



**Utilisation et adaptation de références architecturales en
présence de données incomplètes et hétérogènes.
Modélisation d'un édifice en terre partiellement effondré.**

Sahar Ghaderi, Olivier Bouet, Franck Chopin, Elham Andaroodi

► **To cite this version:**

Sahar Ghaderi, Olivier Bouet, Franck Chopin, Elham Andaroodi. Utilisation et adaptation de références architecturales en présence de données incomplètes et hétérogènes. Modélisation d'un édifice en terre partiellement effondré.. Virtual Retrospect 2009, Robert Vergnien, Nov 2009, Pessac, France. pp.99-106. halshs-01864335

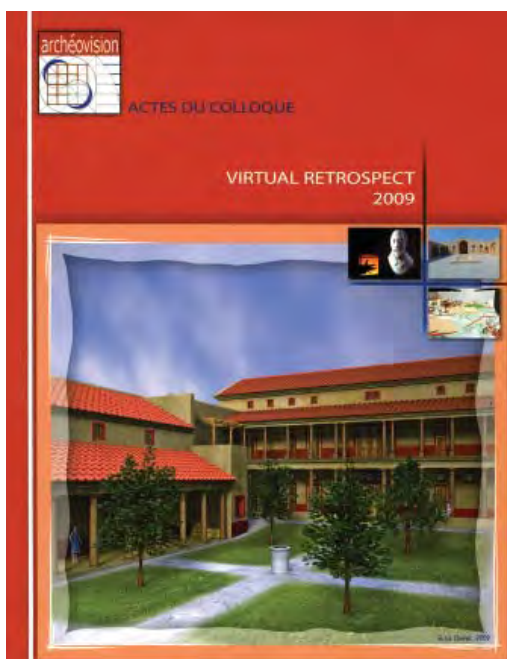
HAL Id: halshs-01864335

<https://shs.hal.science/halshs-01864335>

Submitted on 31 Aug 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.



Vernieux 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



S. GHADERI, O. BOUET, F. CHOPIN, E. ANDAROODI, K. ONO
*Utilisation et adaptation de références architecturales en présence de
données incomplètes et hétérogènes. Modélisation d'un édifice en terre
partiellement effondré*

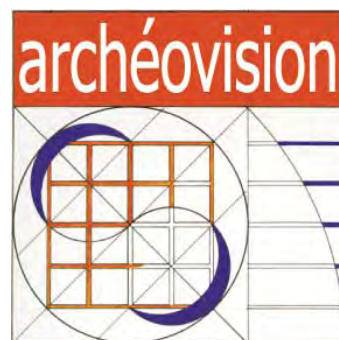


pp. 99-106

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





Virtual Retrospect 2009

Collection Archéovision
Volume 4

AUSONIUS ÉDITIONS

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



— Bordeaux 2010 —

Utilisation et adaptation de références architecturales en présence de données incomplètes et hétérogènes. Modélisation d'un édifice en terre partiellement effondré

Sahar Ghaderi*
sahar.ghaderi@evcau.archi.fr

Olivier Bouet*
olivier.bouet@evcau.archi.fr

Franck Chopin*
franck.chopin@evcau.archi.fr

* Laboratoire EVCAU - École d'Architecture de Paris Val de Seine
3 quai Panhard et Levassor - 75013 Paris

Elham Andaroodi, Kinjo Ono
elham_ono@nii.ac.jp
National Institut of Informatics
Hitotsubashi 2-1-2, Chiyodaku-Ku
Tokyo 101-8430, Japon

Résumé : La citadelle Bam faite d'adobe fut en grande partie détruite par le tremblement de terre du 26 décembre 2003. La reconstitution numérique des bâtiments les plus remarquables dont l'école Mirza Naïm fut décidé dès 2004. La communication développe la démarche et les méthodologies utilisées pour la reconstruction numérique de l'école, reconstitution faite à partir de documents hétérogènes et incomplets ainsi que d'époques diverses.

Mots-clés : architecture de terre, données hétérogènes, modélisation

Abstract : The city of Bam, one of the greatest mud brick architecture, was vastly damaged during the earthquake of 2003. Until 2004, a virtual 3D reconstruction is started for its most remarkable buildings as the school Mirza Naïm. The modelling process of the school is presented here, the 3-D reconstruction using documents from a variety of sources with different chronologies.

Keywords : mud brick architecture, heterogeneous data, 3D reconstruction

HISTORIQUE ET PROJET DE RECONSTRUCTION VIRTUELLE

La citadelle de Bam, à 1200 km au sud-est de Téhéran (Iran), était située au carrefour d'importantes voies marchandes le long des routes de la Soie¹. Oasis en plein désert du Dasht-e Kavir la vie reposait sur les canaux d'irrigation souterrains, les qanāts, dont Bam a préservé quelques-uns des plus anciens en Iran². Bam est aussi l'un des exemples les plus représentatifs d'une ville fortifiée faite d'adobe. D'une superficie d'environ

200 000m², la cité est entourée d'un mur d'environ 1500m de long protégé par des douves et 38 tours. Selon différentes hypothèses l'origine de la citadelle remonte aux périodes Achéménides et Parthes³ (550 a.C. ; 226 p.C.). On trouve des traces de cette période au sommet de la colline sous forme de restes d'arches et de murs. La plupart des bâtiments existants ont été édifiés entre les règnes des Timourides et des Kadjars (1381 p.C. ; 1921 p.C.).

Le site abandonné au milieu du XIX^e siècle laisse place à une ville "moderne" située dans la palmeraie environnante. La citadelle de Bam fit l'objet de fouilles et restaurations partielles de 1971 à 1993 puis de restaurations beaucoup plus importantes de 1993 (fig. 1 A) jusqu'en 2003. Le tremblement de terre du 26 décembre 2003 causa d'énormes destructions tant dans la citadelle (fig. 1 B) que dans la ville moderne. Bam et son paysage culturel sont depuis 2004 inscrits sur la liste du Patrimoine mondial en péril⁴ de l'Unesco.

Parallèlement au déblaiement des gravats et à la nouvelle restauration étudiée des monuments les plus remarquables de la citadelle qui demande des moyens humains, techniques et financiers considérables, la reconstitution virtuelle d'une partie de ces monuments est menée sous l'égide du laboratoire DSR⁵ (Digital Silk Roads ou "Route de la Soie Numérique")

1. Karimi 2001.
2. Adle 2009.

3. Mehriar 2004.
4. <http://whc.unesco.org/fr/peril/> 2009.
5. Ono 2005, 94.



Fig. 1. Vue du bazar vers la partie haute de la citadelle et la tour de guet avant et après le tremblement de terre.
© E. Andaroodi - <http://dsr.nii.ac.jp/bam/index.html> en © K. Ono <http://dsr.nii.ac.jp/Bam3DCG/>

du NII (National Institute of Informatics, Tokyo, Japon) en collaboration avec l'ICHHTO (Iranian Cultural Heritage Handicrafts and Tourism Organisation, Téhéran, Iran). Ce travail de reconstructions 3D est mené sur une quinzaine de bâtiments remarquables. La responsabilité, la coordination du projet ainsi que la vérification des modèles numériques⁶ est assurée par l'équipe du Pr. Ono (responsable du projet) au NII en collaboration avec des équipes (archéologues, historiens, ...) de l'ICHHTO. La première reconstitution en 3D de l'entrée principale de la citadelle et du bazar a été commencée en octobre 2004 par l'équipe de l'Université de Waseda de Tokyo. L'Université des Beaux Arts de Téhéran a intégré le projet en septembre 2005. Le laboratoire EVCAU, Espace Virtuel de Conception en Architecture et Urbanisme a rejoint le projet en octobre 2006 pour la reconstitution du petit caravansérail⁷ et de l'école "Mirza Naïm".

L'ÉCOLE MIRZA NAÏM

Au sud-est de la citadelle (fig. 2 A) l'école Mirza Naïm est un bâtiment d'un étage de 34 m x 37 m formé d'une trentaine de pièces réparties sur 4 ailes, autour d'une cour rectangulaire de 18 m x 23 m avec en son centre un bassin. L'aile sud comporte un iwan, vaste porche voûté ouvert sur la cour. Comme pour l'aile nord on y trouve un badgir ou "tour du vent" élément traditionnel d'architecture persane utilisé pour créer une ventilation naturelle de l'édifice. Afin de mener une reconstruction numérique la plus efficace un travail en amont a été conduit par les équipes du NII et de l'ICHHTO pour un recueil de données aussi exhaustif que possible avant le tremblement de terre et par l'EVCAU après le tremblement de terre (fig. 2 B et C). Ces documents marquent

les étapes temporelles variées de l'école : restaurations partielles des années 1971 à 1993, après les restaurations des années 1993 à 2003, état après le tremblement de terre. Ces données restent cependant hétérogènes et lacunaires. Les données d'avant le tremblement de terre sont peu nombreuses, partielles ou imprécises, celles d'après sont incomplètes du fait de destructions partielles ou totales. Dans certaines parties, correspondant à des zones totalement détruites par le séisme, nous ne disposons d'aucune (fig. 3 A et B) ou de très peu de données. Pour ces parties détruites comme pour d'autres parties de l'école, des hypothèses ont été élaborées (fig. 3 C et D), en particulier concernant les structures, les typologies de voûtes, les mesures et détails.

LA DÉMARCHE DE RECONSTITUTION

La référence pour la reconstitution numérique de l'école est celle de son état après restauration et avant le tremblement de terre (fig. 2 B). La démarche de reconstitution peut s'apparenter à une démarche de rétro-conception, elle a été menée en 4 étapes :

- L'assemblage des données ;
- L'analyse des données ;
- L'élaboration d'une simulation tridimensionnelle en utilisant l'analyse des données ;
- L'enrichissement de la maquette numérique par l'ajout d'informations complémentaires (lumière, matériau, interactivité, etc.).

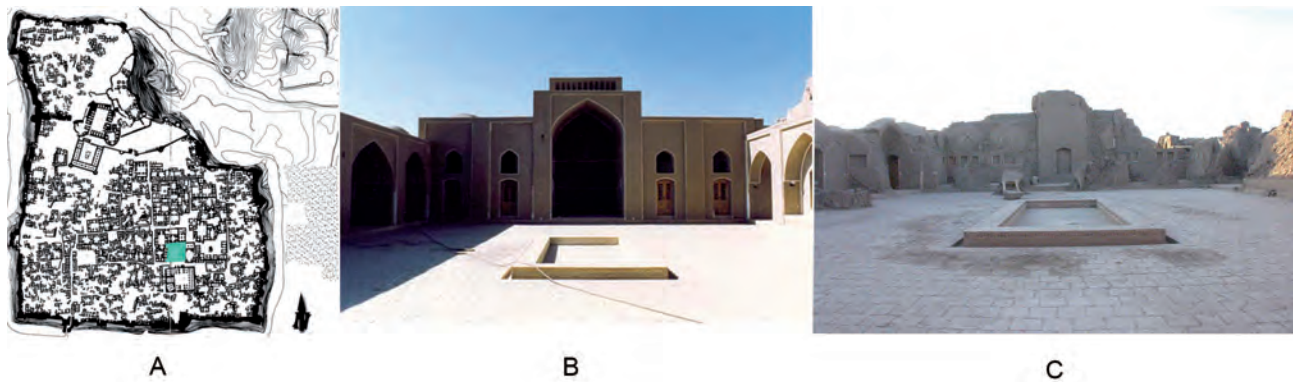
L'assemblage des données

Pour l'école, les données initiales comprenaient :

- Un plan et trois sections dessinés (relevés faits en 1999) ;
- Une dizaine de photographies aériennes avant et après restauration, photographies souvent difficilement exploitables puisqu'au 1 : 2000 pour la plupart d'entre elles ;

6. Ono 2008, 104.

7. Chopin 2007, 127.



A : Plan de Bam et situation de l'école.

B : Vue de la façade intérieure sud avant 2003 © ICHHTO.

C : Vue de la façade intérieure sud en janvier 2007.

Fig. 2. L'école Mirza Naïm.

- Une vingtaine de photos extraites d'un film amateur des façades intérieures après restauration ;
- Une photogrammétrie filaire 3D au format dwg, à partir de photographies aériennes prises en 1994 avant la restauration de l'école (Projet IFCA Irano French Cartographic Agreement – CNRS /NCC Iranian National Cartography Center - Docteur Adle). Elle permet de connaître les coordonnées UTM (Universal Transverse Mercator) avec une précision de ± 5 cm en X et ± 10 cm en Y et Z ;
- Les références et les savoirs faire des experts.

Ces documents initiaux ne pouvaient seuls suffire à la bonne compréhension de la nature des espaces à représenter. Une maquette 3D ne peut être validée ou conçue qu'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.

Les documents initiaux furent complétés par deux campagnes de relevés, courtes, mais fructueuses :

- L'une en janvier 2007, avec le relevé systématique de chacune des pièces et la constitution d'une base de données photographique ;
- L'autre en mars 2008, afin de compléter certaines des données manquantes de la première campagne et de photographier une partie de la toiture.

Ces séjours sur place ont aussi permis d'obtenir explications, dessins et croquis des experts qui ont travaillé sur le site avant le tremblement de terre.

L'analyse des données

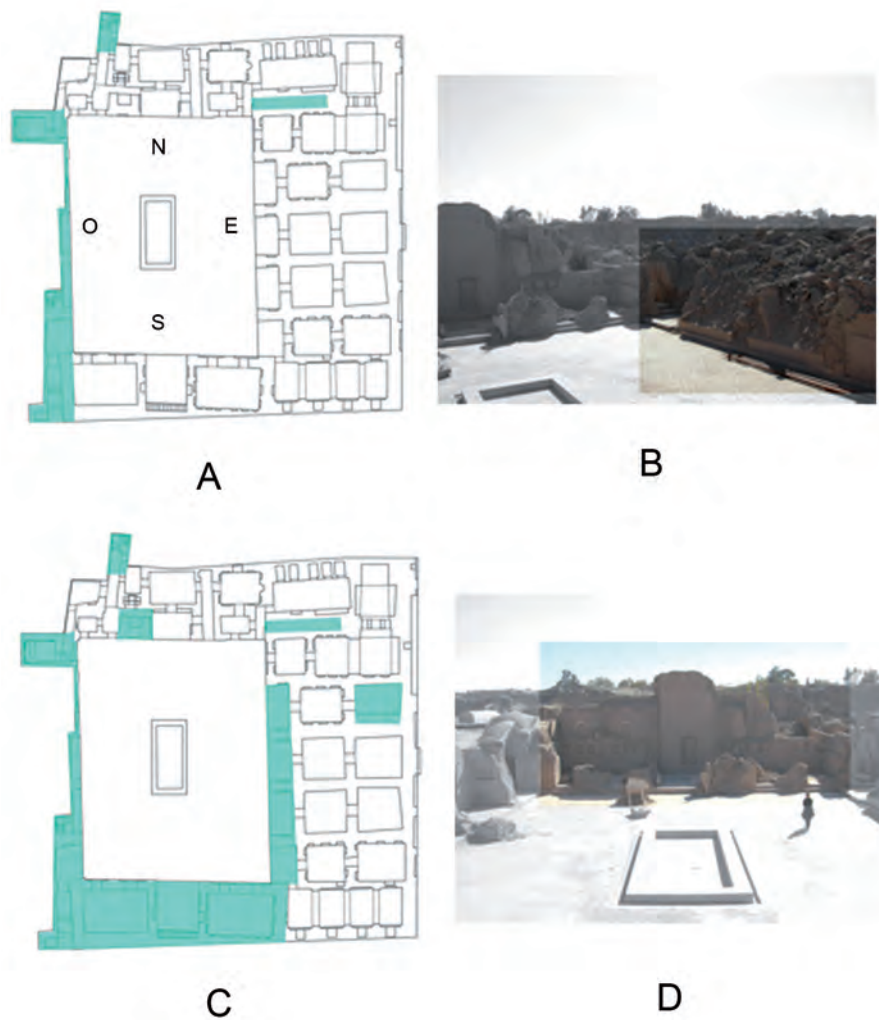
L'ensemble de ces données hétérogènes alimente une base de données. Chaque pièce, chaque façade intérieure ou extérieure est référencée avec les photographies, les croquis, les plans et développés des élévations intérieures pièce par pièce mis au format dwg. Les types de voûtes par leur système constructif, les types de niches sont elles aussi classifiées. Les

documents initiaux telle la photogrammétrie filaire 3D sont annexés à la base.

Le plan et les coupes faits en 1999 et les relevés que nous avons effectués en 2007 et 2008 présentent de nombreuses différences. Dans ce travail de reconstruction numérique le plan de 1999 a été utile pour donner une vision globale du bâtiment. Ce plan imprécis (fig. 4) et avec de nombreux oublis (niches, escalier) a été corrigé, modifié et complété par les relevés récents, plus exacts et vérifiés en partie par les experts. Les coupes ont été peu utilisées car présentant de nombreuses erreurs.

Les photographies disponibles sont en deux groupes ; le premier constitué de celles prises avant le tremblement de terre (extrait d'un film), les photos aériennes avant le tremblement de terre qui sont en noir et blanc, le second regroupant les photos prises au moment des relevés après le tremblement de terre.

Les photographies d'une part permettent de confronter et d'ajuster le modèle 3D par l'utilisation de l'outil logiciel "caméra match". À l'aide de 5 points désignés sur la photographie et des 5 points similaires sur le modèle 3D l'outil permet de vérifier ou non la justesse du modèle. D'autre part elles permettent, par un travail de comparaison, de retrouver des mesures d'éléments existants avant le séisme du 26 décembre 2003 et ayant disparus après le séisme. Ainsi pour la figure 5 la hauteur de la façade nord est déduite de la hauteur de la façade est. Pour la façade ouest totalement détruite lors du séisme, une partie des mesures est faite grâce à une photographie aérienne prise en 1995. Les photographies avant tremblement de terre sont utiles à la définition géométrique des voûtes et arches extérieures et après tremblement de terre à la définition géométrique des voûtes et arches aussi bien pour l'extérieur mais essentiellement pour les pièces intérieures.



A : Parties non documentées avant le tremblement de terre et totalement détruites © ICHHTO.
 B : Photo d'une partie non documentée avant le tremblement de terre et totalement détruite.
 C : Parties sur lesquelles des hypothèses ont été faites © ICHHTO.
 D : Photo d'une partie (façade intérieure sud) sur laquelle des hypothèses ont été faites.
 Fig. 3.

La restitution photogrammétrique filaire est le document le plus précis pour définir l'enveloppe extérieure d'une grande partie de l'école. Cette reconstitution utilise des photographies aériennes faites au moment de la restauration. Elle ne permet pas de préciser les parties non reconstruites alors. Les angles de vue ignorent certaines façades. Elle sert de référence pour vérifier et corriger les plans de l'école. Elle a permis de connaître la position et les dimensions des tours à vent. Les tracés de la photogrammétrie ont servi de gabarits à la modélisation du toit (fig. 6).

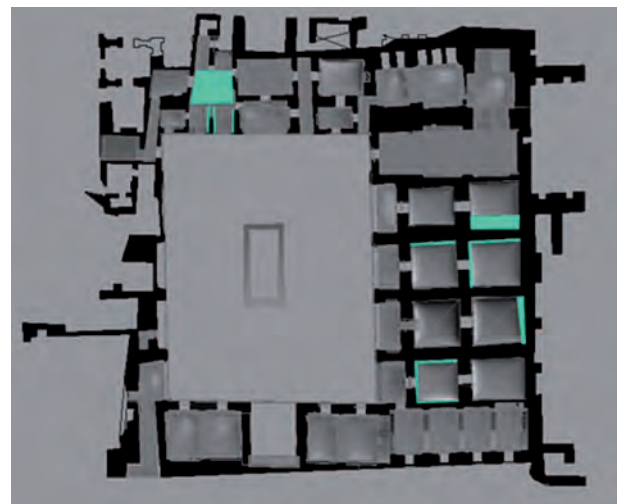


Fig. 4. Écart constatés entre le plan fourni et les relevés supérieurs à 15 cm. Les écarts inférieurs à 15 cm ne sont pas ici indiqués.



Fig. 5. Parties est et nord après restaurations et avant tremblement de terre.
Comparaison des hauteurs ©ICHHTO.

La connaissance des méthodes constructives⁸, ainsi que la classification des éléments d'architecture persane⁹ permettent de proposer ou de valider certaines hypothèses notamment pour la façade intérieure ouest. La comparaison entre les photographies et la typologie constituée (fig. 7) a permis de préciser pour chaque pièce le ou les types d'arches et voûtes utilisés.

Nous n'avons aucun document utilisable pour certaines parties de l'école telles l'entrée et quelques pièces. Dans ces cas nous avons utilisé les savoirs des experts ayant travaillé sur le site lors ou après sa restauration. Ainsi de l'entrée nord de l'école presque totalement détruite lors du séisme dont ni la photogrammétrie filaire, ni les coupes dessinées, ni les photographies ne permettaient d'en préciser la morphologie (fig. 8 A et B). La comparaison des différents avis donnés, des dessins faits (fig. 8 C), la comparaison des typologies de voûtes utilisées dans l'école ont permis de caractériser parmi les possibles le type de la voûte (voûte en berceau) et les types d'arches utilisés (panj o noh) pour cette entrée.

L'élaboration d'une simulation tridimensionnelle en utilisant l'analyse des données

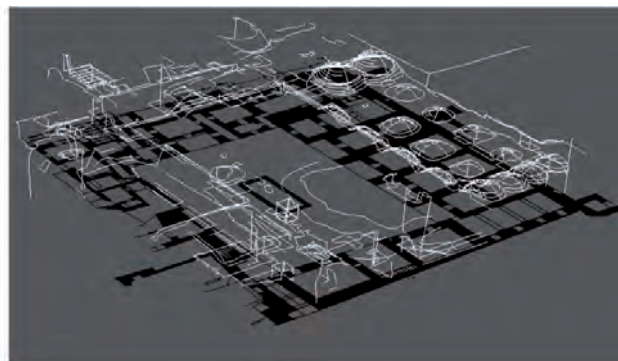
L'expérience de la modélisation du petit caravansérail de Bam et d'autres projets nous a conforté, pour la modélisation de l'école, dans le choix de l'utilisation d'un seul logiciel ici le logiciel Autodesk®3Dmax®.

Cette modélisation s'est faite en plusieurs étapes successives :

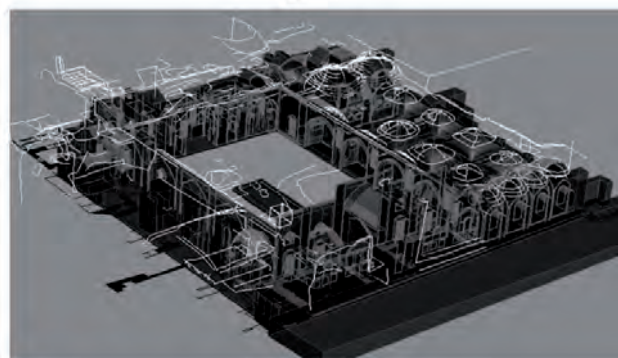
- Séparation, identification, modélisation des différents niveaux de sol ;
- Identification et modélisation des murs ;
- Définition des arches concernées pour chaque pièce afin de trouver la structure de la voûte de la pièce ;

8. Pirnia & Bozorgmehri 2006, 11-18 ; Pournaderi 2000, 22-67.

9. Pirnia 2003, 130-349.



A



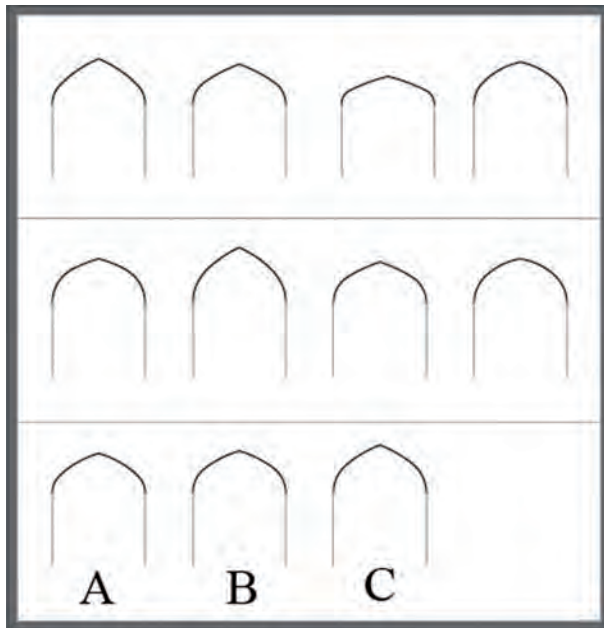
B

A : Avec le plan de l'école.

B : Avec le modèle 3D.

Fig. 6. Photogrammétrie aérienne de l'école
©Pr. Adle – CNRS/NCC.

- Création des couvertures intérieures ;
- Modélisation de la toiture ;
- Reconstitution des détails pour chacune des pièces (niches, cheminée, éléments structuraux des tours à vent, moucharabiehs pour la pièce donnant sur la rue, ...) ;
- Création des détails de moins de 4 centimètres tels les entourages de plâtre.



Les 3 types d'arches de la dernière ligne sont les plus fréquents dans l'école.

A : 4 ghesmat - B : 6 ghesmat - C : Panj o noh ghesmat.

Fig. 7. Types d'arches de l'architecture traditionnelle iranienne
© DSR Bam Vr project - NII.

L'enrichissement de la maquette numérique

Il s'est agi d'une simulation d'ambiance (fig. 9) mettant en œuvre les matériaux utilisés. C'est aussi la possibilité de préciser pour chaque pièce la typologie des éléments structuraux constitutifs (type d'arches, de voûte). Une découverte interactive est prévue par l'utilisation du logiciel Virtools™.

DEUX EXEMPLES DE PIÈCES RECONSTITUÉES

La façade ouest

Le seul document existant pour la reconstitution de la façade est une photo aérienne en noir et blanc (fig. 10 A), celle-ci ayant été totalement détruite par le tremblement de terre. Les mesures en ont été faites à partir des hauteurs des façades attenantes. Cette même photographie, traitée à l'aide du logiciel Adobe Photoshop®, a permis de préciser le nombre, la situation, la composition des ouvertures. Les références d'architecture persane et la typologie des autres parties du bâtiment ont permis d'élaborer des hypothèses sur les typologies utilisées pour cette façade, hypothèses soumises et validées par les experts (fig. 10 B).

La grande pièce du sud-est

Cette pièce d'environ 33 m², la plus ouvragée de l'école, possède une grande variété d'arches, d'ouvertures et de niches. Sa partie est a été détruite par le séisme. Trois ouvertures donnent à son extrémité nord sur une pièce attenante. Pièce de réception et de réunion, d'une surface

triple de celle de la plupart des autres pièces, d'une hauteur de 5.40 mètres, elle peut être considérée comme consacrée aux activités les plus importantes de l'école (fig. 11 A et B).

Pour sa reconstruction en 3 dimensions (fig. 11 C), après la création des murs, les arches ont été choisies par superposition des tracés géométriques possibles, parmi la base de données des arches persane, à partir des photos et relevés faits après le tremblement de terre.

CONCLUSION

La maquette numérique de l'école a demandé plusieurs centaines d'heures de travail entre les relevés, la constitution de la base des données utilisées, l'analyse de l'espace bâti, l'analyse du tracé des arcs et voûtes, la compréhension des modes constructifs, les méthodes à mettre en œuvre dans l'ensemble des possibles du logiciel de modélisation utilisé. La modélisation en est ainsi dans sa phase finale, elle doit cependant être validée dans certains de ses détails par le NII.

Plusieurs enjeux prévalent à la réalisation de cette reconstitution :

- Servir de référence à une nouvelle reconstruction physique ;
- Faire partie d'une base de données pérenne rassemblant la maquette, les plans, les photographies et images de synthèse ;
- Servir de base muséographique et fournir un matériau pédagogique ;
- Faire connaître la cité avant et après le séisme de 2003.

Il n'est pas certain que tous ces enjeux soient compatibles ou que la maquette réalisée représente pour chacun d'eux l'instrument parfait, mais nous avons la conviction d'avoir contribué à leurs réalisations et cette maquette est à ce jour l'unique témoin "tridimensionnel" de l'ensemble que constituait l'école Mirza Naim presque entièrement rénovée à la date du séisme.

Bibliographie

- Adle, C. (2009) : *Du néolithique au début de la période islamique à Bam (Iran). Formation des sites, changements écologiques et mouvements de population*, Conférence Actualité de la recherche archéologique, Louvre, Paris.
- Chopin F., O. Bouet, V. Gholipour, E. Andaroodi, K. Ono et E. Mokthari (2007) : "Modélisation par objets réutilisables : fragmentation en éléments d'une architecture de terre. Application au petit caravansérail de la citadelle de Bam (Iran)", in : *Virtual Retrospect 2007*, 127-133 .
- 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).

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., T. Yamamoto, T. Kamiuchi, A. Kitamoto, F. Andres, S. Sato et E. Andaroodi (2005) : "Progress in the Digital Silk Roads project", in : *Journal of Progress in Informatics*, N° 1, 93-141.

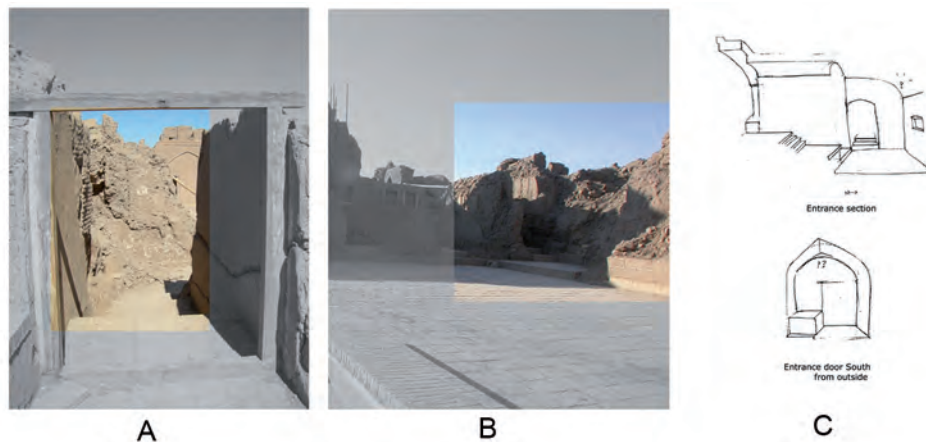
Ono K., E. Andaroodi, A. Einifar, N. Abe, M.R. Matini, O. Bouet, F. Chopin, T. Kawai, A. Kitamoto, A. Ito, E. Mokhtari, S. Einifar,

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 in Informatics*, N° 5, 99-136.

Pirnia M., Z. Bozorgmehri (2006) : *Géométrie en Architecture*, Téhéran (in Persian).

Pirnia M. (2003) : *Connaissance des styles architecturaux persans*, Téhéran (in Persian).

Pournaderi, H. (2000) : *Sherbaf et ses oeuvres*, Téhéran (in Persian).

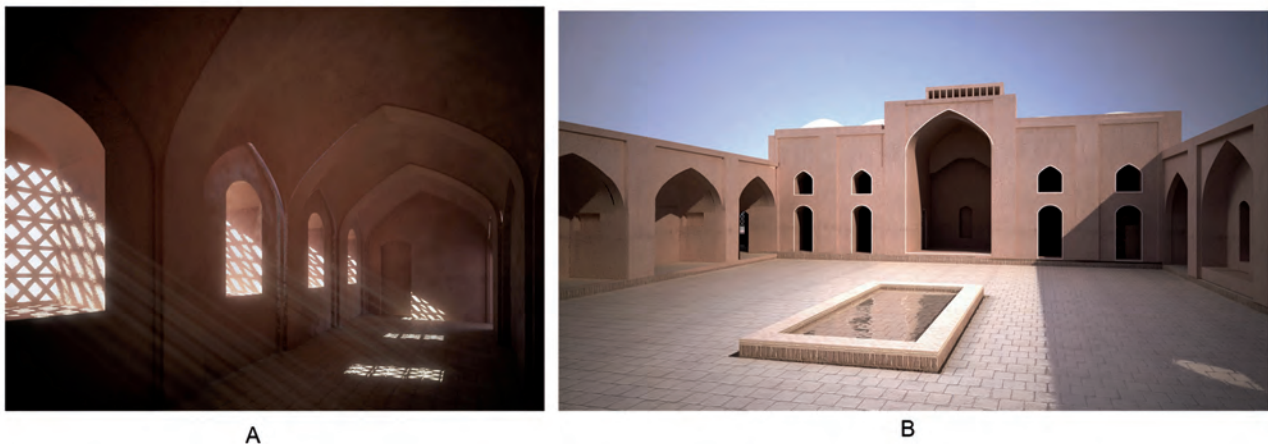


A : Sur rue, état après le séisme.

B : Sur cour, état après le séisme.

C : Dessin d'expert, Mme Djafari © ICHHTO – NII.

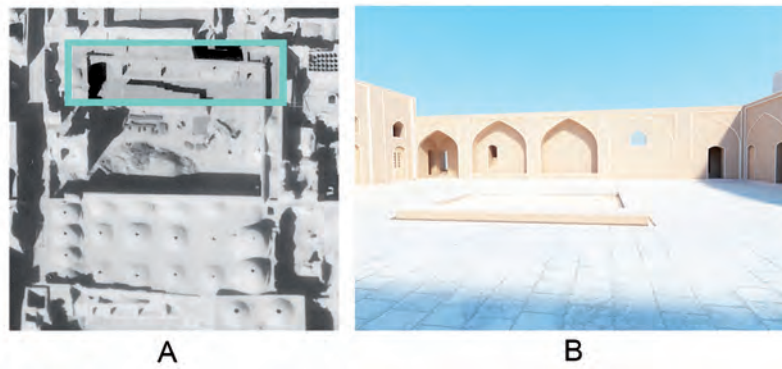
Fig. 8. Entrée principale de l'école.



A : Vue intérieure de la pièce sur rue.

B : Vue de la façade sud avec l'iwan et la tour à vent.

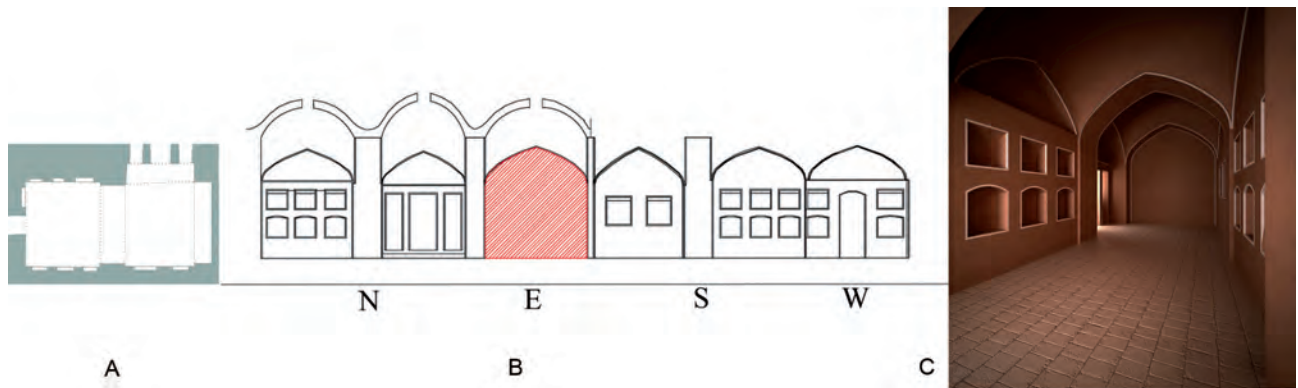
Fig. 9. Simulations.



A : Photo aérienne prise en 1994.

B : Restitution de la façade ouest.

Fig. 10. La façade ouest.



A : Plan.

B : Développé intérieur de la pièce.

C : Vue intérieure sur la maquette numérique.

Fig. 11. La grande pièce du sud-est.