



**HAL**  
open science

## Modélisation par objets réutilisables : fragmentation en éléments d'une architecture de terre. Application au petit caravansérail de la citadelle de BAM (Iran)

Frank Chopin, Olivier Bouet, Vida Gholipour, Elham Andaroodi, Kinji Ono, Eskandar Mokhtari

### ► To cite this version:

Frank Chopin, Olivier Bouet, Vida Gholipour, Elham Andaroodi, Kinji Ono, et al.. Modélisation par objets réutilisables : fragmentation en éléments d'une architecture de terre. Application au petit caravansérail de la citadelle de BAM (Iran). Virtual Retrospect 2007, Robert Vergniew, Nov 2007, Pessac, France. pp.127-133. hal-01771024

**HAL Id: hal-01771024**

**<https://hal.science/hal-01771024v1>**

Submitted on 20 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.



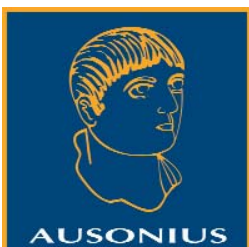
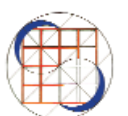
Vergnienx R. et Delevoie C., éd. (2008),  
Actes du Colloque Virtual Retrospect 2007,  
Archéovision 3, Editions Ausonius, Bordeaux

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

Pessac (France) 14, 15 et 16 novembre 2007



F.Chopin, O.Bouet, V. Gholipour, E. Andaroodi, K. Ono, E. Mokhtari,  
*Modélisation par objets réutilisables : fragmentation en éléments d'une architecture de terre. Application à la modélisation du petit caravansérail de la citadelle de BAM (Iran) . . . . .* pp.127-133



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)

<http://archeovision.cnrs.fr>



# Modélisation par objets réutilisables : fragmentation en éléments d'une architecture de terre. Application au petit caravansérail de la citadelle de Bam (Iran)

Frank Chopin<sup>1</sup> frank.chopin@evcau.archi.fr  
Olivier Bouet<sup>1</sup> olivier.bouet@evcau.archi.fr  
Vida Gholipour<sup>1</sup>  
Elham Andaroodi<sup>2</sup> elham@nii.ac.jp  
Kinji Ono<sup>2</sup> ono@nii.ac.jp  
Eskandar Mokhtari<sup>3</sup> eskandarmokhtari@yahoo.com

<sup>1</sup> Laboratoire EVCAU – Ecole d'Architecture de Paris Val de Seine  
3 quai Panhard et Levassor 75013 Paris, France.

<sup>2</sup> National Institut of Informatics  
Hitotsubashi 2-1-2, Chiyodaku-Ku, Tokyo 101-8430, Japon.

<sup>3</sup> Iranian Cultural Heritage and Tourism Organisation  
Bam recovery office of ICHTO  
Darband square, Saad Aabad palace Museum.  
Téhéran, Iran.

**Résumé :** La ville de Bam, dans la partie sud-est de l'Iran est l'un des plus grands ensembles au monde fait de terre. Détruite en grande partie lors du tremblement de terre de 2003, elle fait l'objet, pour ses bâtiments les plus remarquables d'une reconstitution virtuelle. La modélisation en cours du petit caravansérail est présentée ici. Cette reconstitution utilise des documents de sources et d'époques variées. L'architecture à reconstituer impose une analyse de la nature morphologique et constructive du bâtiment de terre ainsi que la recherche d'une méthodologie liée aux outils de modélisation du logiciel choisi (3DSMax).

**Mots-clés :** Architecture de terre – Héritage culturel – Caravansérail – Outils de Modélisation – Fragmentation.

**Abstract :** The city of Bam, in south-eastern Iran is one of the greatest mud brick architectures in the world. Vastly damaged during the earthquake of 2003, a virtual 3D reconstruction is started for its most remarkable buildings. The modeling process of small caravanserai is presented here. This 3-D reconstruction uses documents from a variety of sources with different chronology. The architecture to rebuild imposes an analysis of morphological and constructive nature of the mud brick building and a research on the methodology related to the modeling tools of the chosen software (3DSMax).

**Keywords :** Mud brick architecture – Cultural heritage – Caravanserai – Modeling Tools – Fragmentation.

## INTRODUCTION

La ville de Bam située dans la province du Kerman à la lisière sud du haut plateau iranien (hauteur moyenne 1000 m) se trouve à environ 1300 km au sud-est de Téhéran. Juchée sur un piton rocheux, la forteresse primitive d'Arg-e-Bam fut fondée probablement sous la dynastie des Parthes (247 a.C. ; 226 a.C.). Oasis en plein plateau désertique, à la confluence de nombreuses routes marchandes, la forteresse d'Arg-e-Bam et la ville environnante réputées pour la production de soie et de vêtements connurent leur apogée entre les VII<sup>e</sup> et XI<sup>e</sup> siècle. La forteresse est maintes fois modifiée et consolidée. Elle a été rebâtie une dernière fois lors du règne des Kadjar aux XVIII<sup>e</sup> et XIX<sup>e</sup> siècles. Le site a été abandonné au milieu du XIX<sup>e</sup> siècle pour laisser place à une ville "moderne" située dans la palmeraie environnante<sup>1</sup>.

La particularité remarquable de l'ensemble est l'utilisation pour sa construction d'adobe et de bauge. La forteresse d'Arg-e-Bam et sa vieille ville sont entourées d'un rempart de plus de 10 m de haut et long de 3 km.

1. Karimi 2001 ; Mehriar 2004.

Inscrites sur la Liste du patrimoine mondial en péril de l'UNESCO, Arg-e-Bam et sa vieille ville Arg, constituent l'un des plus grands ensembles au monde fait de terre. Faisant l'objet de restaurations, l'ensemble fut détruit à 70 % par le tremblement de terre du 26 décembre 2003 d'une intensité de 6,3 sur l'échelle de Richter.

En parallèle à la reconstruction des monuments les plus remarquables de la citadelle (fig. 1) qui demande des moyens humains, techniques et financiers considérables, la reconstitution virtuelle<sup>2</sup> d'une partie de ces monuments est menée sous l'égide du laboratoire DSR (Digital Silk Roads) du NII (National Institute of Informatics, Tokyo, Japon) en collaboration avec l'ICHTO (Iranian Cultural Heritage and Tourism Organisation, Téhéran, Iran). De telles reconstitutions virtuelles ont l'avantage d'être pérennes, peu coûteuses, de constituer une base de connaissance pour la reconstruction physique, d'être supports de communication et de recherche de financement.

Ce travail de reconstructions 3D commencé courant 2004 est mené sur une dizaine de bâtiments (1, 10, 11, 12, 13, 17, 22, 24, 30, 33 fig. 1). Il rassemble plusieurs équipes d'institution variées :

- l'Université de Waseda de Tokyo,
- l'Université des Beaux Arts de Téhéran,
- l'EVCAU, laboratoire de l'École d'Architecture de Paris Val de Seine.

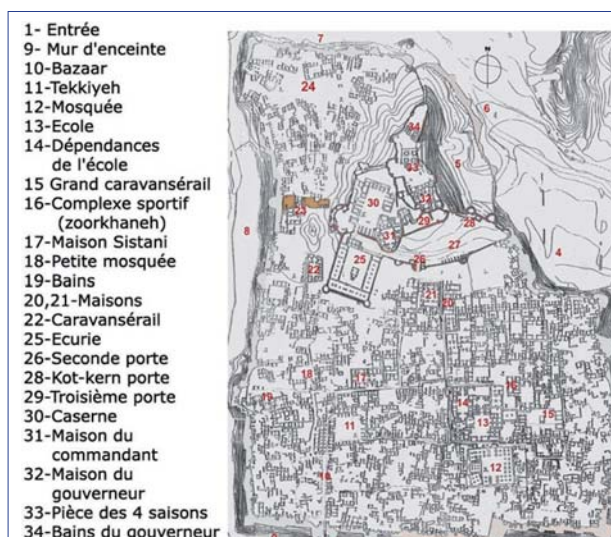


Fig. 1. Plan du site de Bam et emplacements de monuments remarquables (Crédit : ICHTO).

UN EXEMPLE EN COURS LE PETIT CARAVANSÉRAIL

### Documents d'origine et relevés

Même si la documentation sur Bam est relativement importante, l'étendue du site et la multiplicité des bâtiments font que l'on dispose de peu de documents sur chaque construction. Il n'existe en particulier que très peu de documents exploitables sur les restaurations et reconstructions faites peu de temps avant le tremblement de terre, qui ont déterminé l'état des bâtiments à reconstruire virtuellement. Ainsi, pour le petit caravansérail, bâtiment de 2 étages de 20 m x 30 m formé d'une quarantaine de pièces réparties sur 4 ailes autour d'une cour de 11 m x 14 m, les documents initiaux comprenaient un plan de chaque étage et deux sections dessinés, quelques photos éloignées, et une restitution photogrammétrique filaire au format dwg (projet IFCA : Irano French Cartographic Agreement entre le CNRS et le NCC : Iranian National Cartography Center : restitution faite par le Dr. Adle) du bâtiment (fig. 2).

Ces documents ne peuvent suffire à la bonne compréhension de la nature des espaces à représenter. Une maquette 3D doit être validée à partir de données cohérentes. Ainsi la confrontation au site est indispensable, quel que soit son état de destruction, afin d'en analyser la nature morphologique et constructive.

Cette exploration, première étape d'une future modélisation, eut lieu en janvier 2007. Elle permit de faire les mesures appropriées, d'avoir des relevés photographiques systématiques (murs, voûtes, détails) de chacune des pièces ou parties de pièces de l'édifice.

Les relevés topométriques de points remarquables du bâtiment ont complété les mesures. Ces relevés faits à l'aide d'une station de mesure Trimble série 3600 ont permis une modélisation filaire partielle du bâtiment (fig. 3).

Des croquis ont été ajoutés à cette base de documents. L'ensemble alimente une base de données consultable sous la forme d'un site Web.

### La modélisation : le choix du modèle polygonal compte tenu de la nature du bâtiment

D'un côté le NII demande que la modélisation finalisée soit transmise au format de fichier .max Autodesk®.

De l'autre l'analyse des données numériques fournies ainsi que des rapports de corrections de maquettes numériques d'autres édifices fait apparaître le recours fréquent au logiciel Autocad®.

Nous avons fait le choix d'utiliser uniquement le logiciel Autodesk® 3DS Max® 9 pour plusieurs raisons :

- La dimension "artisanale" du logiciel, au sens noble du terme, permet le contrôle du modèle à l'arrêt et au sommet près. Cette dimension est nécessaire vis-à-vis de l'architecture de terre du bâtiment où la régularité n'est souvent pas la règle.

2. Andaroodi 2006.

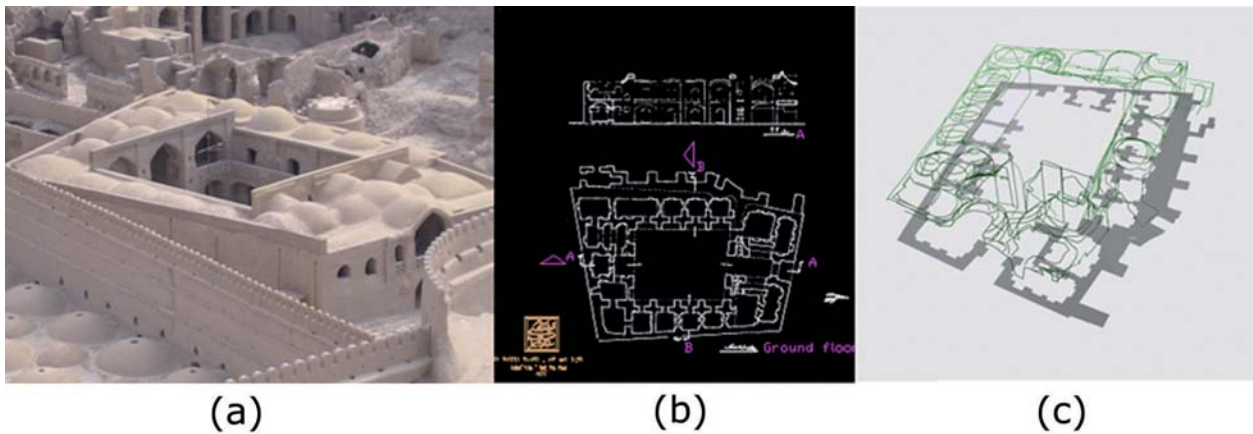


Fig. 2.

(a) Vue sud-est du Caravansérail (après restauration et avant tremblement de terre) (Crédit : ICHTO).

(b) Plan rez-de-chaussée et section (Crédit : ICHTO).

(c) Juxtaposition de la restitution photogrammétrique filaire et du plan de rez-de-chaussée.

— : Relevé filaire (Dr. Adle).

— : Plan DWG du caravansérail.

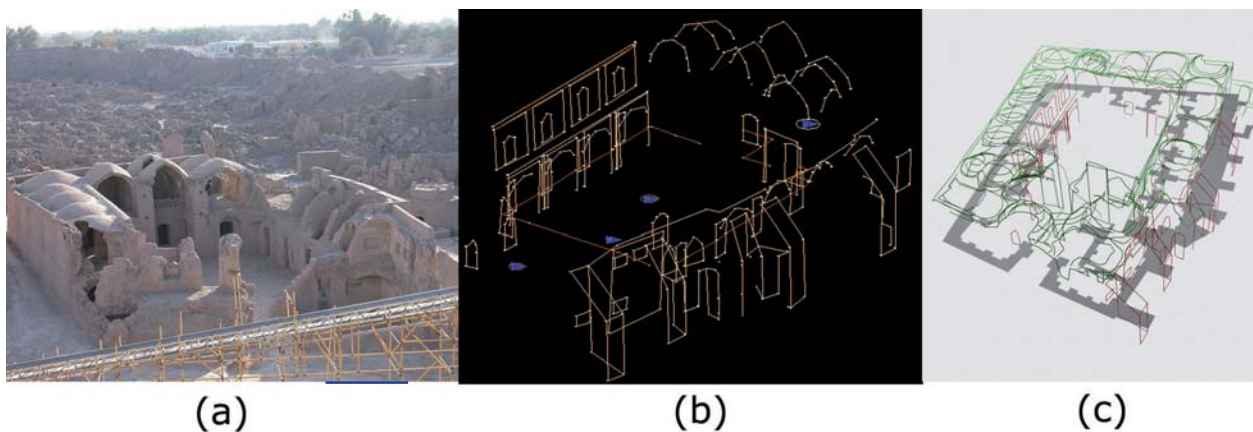


Fig. 3.

(a) Vue du caravansérail janvier 2007.

(b) Relevés topométriques de points remarquables.

(c) Juxtaposition des relevés et du plan de rez-de-chaussée.

— : Relevés topométriques de points remarquables.

- La possibilité de raccorder sommet à sommet les éléments construits, par exemple les arcs aux voûtes.
- La nécessité de gérer et de contrôler des surfaces complexes une par une (voûtes et éléments de toitures).
- L'accès à l'historique des modifications apportées à chaque élément par la pile des modificateurs et la possibilité de copier cette pile à des éléments constructifs similaires.
- L'exigence d'avoir un modèle le plus léger possible pour de futures manipulations avec l'utilisation des outils d'optimisation sur les surfaces maillées.

Une première phase a été consacrée à la recherche d'une méthodologie liée aux usages du logiciel en fonction de

l'architecture à restituer<sup>3</sup>. Elle a consisté en un travail sur l'outil et l'inventaire de ses possibilités.

La modélisation par carreaux de Bézier ou "Patch" et les outils de surface permettent de contrôler courbes et surfaces par un minimum de points. Elle a pour avantage de permettre une approche graphique ; le dessin des lignes sous tend la surface. A contrario cette technique manque de précision particulièrement dans le réglage des tangentes, les surfaces générées se révélant instables à l'usage. La complexité du modèle (arcs et voûtes persanes, murs fruités, ...) rend les modifications délicates et les dépendances peu maîtrisées.

3. Bechmann 2007 ; Ono 2008.



La notion de dépendance est inhérente aux Nurbs<sup>4</sup>. Lorsque l'on souhaite déduire des courbes de surfaces déjà existantes et maintenir entre elles un lien de dépendance, la modélisation Nurbs s'avère être la plus pratique. Cependant il est nécessaire de recourir préalablement à des primitives splines pour une construction géométrique plus précise. On peut convertir avec une bonne précision des splines en Nurbs, mais la nécessité de reconstruire les courbes Nurbs pour en contrôler le nombre de points ralentit le processus de modélisation. Cette stratégie est utilisée pour certains types de voûtes par l'utilisation des surfaces d'extrusion UV.

La modélisation par polygones et l'édition du maillage avec tous les outils d'édition induisent une mise en oeuvre longue mais efficace qui répond à l'exigence d'une modélisation précise et à minima où chaque définition de sommets d'une surface peut se justifier. Cette technique permet une approche au cas par cas. Elle répond au problème particulier posé par la modélisation de la plupart des géométries relevées. Par contre les modificateurs d'édition utilisés n'autorisent pas toujours une bonne gestion des dépendances. Il est donc à prévoir que chaque modification implique une nouvelle réalisation du modèle. Ainsi dans la plupart des cas la gamme des outils possibles de la modélisation polygone et d'édition de maillage a été utilisée.

#### Fragmentation en éléments

Hors les voûtes (intrados et extrados) et la toiture, une partition en deux dimensions des niveaux et des murs a permis de constituer une suite d'éléments fragmentaires. L'opération a été menée d'abord en 2D (plan) et relève d'un simple découpage. Une fois extrudés, les fragments de murs ont été corrigés en fonction de l'imbrication des volumes. Chaque partie a alors pu être manipulée de manière indépendante. Les opérations booléennes ont été nécessaires pour le travail sculptural (fig. 4) (niches et ouvertures).

#### Voûtes

La reconstitution de certaines voûtes (fig. 5), particulièrement dans la partie sud du bâtiment, est rendue possible par la mise en oeuvre des méthodes de déduction d'éléments les uns par rapport aux autres. Les courbes génératrices ont été extraites des lignes d'arêtes des arcs préalablement construits. L'interdépendance des objets et de leurs définitions géométriques se retrouve à tous les niveaux de la modélisation. L'inconvénient de cette méthode est que toute remise en question du niveau de détail de l'un des composants implique une nouvelle modélisation en cascade de toute la chaîne des éléments qui en dépendent.

Les intrados et extrados des voûtes des pièces des ailes est et ouest de même nature géométrique mais tous différents dans leurs cotes et courbures ont, au final, été fait directement en

maillage. L'utilisation d'opérandes comme les déformations libres (FFD)<sup>5</sup>, la sélection adoucie ou le relâchement ont permis une modélisation adaptée au cas par cas à des duplications de typologies identiques (fig. 6).

#### Couverture

Une première approche avec l'usage des déformations spatiales de type "Déplacer" a rapidement été abandonnée pour son manque de précision. La solution retenue a fait appel à la création d'objets composés Conforme. Un gabarit constitué d'un ensemble de volumes primaires matérialisait les coupes. Une surface grille, opérante de l'objet Conforme était projetée sur ce gabarit.

Le positionnement des volumes constituant le gabarit a été ajusté en fonction des lignes fournies par la restitution photogrammétrique filaire. Le résultat final a été contrôlé avec l'outil "Caméramatch" appliqué sur l'unique vue exploitable de la couverture du bâtiment après rénovation et avant tremblement de terre (fig. 7).

#### CONCLUSION

La modélisation numérique de bâtiments en terre comme le sont ceux du site de Bam met en oeuvre de nombreuses fonctionnalités du logiciel. L'édition de maillages, de polygones et leurs opérandes annexes, la sélection adoucie, les modificateurs de déformation libres, de relâchement et les possibilités offertes par la combinatoire de ces modificateurs, constituent une palette d'outils plutôt bien adaptée à la restitution des surfaces irrégulières des enveloppes de bâtiments en terre crue.

Cependant un travail d'analyse de l'espace bâti, de sa structure et la compréhension des modes constructifs est une étape indispensable en préalable à toute formalisation<sup>6</sup>. Ce travail reste une projection pleine d'hypothèses à vérifier. En effet, dans le cas du Petit Caravansénil, les relations entre rez-de-chaussée et étage sont difficiles à établir. Il subsiste de nombreuses inconnues.

Cette première étape est déterminante et conditionne tout le processus de modélisation. Elle permet d'établir les relations de dépendances morphologiques entre les différentes composantes du bâtiment (murs, arcs, voûtes, coupes ...); elle induit une chronologie des modes opératoires.

L'historique attaché à chaque objet modélisé aide à concevoir des modèles paramétrables. Cela doit permettre de répondre :

- au changement d'une dimension relevée,
- à la remise en question du niveau de détail du modèle, par exemple la modification du nombre de segments participant à la définition d'un arc,

4. Rogers 2001.

5. Lefebvre 1999.

6. Houben & Guillaud 2006.

– à une controverse d’experts autour de l’interprétation de documents d’archives.

Les objectifs qui ont déterminé le travail effectué jusqu’alors étaient principalement :

– De concevoir un modèle “idéal” respectant les règles constructives et les proportions des modèles architecturaux de référence.

– De confronter et adapter le “modèle idéal” aux divers éléments de relevés et aux documents d’archives.

– D’adapter autant que possible le processus de modélisation en 3D au mode constructif du bâtiment.

– De rendre possible les corrections et les adaptations du modèle sans remise en question fondamentale.

– De concilier l’exigence du résultat et la recherche d’une meilleure efficacité.

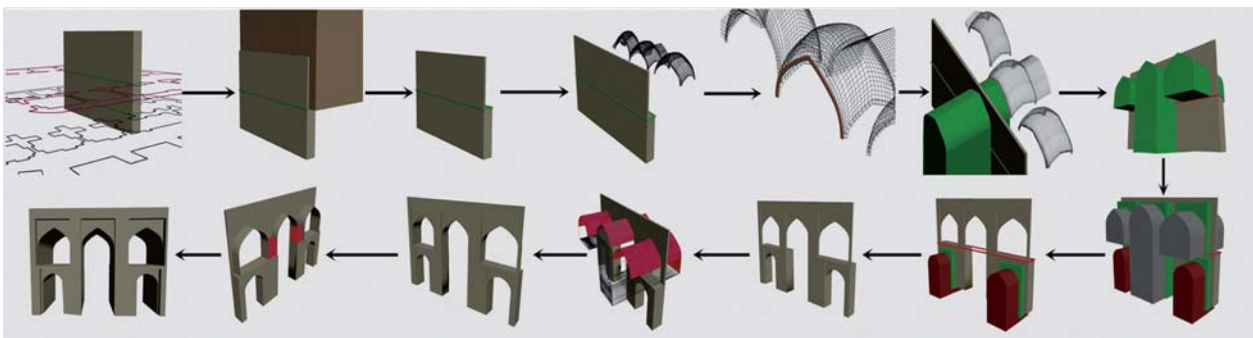


Fig. 4. Fragmentation et modélisation de la façade intérieure sud : Tracés 2D – Murs extérieurs et intérieurs – Voûtes intrados – Arcs – Percements.

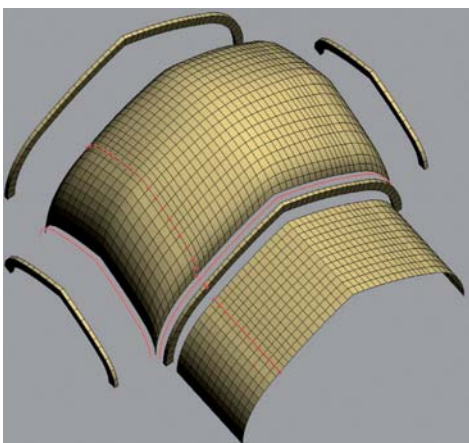


Fig. 5. Courbes génératrices.

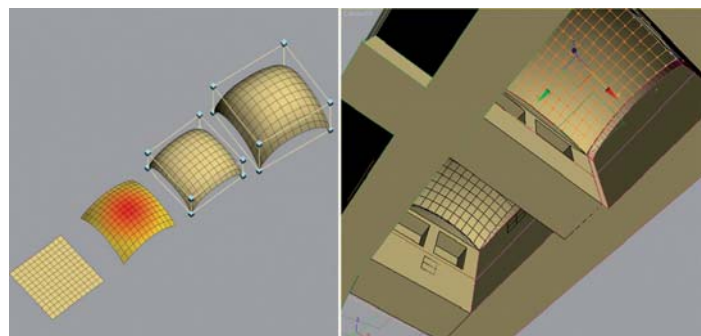


Fig. 6. Exemple de modèle maillé d'intrados de voûte sur une des pièces de l'aile est.

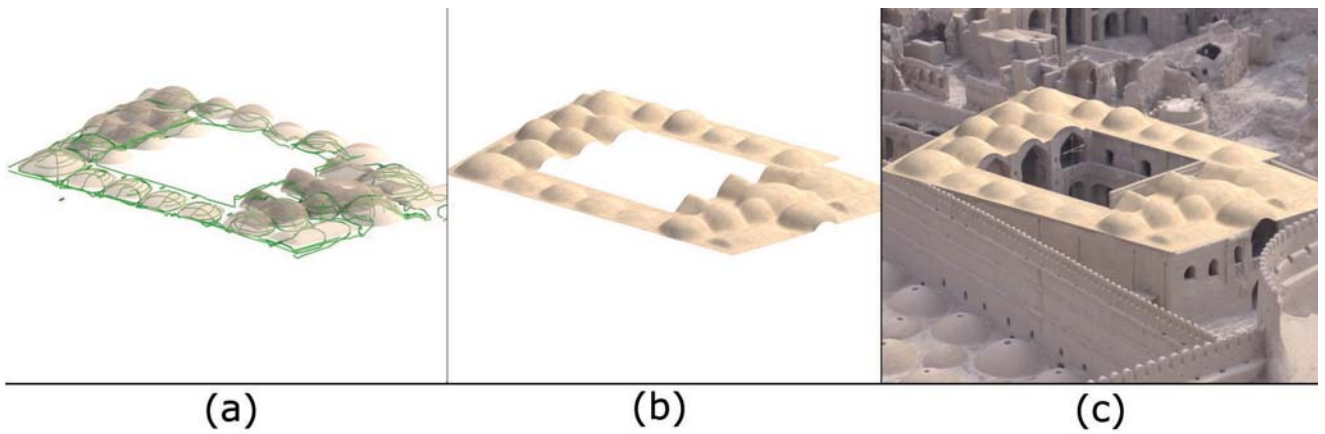


Fig. 7.

(a) Juxtaposition de la restitution photogrammétrique filaire et des volumes primaires matérialisant les coupoles et extrados des voûtes.  
 (b) Modèle 3D de la toiture seule.

(c) Juxtaposition de la vue sud-est du Caravansérail (après restauration et avant tremblement de terre). (Crédit : ICHTO) et du modèle de la toiture.

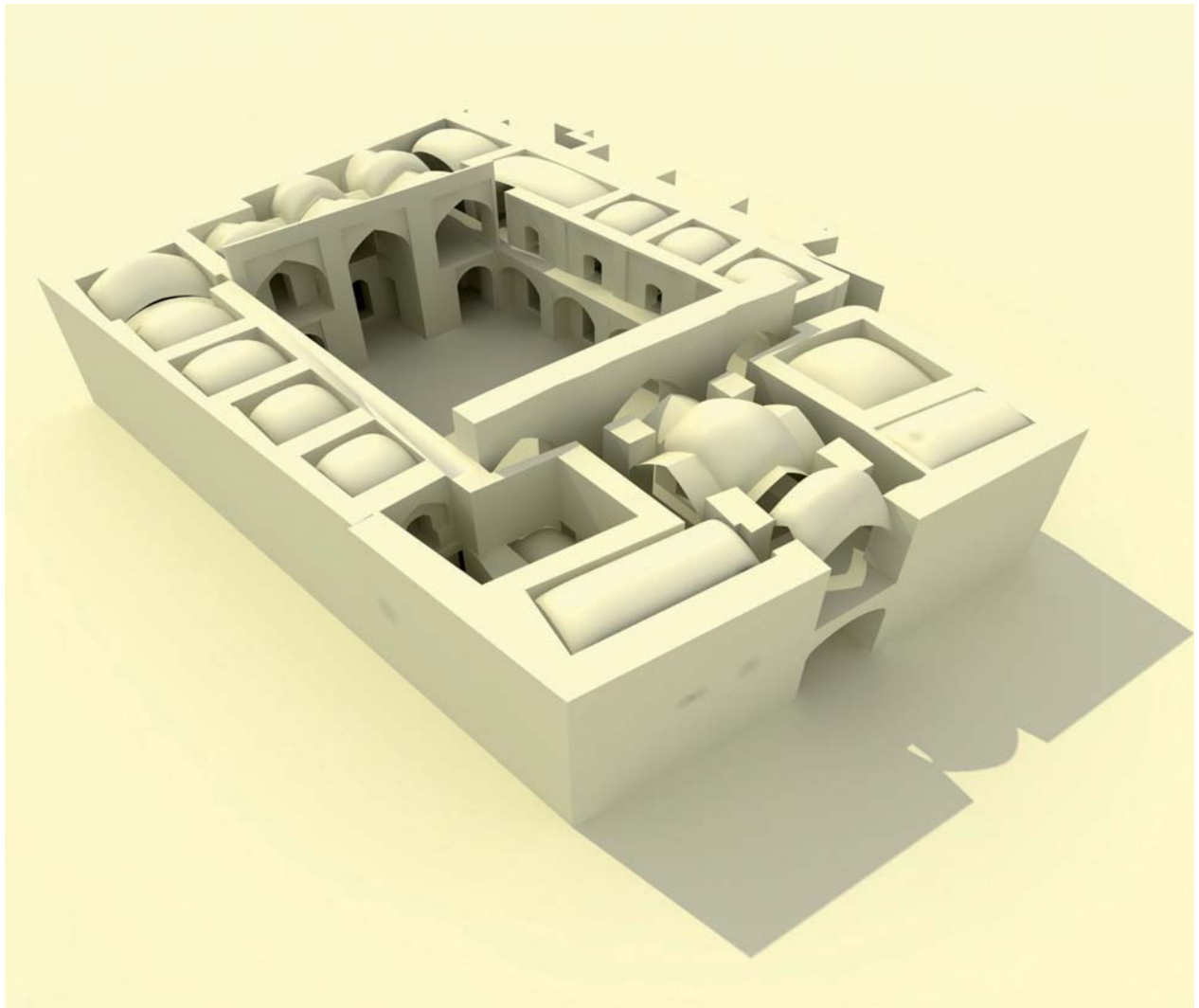


Fig. 8. Vue d'ensemble, sans la toiture, du modèle 3D en cours de réalisation du Caravansérail.



## Bibliographie

- Andaroodi, E., K. Ono, A. Kitamoto, S. M. Beheshti, E. Mokhtari, C. Adle, T. Kawai, N. Abe, A. Ito, A. Enifar, S. Enifar et M. R. Matini (2006) : *3Dimensional Reconstruction and Virtual Reality Bam and its Cultural Landscape*, <http://dsr.nii.ac.jp/bam/virtual/Bam-VR-report-V3.pdf>
- Bechmann, D. et B. Laroche (2007) : *Informatique graphique, modélisation géométrique et animation*, Paris.
- Houben, H. et H. Guillaud (2006) : *Traité de construction en terre*, Marseille.
- Karimi, A. (2001) : "The Architecture of Citadel of Bam and the Silk Industry", in : *Proceedings of the Second Congress of the History of Iranian Architecture and Urbanism, Iranian Cultural Heritage Organization*, 233-267, (in Persian).
- Lefebvre, L. (1999) : *Étude sur les déformations libres*, Département d'informatique et de recherche opérationnelle, Université de Montréal, <http://www.iro.umontreal.ca/~lefebv/FFD.pdf>
- Mehriar, M. (2004) : *The History of Citadel of Bam*, Report of Archaeological Studies, Bam Recovery Office, Iranian Cultural Heritage and Tourism Organization (in Persian).
- Ono, K., E. Andaroodi, A. Einifar, N. Abe, M.R. Matini, O. Bouet, F. Chopin, T. Kawai, A. Kitamoto, A. Ito, E. Mokhtari, S. Einifar, S. M. Beheshti, et C. Adler (2008) : "3DCG Reconstitution and Virtual Reality of UNESCO World Heritage in Danger : the Citadel of Bam", in : *Journal of Progress Informatics* N° 5.
- Rogers, D. F. (2001) : *An Introduction to NURBS Modeling with Historical Perspective*, San Diego.

