp.231-238. hal-01774309

HAL Id: hal-01774309

<https://hal.science/hal-01774309v1>

Submitted on 25 Apr 2018

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.

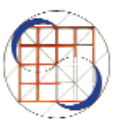
L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Vergnienx R. et Delevoie C., éd. (2008),
Actes du Colloque Virtual Retrospect 2007,
Archéovision 3, Editions Ausonius, Bordeaux

Tiré-à-part des Actes du colloque Virtual Retrospect 2007

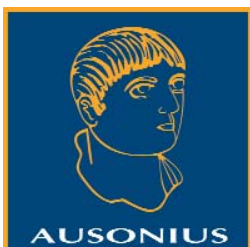
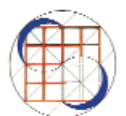
Pessac (France) 14, 15 et 16 novembre 2007



G.Thibault, J.-L. Martinez

La reconstitution de la colonne des danseuses de Delphes

.....pp.231-238



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

<http://archeovision.cnrs.fr>



La reconstitution de la colonne des danseuses de Delphes

Guillaume Thibault¹ guillaume.thibault@edf.fr
Jean-Luc Martinez² jean-luc.martinez@louvre.fr

¹EDF Recherche & Développement, 1, av. du général de Gaulle 92141 Clamart

²Musée du Louvre, 34 quai du Louvre 75001 Paris

Résumé : Érigée sur le site du sanctuaire d'Apollon à Delphes, la colonne des danseuses fut découverte en 1894 par des chercheurs de l'École française d'Athènes sous la forme de plus de 260 fragments. Composée d'une colonne végétale à laquelle semble s'adosser un groupe sculpté de trois figures féminines, il s'agit de la plus haute colonne votive de la Grèce antique – 14 mètres – et la première attestée à présenter un chapiteau à feuilles d'acanthe. Conservée au musée de Delphes, elle continue de présenter des difficultés d'interprétation du fait de son morcellement. Depuis 1993, J.-L. Martinez étudie l'hypothèse émise par P. Amandry selon laquelle la colonne était surmontée d'un omphalos, pierre qui selon les Anciens marquait le centre du monde.

À sa demande, une équipe formée de chercheurs d'EDF et des partenaires dont les principaux sont l'INRIA¹, l'ENST² et MENS I ainsi que d'artistes de l'IIM³, a bâti une méthode de remontage du monument en trois dimensions permettant de vérifier les hypothèses archéologiques. 34 fragments à raccorder ont ainsi été remontés virtuellement grâce à un logiciel de traitement de mesures laser dans un relevé complet intégrant les 260 éléments. La grande nouveauté de cet outil d'anastylose est sa capacité à traiter des centaines de millions de mesures. Le nuage de points fut ensuite maillé puis ombré pour faire ressortir les détails géométriques aux fins de publication scientifique. La colonne fut finalement restituée au plus proche de son état originel, intégrée dans le paysage delphique.

Ce projet a été mené dans le cadre des actions de mécénat de compétences de la Fondation EDF, au bénéfice de l'École française d'Athènes, avec le concours du Musée du Louvre.

Mots-clés : Delphes, colonne des danseuses, anastylose virtuelle, maillage, ombrage, restitution.

Abstract : Located on Apollo's sanctuary in Delphi, the column of the dancers was discovered in 1894 by archaeologists of École française d'Athènes dismantled into 260 fragments. It stands as the tallest votive column of classical Greece – 14 meters – and the first to display a capital with acanthus leaves. But its division induced interpretation difficulties: since 1993, J.-L. Martinez

studies the hypothesis formulated by P. Amandry, a column topped by an omphalos, white stone held as the world's navel.

To support his search, a team of computer scientists from EDF and INRIA, ENST, MENS I, and artists from IIM have designed a methodology to heighten the monument in three dimensions and check the archaeological hypothesis. The 34 fragments to be joined were virtually moved to their original places thanks to software dedicated to the processing of hundreds of millions of laser point cloud. The data were then meshed and rendered with shadows to display the geometric details to be published. The column was then virtually integrated into the Delphic scenery.

This project was conducted under the patronage of EDF Foundation, for École française d'Athènes, with the help of the Louvre Museum.

Keywords : Delphi, column of the dancers, virtual anastylosis, mesh, shadows, rendering.

LA COLONNE DES DANSEUSES

Depuis sa découverte en 1894, cet exemple exceptionnel de la sculpture grecque du IV^e siècle a.C soulève des difficultés d'interprétation de sa composition du fait de son morcellement (fig. 1). La compréhension et la chronologie de l'œuvre n'ont ainsi été que très progressivement acquises. En raison de son feuillage, qui rappelait celui du Silphium, une plante médicinale, la colonne végétale fut d'abord considérée comme une œuvre de Cyrène. C'est en 1896 que T. Homolle rapprochait de ce piédestal un groupe sculpté de trois figures féminines adossées. Entre 1952 et 1972, J. Marcadé rétablissait le geste exact de ces prétendues danseuses, en réalité des caryatides qui soutenaient elles-mêmes la cuve d'un énorme trépied de bronze, aujourd'hui disparu (des traces de coulures d'élément métallique ont été retrouvées entre les figures féminines). En 1961, J. Pouilloux et G. Roux identifiaient la base qui, dans le sanctuaire, supportait cette offrande. En 1993, enfin, l'étude de P. Amandry, ancien directeur de l'École, bientôt rejoint par J.-L. Martinez, alors membre scientifique, proposait de compléter de façon étonnante cette restitution : dans la cuve du trépied supportée par les "danseuses" aurait été placé un omphalos de marbre, cette pierre représentant un nombril et figurant aux yeux des Grecs le centre du monde.

1. Institut National de Recherche en Informatique et en Automatique (Sophia Antipolis).

2. École Nationale Supérieure des Télécommunications (Paris).

3. Institut International du Multimédia, au sein du Pôle Léonard de Vinci (Courbevoie).



Fig. 1. Musée de Delphes, salle des danseuses et de l'omphalos.

À cette date, le monument n'avait jamais fait l'objet d'un relevé complet. La restitution à laquelle on était parvenu par le dessin reposait sur des relevés partiels, dont le détail et l'assemblage demandaient à être vérifiés. Compte tenu de la complexité de l'œuvre, de sa masse ainsi que de la dispersion des fragments entre les salles d'exposition et les réserves du musée, seul un relevé tridimensionnel surfacique de l'omphalos, des feuilles d'applique, des tambours, du groupe sculpté et des lits d'attente devait permettre de contrôler des hypothèses qui reposaient jusqu'alors sur la seule observation.

LA RECONSTITUTION VIRTUELLE

Objectifs à atteindre

L'objectif principal a été de tester plusieurs hypothèses de remontage du monument, à savoir les raccords entre les 34 fragments non raccordés (fig. 2) et les tambours ou grandes feuilles de la base de la colonne (fig. 3, 4 et 5), l'ordre de superposition des tambours avec alternance du sens des mortaises, la superposition du chapiteau et du tambour aux 3 figures féminines (fig. 6), le raccord entre le lit d'attente des danseuses et l'omphalos.

Une fois que ces objectifs scientifiques furent atteints, un second objectif fut fixé, à savoir reconstituer l'état originel du monument pour permettre au public de prendre conscience de la colonne intégrale, avec le rétablissement du dessin des feuilles d'acanthé et d'un tambour, la reconstitution de la physionomie des danseuses et de leur costume, et l'intégration de l'offrande dans le paysage de Delphes pour mieux comprendre ses relations avec les monuments voisins.

Chantier de relevé laser

Les 260 fragments de la colonne ont été numérisés en 3 dimensions dans les salles et la réserve du musée de Delphes. L'équipe de relevé disposait sur place de deux scanners⁴ ainsi que d'une structure porteuse afin de pouvoir effectuer des mesures sur des blocs mesurant plus de 4 mètres de haut. 615 millions de mesures, organisés en 2200 saisies, ont été recueillis en 6 jours.

Assemblage des saisies élémentaires

Les saisies ont été assemblées pour former un seul nuage de points par fragment et tambour. Cette étape est délicate : il faut que le traitement logiciel minimise les distances entre les différentes saisies pour ne pas introduire d'erreur qui viendrait ensuite perturber les étapes suivantes. En particulier, l'erreur de mesure étant trop importante en bord de champ du scanner (erreur causée par la distorsion inhérente au procédé), un filtrage strict a été opéré manuellement pour ne conserver que les points contribuant à un assemblage juste à 3 millimètres près. 214 millions de points utiles ont été conservés.

Cette quantité de données correspond à la demande archéologique : l'archéologue a besoin de visualiser les détails géométriques de chaque fragment de la colonne pour mener ses analyses, détails qu'il faut donc échantillonner avec une densité de points élevée.

Remontage des fragments

Il s'agit à ce stade de déplacer et de pivoter les fragments les uns par rapport aux autres pour reconstituer l'état originel de la colonne. Apparaissant virtuellement sur l'écran d'ordinateur, les morceaux de marbre, pesant plusieurs dizaines voire centaines de kilos, peuvent ainsi être manipulés sans risque, alors que les opérations réelles identiques requerraient des moyens de manutention exceptionnels.

La qualité de ce travail dépend de la correspondance entre les faces en vis-à-vis. Certains blocs peuvent s'ajuster très précisément car les faces en regard ne sont pas trop abîmées. Pour ceux qui sont particulièrement dégradés, l'opération est beaucoup plus délicate. Selon les cas, un algorithme de minimisation des écarts entre faces a pu être utilisé.

L'archéologue a pu bénéficier de développées cylindriques des tambours pour percevoir globalement la surface de

l'élément (Duguet *et al.* 2004) et y détecter des sites d'accueil pour les différents fragments en exploitant les contraintes de placement 2D selon un plan de cannelure le cas échéant. Le fragment candidat au remontage était alors positionné en 3D avec respect de la contrainte 2D et en minimisant sa distance aux points du tambour et des fragments déjà positionnés.

Le cas des 3 grandes feuilles d'applique a été traité de manière spéciale pour 2 motifs : d'une part il a fallu les déplâtrer virtuellement avant de tenter le remontage de leurs fragments ; d'autre part elles ne sont pas développables mathématiquement. Le remontage a de ce fait été réalisé manuellement.

En dépit du nombre de points à visualiser, le logiciel utilisé a autorisé toutes les vues et manipulations des fragments et de leur remontage, via une organisation des points économe en mémoire.

L'utilisation de relevés denses ne constitue pas une innovation en soi (Zollikofer & Ponce de León 2002). En revanche, l'exploitation de ces données pour faire progresser l'étude archéologique, à savoir le remontage de 34 fragments (obligeant à revoir le placement des 226 autres), est une innovation du point de vue archéologique.

Maillage et ombrage

La colonne remontée (fig. 7), sous forme d'un nuage de 214 millions de points, n'offrait pas une lisibilité suffisante pour la publication scientifique. Il a fallu mailler : les points les plus proches ont été reliés entre eux, créant des triangles, propices à la production d'images de synthèse lisibles. Un soin important a été apporté à la qualité du maillage : la présence de facettes ne devait pas conduire à une perception faussée des formes du monument. Cet écueil fut évité en exploitant la quantité de données disponible : le côté de chaque triangle étant inférieur à 3 millimètres, les triangles étaient indétectables visuellement dans les vues choisies.

Toutefois, il a fallu élaborer un algorithme de maillage apte à "franchir le mur des très grands nuages de points". Elle fut trouvée grâce à une collaboration exemplaire entre l'INRIA, l'ENST et EDF R&D centrée sur les travaux de thèse de F. Duguet : les 214 millions de points ont été transformés en 100 millions de triangles avec succès au moyen d'une technique de résolution volumique de l'équation de Poisson appliqué au champ de normales, économe en mémoire grâce à une subdivision récursive adaptative de l'espace [Duguet *et al.* 2005].

Ces triangles ont ensuite reçu un ombrage de type "portion de ciel visible" approché [Tarini *et al.* 2003] qui favorise la perception naturelle des replis [Langer & Bülthoff 1999]. Cet ombrage a ainsi contribué à augmenter la lisibilité des images destinées à la publication scientifique.

Restitution de l'état originel

Deux chefs de projets et 8 étudiants de l'IIM ont modélisé avec soin les parties de l'édifice partiellement ou entièrement détruites, à partir des maillages 3D générés précédemment,

4. Minolta VI910, erreur de dispersion millimétrique (3 σ).

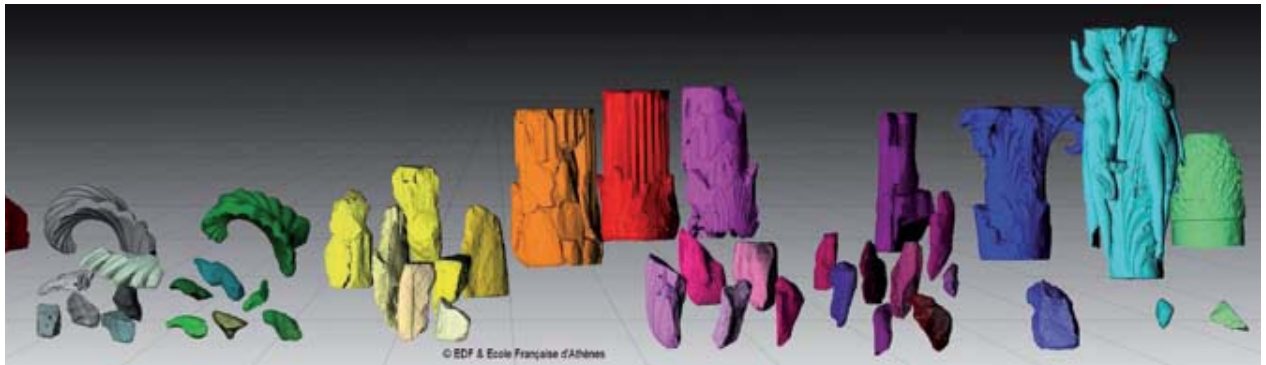


Fig. 2. Les fragments avant remontage.



Fig. 3. Développée du 5^{ème} tambour, avant remontage, avec guides.

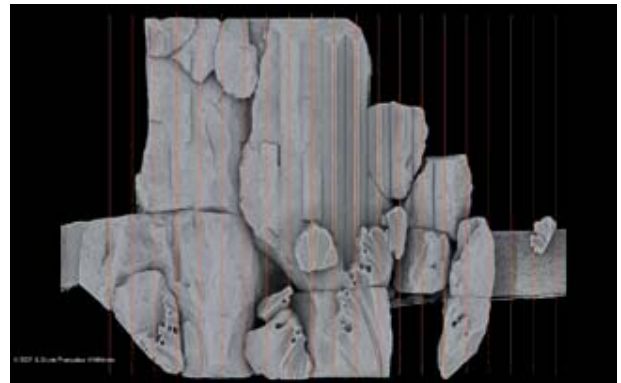


Fig. 4. Développée du 5^{ème} tambour avec ses fragments remontés.



Fig. 5. Tambour 2 remonté maillé ombré, prêt pour la publication scientifique.



Fig. 6. Chapiteau, danseuses et omphalos correctement remontés, *vis de face*.



Fig. 7. Colonne remontée maillée ombrée (à gauche) ;
colonne restituée (à droite).

sous la direction de l'archéologue pour exploiter des similitudes avec des statues du Louvre.

Ces illustrations permettent au public de prendre conscience de la colonne intégrale dans le paysage delphique, de percevoir la physionomie des 3 danseuses (elles diffèrent subtilement entre elles) ainsi que leurs costumes (fig. 8), également légèrement distincts : l'une tient à peine son vêtement, l'autre le serre plus fermement et la dernière pas du tout. Des subtilités apparaissent dans le boutonnage à l'épaule de leur chiton (tunique), dans les boucles d'oreille et la chevelure, des finesses qui étaient invisibles à 14 m de hauteur (fig. 9).

SYNTHÈSE

Sur le plan technique, ce projet a été l'occasion de faire progresser les algorithmes de traitement de nuage de points 3D de très grande taille. Ces techniques, bien que connues pour des données de plus petites tailles (quelques dizaines de millions de points), ont été fortement étendues afin de traiter la quantité de données utile aux investigations archéologiques.

Sur le plan archéologique, les hypothèses archéologiques ont toutes été vérifiées, et des découvertes sont apparues.

La très forte implication commune des différents acteurs – archéologues, chercheurs, artistes – sur la durée a contribué aux avancées significatives. De plus, une méthode nouvelle a été bâtie, exploitable par les archéologues pour d'autres objets sculptés.



Fig. 8. Anatomie restituée des 3 figures féminines.



Fig. 9. Colonne restituée intégrée dans le site d'Apollon Pythien.

REMERCIEMENTS

Nous remercions Dominique Mulliez, Hélène Aurigny, Danièle Braunstein, Sophie Vidal, Philippe Collet, Jean-Philippe Xillo qui, dans le cadre de leurs travaux à l'École française d'Athènes, ont à maintes reprises assisté le projet et au Louvre Katerina Chatziefremidou qui a bien voulu servir de modèle.

Les innovations en matière de maillage de très grands nuages de points 3D ont été le fruit du travail de thèse de Florent Duguet (INRIA et ENST) sous la direction scientifique de George Drettakis et Francis Schmitt, en partenariat avec EDF. Ces travaux ont été partiellement financés par le Ministère de la Recherche.

Daniel Girardeau-Montaut a contribué, dans le cadre de sa thèse (thèse CIFRE entre EDF et l'ENST, placée sous la direction de Michel Roux et Raphaël Marc) aux traitements de développée cylindrique, d'ombrage, d'extraction et de conversion de données.

Christophe Duperthuy, Raouf Benjema, Fabrice Mollo, Anne-Claire Guillotin et Xin Chen de la société MENSJ ont apporté leur appui dans la mise au point des traitements adaptés aux très grands nuages de points, implémentés dans Realworks.

Les deux chefs de projet multimédia Rémy Chinchilla et Jean-Patrick Bouchet, ainsi que leurs coreligionnaires Julien Vernay, Julien Merten, Yvan Njnodjom, Cécile Paillaud, Mathieu Roumegoux, Boris Vaugenot, Pierre-Olivier Guérin, Nicolas Renou, placés sous la direction de Marc Bellan de l'IIM ont apporté un concours artistique digne de professionnels.

Nous remercions Jacques Droulez du Collège de France (Laboratoire de Physiologie de la Perception et de l'Action) pour ses apports sur l'ombrage de nuage de points.

Nous remercions également Carlos Hernandez (doctorant ENST), Christophe Schlick et Tamy Boubekeur (LABRI : Laboratoire Bordelais de Recherche en Informatique) pour leurs échanges en matière de reconstruction et de simplification de maillage.

L'équipe Insight dirigée par K. Cain (Roth Cain, Mark Eakle, Tom Gill, Philippe Martinez) a été engagée pour l'acquisition et l'assemblage des données. Alan Chalmers de l'Université de Bristol a prêté un scanner ; deux étudiants de son équipe, Peter Longhurst et Gavin Ellis, ont épaulé l'équipe Insight.

MeshAlign, développé par P. Cignoni du Visual Computing Lab de l'Institut de Sciences Informatiques et de Technologies du Conseil National de la Recherche Italien, a été utilisé pour l'assemblage des données.

Rémi Allègre et Raphaëlle Chaine du LIRIS (Université Claude Bernard Lyon I) ont apporté leur concours pour le maillage difficile du nuage du fragment 36.

À EDF R&D, Raphaël Marc, Christophe Mouton, Stéphane Ploix, Christian Boucheny, Alain Schmid, Michel Terver, Nathalie Sénéchal, Eric Lorentz et Françoise Waeckel ont apporté un soutien précieux.

Bibliographie

- La redécouverte de Delphes*, École française d'Athènes, 1992.
- Bommelaer, J.-F. et D. Laroche (1991) : *Guide de Delphes. Le site. École française d'Athènes*, collection Sites et Monuments VII.
- Duguet, F., G. Drettakis, D. Girardeau-Montaut, J.-L. Martinez, F. Schmitt (2004) : "A Point-Based Approach for Capture, Display and Illustration of Very Complex Archeological Artefacts", in : *the 5th International Symposium on Virtual Reality, Archaeology and Cultural Heritage VAST*.
- Duguet, F., C. Hernandez, G. Drettakis, F. Schmitt (2005) : *Level of Detail Continuum for Huge Geometric Data*, rapport INRIA n° 5552.
- Langer, M. et H. Bülthoff (1999) : *Perception of shape from shading on a cloudy day*, Technical Report n° 73.
- Martinez, J.-L. (1997) : *La colonne des Danseuses de Delphes*, *Académie des Inscriptions et Belles Lettres*. Comptes-rendus des séances, 35-46.
- Tarini, M., P. Cignoni, R. Scopigno (2003) : "Visibility based methods and assessment for detail-recovery", in : *Proc. of Visualization*.
- Zollikofer, C. P. E., M. S. Ponce de León (2002) : "Computer-assisted paleoanthropology : the 4th dimension", in : *Three-dimensional Imaging in Paleoanthropology and Prehistoric Archeology*, Archaeopress.