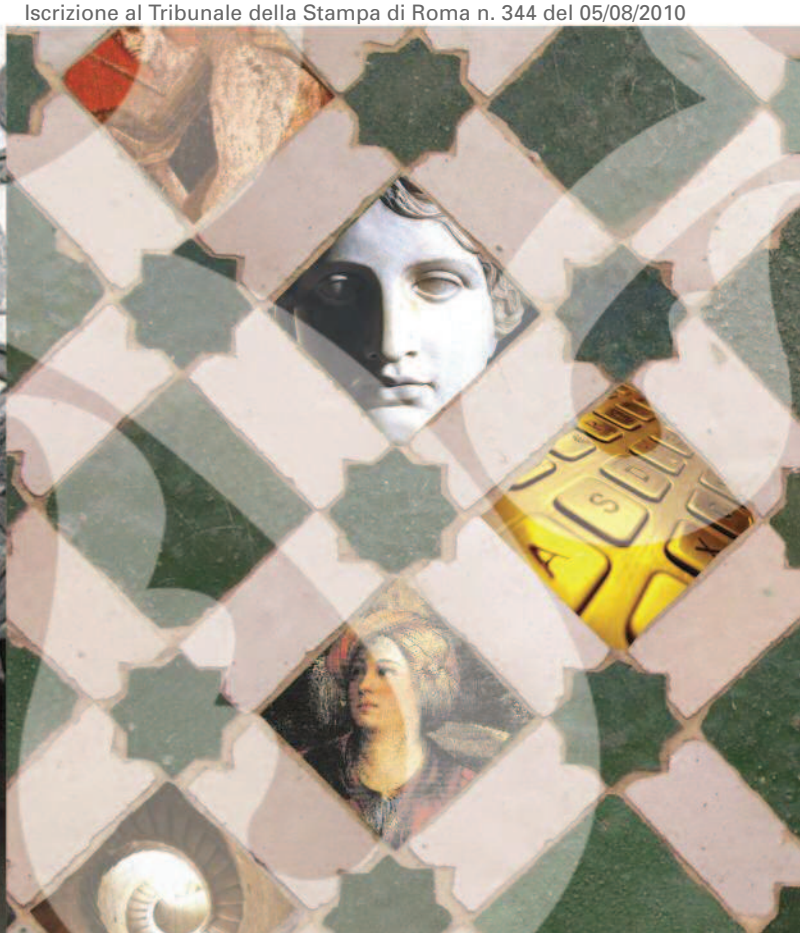
Centro Universitario Europeo per i Beni Culturali

Ravello

Territori della Cultura

Rivista on line Numero 17 Anno 2014

Iscrizione al Tribunale della Stampa di Roma n. 344 del 05/08/2010



Sommario

Centro Universitario Europeo per i Beni Culturali
Ravello

Comitato di redazione 5

Forum Universale delle Culture: tappa a Ravello
Una rete dei siti UNESCO del Mediterraneo
Alfonso Andria 8

Quale politica per i beni culturali in Europa
Pietro Graziani 12

Conoscenza del patrimonio culturale

Max Schvoerer Résilience vis-à-vis de risques naturels majeurs du Minaret de Jâm (XIIe s., Afghanistan): Heureux hasard ou constructeur de génie? 16

Cultura come fattore di sviluppo

Francesco La Regina Roberto Di Stefano, l'evoluzione del concetto di restauro a scala architettonica e urbanistica 38

Fabio Pollice Patrimonio archeologico e sviluppo territoriale 46

Bruno Zanardi Ma non è l'inquinamento a danneggiare la Colonna Traiana 54

Bruno Zanardi Rammendare le periferie, ma non solo 58

Metodi e strumenti del patrimonio culturale

Salvatore C. La Rocca Quale cultura, quale politica. Il patrimonio culturale primo motore dello sviluppo di Roma: introduzione al tema 64

Alfonso Andria Un'agenda urbana per lo sviluppo delle città 78

Salvatore C. La Rocca Tra sentimento e nuove emozioni 82

Copyright 2010 © Centro Universitario Europeo per i Beni Culturali

Territori della Cultura è una testata iscritta al Tribunale della Stampa di Roma.
Registrazione n. 344 del 05/08/2010

Comitato di Redazione

Centro Universitario Europeo per i Beni Culturali
Ravello

Presidente: Alfonso Andria — comunicazione@alfonsoandria.org

Direttore responsabile: Pietro Graziani — pietro.graziani@hotmail.it

Direttore editoriale: Roberto Vicerè — rvicere@mpmirabilia.it

Responsabile delle relazioni esterne: Salvatore Claudio La Rocca — sclarocca@alice.it

Comitato di redazione

Jean-Paul Morel Responsabile settore "Conoscenza del patrimonio culturale" — jean-paul.morel3@libertysurf.fr; morel@mmsh.univ-aix.fr
Claude Albore Livadie Archeologia, storia, cultura — alborelivadie@libero.it
Max Schvoerer Scienze e materiali del patrimonio culturale — schvoerer@orange.fr
Maria Cristina Misiti Beni librari, documentali, audiovisivi — mariacristina.misiti@beniculturali.it

Francesco Caruso Responsabile settore "Cultura come fattore di sviluppo" — francescocaruso@hotmail.it
Piero Pierotti Territorio storico, ambiente, paesaggio — pierotti@arte.unipi.it
Ferruccio Ferrigni Rischi e patrimonio culturale — ferrigni@unina.it

Dieter Richter Responsabile settore "Metodi e strumenti del patrimonio culturale" Informatica e beni culturali — dieterrichter@uni-bremen.de
Matilde Romito Studio, tutela e fruizione del patrimonio culturale — matilde.romito@gmail.com
Adalgiso Amendola Osservatorio europeo sul turismo culturale — adamendola@unisa.it

Segreteria di redazione

Eugenia Apicella Segretario Generale — apicella@univeur.org
Monica Valiante
Velia Di Riso
Rosa Malangone

Progetto grafico e impaginazione

Mp Mirabilia - www.mpmirabilia.it

Info

Centro Universitario Europeo per i Beni Culturali
Villa Rufolo - 84010 Ravello (SA)
Tel. +39 089 857669 - 089 2148433 - Fax +39 089 857711
univeur@univeur.org - www.univeur.org

Per consultare i numeri precedenti e i titoli delle pubblicazioni del CUEBC: www.univeur.org - sezione pubblicazioni

Per commentare gli articoli: univeur@univeur.org

Main Sponsors:

ISSN 2280-9376

Max Schvoerer *et al.*

Résilience vis-à-vis de risques naturels majeurs du Minaret de Jâm (XIIe s., Afghanistan): Heureux hasard ou constructeur de génie?

Max Schvoerer, Académie Européenne des Sciences et des Arts (Salzburg, Austria); Professeur émérite de Physique, Université Bordeaux Montaigne (France); membre du Comité Scientifique du CUEBC

Céline Ollagnier, Université Bordeaux Montaigne en Sciences archéologiques

Alain Billard, Dr., Architecte

Pierre Bergoin, Ingénieur

Sophie Desgouilles, Etudiante

Jean-Pierre Massué, Dr., Physicien, Membre du Sénat de l'Académie Européenne des Sciences et des Arts

À la mémoire de Jean Marcadé et de Loïc Leferme [1]

Résumé

Le minaret de Jâm (Afghanistan) fut bâti au XIIe s. par "*Ali ibn Ibrahim al-Nisaburi, l'architecte venu du khorassan*". Il est inscrit depuis 2002 sur la Liste Unesco du patrimoine de l'humanité, en danger. C'est un édifice en briques de terre cuite, très haut, élégant et magnifiquement décoré. Mais sa sauvegarde et sa conservation posent problème, en raison de son ancienneté et de son imprudente implantation, en altitude et au croisement de failles tectoniques actives qui servent de lit à des torrents de montagne parfois impétueux... Pour le transmettre aux générations futures, il importe de renforcer sa résilience. Et pour commencer, par rechercher le secret de l'architecte qui a su lui conférer la remarquable résilience "d'origine"grâce à laquelle il a traversé le temps (celui qui passe et celui qu'il fait) depuis plus de huit siècles, en résistant à l'effet parfois cumulé de risques naturels majeurs: vieillissement des matériaux, inondation, sismicité, changement climatique. Tel fut le sens de notre démarche. L'expertise préliminaire réalisée montre que cette résilience est liée à deux idées géniales: l'usage d'un mortier spécial et l'invention d'une structure architecturale d'une originalité déroutante.

Préambule

Entre le 12 août et le 19 septembre 2003, le réseau "Sciences et patrimoine (PACT)" (association de type 1901) s'est joint à une mission humanitaire, culturelle et scientifique, intitulée "Paris-Kaboul" (collectif, 2004 a; Schvoerer*et al.*, 2004). Neuf voitures, une ambulance, deux motos et une trentaine de personnes ont formé un convoi qui a atteint son but sans incident notable. Après un bref séjour à Herât qui fut capitale de l'empire timouride en alternance avec Samarcande, Jâm fut l'une des étapes les plus intéressantes. C'est à M. Mazar Wahidi, responsable du patrimoine culturel de Herât et de sa province, que furent remises à Kaboul, après une soirée à l'ambassade de France, les clefs du véhicule 4x4 Nissan Patrol de l'association PACT.

[1] Jean Marcadé (1920-2012), Membre de l'Institut de France, historien de l'art et archéologue, spécialiste de sculpture grecque.Il vouait un vif intérêt à l'Afghanistan, terre de rencontre culturelle - depuis Alexandre Le Grand -, de l'Occident et de l'Orient. Affecté par le "crime contre la culture" de Bamiyan en mars 2001, il suivait les efforts de la communauté internationale (l'Unesco) pour sauvegarder le patrimoine afghan et en particulier le minaret de Jâm.
Loïc Leferme (1970-2007) vivait pour et par sa recherche sportive: l'adaptation de l'organisme humain à la plongée profonde en apnée. Il était de la Mission Paris – Kaboul de 2003 avec le projet de procéder avec son partenaire apnéiste Guillaume Néri, à la première exploration du fond jusque là inconnu des magnifiques lacs de Band-e-Amir, célébrés notamment par Joseph Kessel dans "Les cavaliers". Avec l'un d'entre nous (M.S.), il plongea dans le Hari – Rud, à proximité de la base du minaret, à la recherche de vestiges d'un éventuel édifice disparu. Recordman du monde de "plongée en profondeur absolue" en 2004, il perdit la vie lors d'un entraînement, en avril 2007.

1. Problématique et stratégie de recherche

1. 1 Problématique

Dans la mesure où le minaret de Jâm (Fig. 1a, b) a résisté à des risques naturels majeurs (hydriques, sismiques et récemment climatiques), il est fondamental de déterminer l'origine de sa résilience afin de l'entretenir et concevoir une stratégie de renforcement, notamment dans la perspective du changement climatique. Deux énigmes sous-tendent cette expertise.

Le choix du lieu d'implantation du minaret

Il y a énigme en raison de la localisation géographique (Fig. 2) et géologique (Boulin et Bouyx, 1977; Lapparent et Lavigne Sainte Suzanne, 1964). En effet, en plus du risque de conflit armé, si constant et si préjudiciable au patrimoine culturel de ce pays (Schvoerer *et al.*, 2004; Dupaigne 2007) le choix fait au XII[e] s. défie toute logique sécuritaire, en raison de la menace de risques bien réels qui peuvent de surcroît, avoir des effets cumulés.

Afin de trouver du sens à cette implantation, plusieurs hypothèses furent avancées (Maricq et Wiet, 1959; Sourdel-Thomine, 2004; Kervran, 2004) mais manifestement, le manque de repères historiques ou archéologiques significatifs n'a pas permis de conclure de manière définitive.

Fig. 2 Afghanistan, Localisation de Jâm.

Fig. 1a Le minaret ghoride de Jâm, Afghanistan (1174 – 1175 ap. J.C.; h.: environ 64,60 m.; altitude: 1820 m.), tel qu'il apparaît dans la douce lumière de septembre, en venant du Sud par la piste qui emprunte le lit du Jâm Rud, 2,5 km en aval du village de Jâm (ph. Max Schvoerer, 02/09/2003).

Fig. 1b Le minaret de Jâm vue depuis le Sud (ph. Max Schvoerer, 03/09/2003).

Fig. 3 Jâm, Afghanistan. Depuis plus de huit siècles, chaque été, cette même scène de la vie rurale se déroule au pied du minaret. Le Hari Rud n'est franchissable à gué que lorsqu'il est à l'étiage. Vue prise en amont du minaret depuis la rive nord (ph. Max Schvoerer, 03/09/2003).

En tout cas, ceux qui prirent l'initiative de construire et financer cet édifice ne pouvaient ignorer les menaces que nous allons évoquer et ils n'étaient certainement pas inconscients. Alors, un problème est posé, que les historiens finiront bien par résoudre: quelle impérieuse raison les amena à braver des menaces qui ne sont pas négligeables?

La longévité du minaret

On peut s'étonner à juste titre de la longévité de l'édifice, d'autant que deux risques "immédiats" sautent aux yeux. Depuis l'origine l'extrême proximité du minaret et des lits actuels du Hari Rud et du Jâm Rud, quelques mètres à peine (Fig. 3 et 4) et depuis une date indéterminée, l'inclinaison du minaret vers le Nord (vers le Hari Rud), estimée, sous réserve de mesures précises, à environ 3° (Fig. 5). Manifestement, à chaque instant, un aléa prévisible ou non, peut le déstabiliser.et entraîner une catastrophe.

1.2 Stratégie de recherche

Écartant *a priori* toute tentative d'explication ou de réponse irrationnelle, ésotérique ou religieuse, nous avons recherché, parmi les paramètres habituels qui déterminent la résilience d'un édifice, le rôle qu'ont pu jouer un matériau de construction et un parti-pris architectural.

Fig. 4 Jâm, Afghanistan. Quand le niveau du Hari Rud interdit la traversée à gué, un câble, de bons bras et du courage font l'affaire. Au premier plan, l'angle du quai de protection édifié par l'équipe Unesco d'Andrea Bruno à la confluence du JâmRud et du Hari Rud (ph. Robert Vergier, 03/09/2003).

2. Le minaret de Jâm et sa resilience vis-a-vis des risques naturels majeurs

2.1 Localisation

Le minaret de Jâm (N: 34° 23' 47,6'' et E: 64° 30' 57,8'') porte le nom du hameau situé 2,5 km plus au Sud et comme lui sur un cours d'eau, le Jâm Rud. On est au centre-Ouest de l'Afghanistan, province du Ghor, district de Shahrak, à quelque 200 km à l'Est de Herât (à vol d'oiseau) (Fig. 2). Au départ de Hérât par la "piste du centre", à vitesse prudente et avec un véhicule 4x4, il faut pratiquement une journée de route pour l'atteindre (environ 270 km au compteur) par Chest-e-Sharif, Darra-e-Takht et Shahrack.

Tout en briques de terre cuite, magnifiquement décoré extérieurement, haut de 64,60 m par rapport à sa base actuelle située à l'altitude de 1820 m. Il se dresse dans un creux de montagne (Fig. 1b), à quelques mètres seulement du confluent du Jâm Rud, qui vient du Sud et du Hari Rud – parfois véritable "fleuve" tumultueux – (Fig. 6), qui vient de l'Est et s'écoule vers l'Ouest, vers Hérât.

2.2 Forme et décor extérieur

Sa forme générale correspond au type mésopotamien "à fût long et mince en cheminée d'usine" de la typologie de Max Van Berchem (Berchem, 1911). La section de sa base est octogonale et ne devient circulaire qu'en s'élevant. Son décor est somptueux et on l'entrevoit sur les illustrations proposées. Pour sa description et son interprétation, nous suggérons la lecture d'une analyse très complète (Sourdel-Thomine, 2004). Il comporte des médaillons en relief, des textes en écriture coufique ghouride, des stylisations florales, des entrelacs géométriques, un galon épigraphique qui développe sur toute la surface du minaret, l'intégralité des versets de la sourate XIX dite sourate Maryam/Marie et des inscriptions indiquant,

- la chronologie de la construction: "570^{e} année de l'Hégire" soit entre le **2 août 1174 et le 21 juillet 1175 ap. J.C.;**
- le nom de l'architecte ***"Oeuvre de 'Ali ibn Ibrahim al – Nisaburi", l'architecte venu du Khorassan;***
- le nom du sultan qui ordonna la réalisation, **Ghiyàth al-din** (ou **Ghiyàth al-dunya wal-din**).

Parce qu'il s'agit d'un autre sujet en cours d'étude à Bordeaux, nous montrons une partie du célèbre bandeau (Fig. 7) formé de

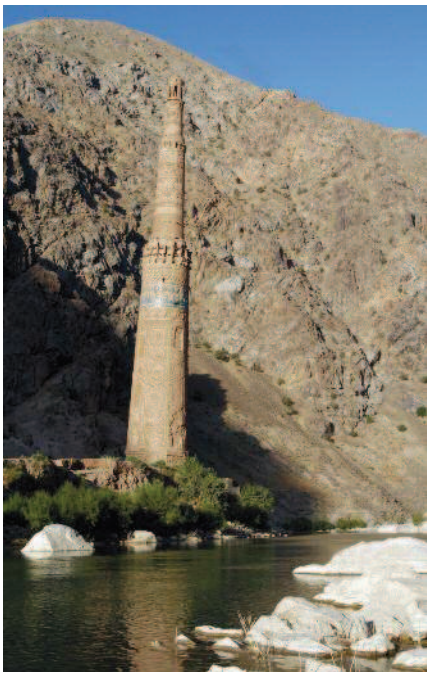


Fig. 5 Jâm, Afghanistan. Depuis la rive nord du Hari Rud et en amont du minaret, cette vue montre nettement l'inclinaison (environ 3°) de l'édifice. C'est l'un des sujets d'inquiétude pour sa conservation (ph. Max Schvoerer, 03/09/2003).

Fig. 6 Une crue du Hari Rud à Jâm. À chaque printemps le risque hydrique se manifeste avec la fonte nivale. Vue prise en avril 2007 depuis un hélicoptère. Courtoisie de son auteur, Bruno Pagnanelli (www.brunopagnanelli.it).

Fig. 7 Jâm, Afghanistan. Élément du décor du minaret, entre 28 et 31 m., en caractères coufiques de 3 m. de hauteur, briques glaçurées de couleur bleu turquoise (bleu au cuivre Cu^{2+}): dédicace au sultan Ghiyàth al-din . Pour les temps modernes, c'est l'un des usages les plus anciens de céramique glaçurée en architecture (ph. Max Schvoerer, 03/09/2003).

lettres en briques en partie glaçurées de couleur bleu turquoise qui sont avec celles de la grande mosquée de Herât (Fig. 8) en utilisation architecturale, parmi les plus anciennes connues des temps modernes. Respectivement 1175 ap. J.C. à Jâm et 1200 à Herât.

2.3 Les risques naturels majeurs

Le risque hydrique

Il a pour "vecteurs" l'humidité et les inondations:

L'humidité. Elle est en relation ou pas avec des évènements météorologiques, des infiltrations ou des fluctuations de la nappe phréatique locale. Elle agit en général lentement mais continûment, part des fondations d'un édifice et remonte pour aboutir à un accident soudain.

Le risque dépend du pH et de la température du milieu et se manifeste par une attaque physico-chimique (hydrolyse, oxydo-réduction,…). D'abord de manière localisée et statique, en surface, dans les fissures, les piqûres ou les pores des matériaux. Puis de manière dynamique avec une circulation par capillarité, de l'eau à l'état liquide ou vapeur, grâce au réseau micro ou nano poreux des briques et du mortier. On constate alors des regroupements d'éléments (ségrégations) qui ont pour conséquence essentielle de modifier la texture des matériaux et notamment leurs propriétés mécaniques.

Il peut en résulter des "ruptures", toujours préjudiciables au patrimoine culturel. Par exemple, un parement de céramiques glaçurées qui se dégrade près de Samarcande (Ollagnier, 2010), un enduit peint qui se détache à Zeugma (Turquie), un mur qui s'effondre à Pompéi (Italie) ou le toit d'une mosquée qui tombe en faisant des victimes à Meknès (Maroc).

Les inondations (Fig. 6). L'eau agit en partie de la même manière que ci-dessus, en mouillant (hydratant) et souillant les édifices et les objets. Mais en plus, à ces effets, s'ajoute **l'impact mécanique** subit ou entretenu sur un obstacle matériel, dû au déplacement d'un flux. En Physique, on crée à ce propos une entité qui est le produit d'une masse (liquide ou solide) par sa vitesse (m.v) que l'on appelle "quantité de mouvement". Sans entrer dans le détail, rappelons que lorsque

Fig. 8 Herât, Afghanistan. Mosquée du Vendredi datée de 1200 ap. J.C. Élément de décor ghoride, formé de briques glaçurées de couleur bleu turquoise, comme à Jâm. (extérieur, mur est, à proximité de l'entrée du très ancien atelier de céramistes de la mosquée (ph. Max Schvoerer, 30/08/2003).

cette entité (m.v) frappe un obstacle matériel fixe, **elle génèreinstantanément sur la zone d'impact une force proportionnelle à sa masse et à la perte de vitesse due au choc** (c'est une expression du principe fondamental de la Dynamique). C'est ce qui détruit des maisons, affouille la base des ponts, de routes, quais ou barrages. C'est aussi l'effet d'une vague ou de la houle, responsables de l'érosion côtière de nos rivages.

Le risque sismique

C'est le plus imprévisible, ...mais le plus dévastateur. À Jâm, il est latent car le site se trouve sur la faille tectonique de Herât, qui traverse l'Afghanistan d'Est en Ouest sur environ 1100 km. Localement cette faille est empruntée par le Hari Rud dont la vallée est étroite et très profonde dans des schistes cristallins et des gneiss injectés de filonnets de granite" (Sourdel-Thomine, 2004, p. 28).

Toutefois les géophysiciens qui ont été sollicités lors de l'inscription du site sur la Liste du patrimoine mondial (Icomos, 2002; Unesco, 2002) ont établi que le risque sismique est statistiquement "modéré". Ils ont relevé néanmoins trois séismes dont les épicentres sont relativement proches de Jâm, d'un point de vue géologique (Macchi, 2008; Menon et Lai, 2004):

- en 814: magnitude 7,4, épicentre à 238 km,
- en 1428: magnitude 6,5; épicentre à 160 km,
- en 1956: magnitude 7,4; épicentre à 283 km.

Le risque climatique

Il se manifeste sous forme de phénomènes météorologiques inhabituels et intenses. Il aggrave évidemment les risques hydriques. Son effet sur le patrimoine culturel commence à se faire sentir en maintes régions de la planète. C'est le cas en Asie centrale, en particulier en Afghanistan et Ouzbékistan. Les experts de notre réseau l'étudient en Ouzbékistan depuis 2008, année d'un terrible hiver durant lequel dans les deux pays cités la température fut anormalement basse durant le mois de janvier, après un automne normalement pluvieux mais tardif.

Le risque lié au vieillissement des matériaux

Les effets de tous les risques évoqués sont aggravés (et réciproquement) par le vieillissement naturel des matériaux de construction ou du substrat du bâtiment ainsi que par le cortège continu d'évènements météorologiques (grands écarts thermiques, neige, glace,…) (Ollagnier, 2010; Schvoerer, 2004).

Fig. 9 À droite, face sud-ouest de la base du minaret de Jâm, Afghanistan. Les flèches blanches indiquent les points de prélèvements de mortier pour analyse physique à Bordeaux. Résultat: c'est un mortier composite «gypse – céramique athermique» (ph. Max Schvoerer, 03/09/2003).

3. Le mortier de Jâm, matériau composite et facteur de résilience

3.1 Observations et interrogations

La piste de matériaux "traditionnels"

L'objectif est ici de rechercher en quoi, le mortier participe à la résilience de l'édifice. Dans ce but, de légers prélèvements de mortier ont été effectués avec le gardien du site, M. Djame Bayedin (en accord avec *MM. Ismael Khan, gouverneur et Mazar Wahidi directeur du service du patrimoine de la province de Herât)* entre des briques de l'appareillage du minaret à la base de la face Sud-Ouest (Fig. 9, 10 et 11). En premier lieu, on doit déterminer sa nature.

Le point de vue des premiers observateurs

L'un des premiers articles sur Jâm (Wiet et Maricq, 1958, p. 22) s'attarde à juste titre sur l'exceptionnelle décoration du minaret mais évoque à peine le mode de fixation du décor extérieur du minaret, en précisant néanmoins que cette *"parure délicate est fabriquée à l'aide de petits fragments de brique, mis en place sur un lit de* ***plâtre****"*. En revanche, on ne trouve pas d'information sur le mode de liaison des briques de la structure. On lit ailleurs (Sourdel-Thomine, 2004, p. 65, citant le rapport de la DAFA (*Délégation Archéologique Française en Afghanistan,* Le Berre, 1960) que le matériau de construction est composé de briques cuites de dimensions moyennes (25x25x5 cm)… *"liées par un* ***mortier de chaux*** *qui n'a pu que durcir en vieillissant*".

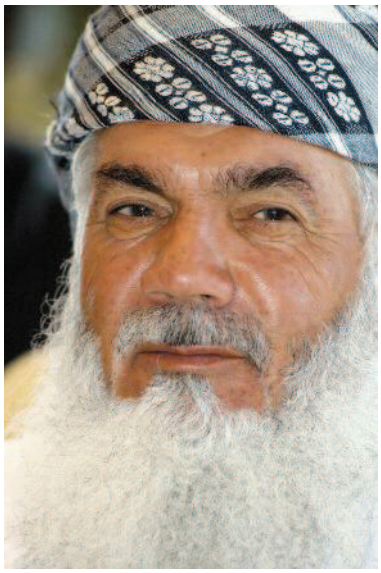


Fig. 10 Herât. Chef de guerre au temps de la présence soviétique et du régime taliban, Ismael Khan est gouverneur de la province en septembre 2003. Il accueillit les membres de la mission Paris-Kaboul, assura leur sécurité et encouragea la coopération sur le thème de la préservation du patrimoine culturel (ph. Max Schvoerer, 29/08/2003).

Observation du mortier in situ

Sur place, à Jâm (Fig. 9),nous avonsconstaté qu'il est de la même couleur que les briques de terre cuite, aussi dur, aussi étanche et du moins près de la surface extérieure du minaret, brisé et discontinu avec des lignes de brisures majoritairement verticales qui font penser à un matériau cassant qui a été "écrasé".

Fig. 11 Herât, Afghanistan. M. Mazar Wahidi, directeur du service de protection du patrimoine culturel de Herât et de la province. C'est à lui et pour son service, que PACT a offert le véhicule 4x4 Nissan Patrol qui avait conduit son équipage scientifique de Paris à Kaboul (ph. Max Schvoerer, 30/08/2003).

En prélevant les fragments destinés au laboratoire, nous avons surtout remarqué que sans être soudé, il était bien "collé" aux briques qu'il unit. Mais quelle est sa nature?

S'agit-il d'un matériau céramique?
La couleur du mortier et son aspect font penser à de la brique... ce qui est Impossible car lors de son utilisation, le mortier est forcément plastique et non cuit. Et après application d'une argile plastique comme mortier, à moins d'un gigantesque incendie, on ne peut la cuire en place !

S'agit-il d'une argile?
Impossible également car après séchage, la réversibilité de son hydratation en cas de pluie ou de crue, lui redonnerait sa plasticité. L'hypothèse fut logiquement écartée. Une réflexion de l'un d'entre nous résume l'incongruité de l'idée: *"... alors le minaret deviendrai mou, comme la montre de Salvador Dali!"*.

Mortier de plâtre ou de chaux?
Ces deux affirmations, toutes deux vraisemblables nous intriguaient. La première à cause de la couleur du mortier de Jâm qui est la même que celle des briques. À moins que ce soit du plâtre coloré avec de l'argile? La seconde du fait que jamais depuis que nous examinons à Bordeaux des mortiers d'Asie centrale, en particulier en Ouzbékistan (de Samarcande et Shahrisabz) nous n'avons rencontré de mortier de chaux, mais toujours du mortier de gypse de couleur blanche ou grise.

3.2 Expérimention physique
Il devenait opportun d'entreprendre une caractérisation physique. Nous l'envisagions avec d'autant plus d'intérêt que celle-ci réserve parfois des surprises qui peuvent contraindre

à des mises au point douloureuses comme une expertise récente de notre réseau l'a montré (Schvoerer *et al.*, 2000).
Sur le plan expérimental c'est une démarche que nous développons en routine en enchaînant une série d'expériences de laboratoire presque toutes très classiques, à l'exception sans doute de l'examen de la texture en luminescence provoquée par bombardement électronique (cathodoluminescence).

Caractéristiques recherchées

Un mortier est composé d'une phase continue ou ciment (ou liant) et d'une phase faite d'éléments discontinus (ou charge), de sable par exemple. En pratique, sur les échantillons de mortier recueillis sur la face Sud-Ouest de la base du minaret (Fig. 9), on a successivement recherché sur des surfaces planes et polies de fragments préparés par sciage ainsi que sur des poudres de granulométrie inférieure à 63 micromètres (mm), seuil conventionnel à Bordeaux de séparation du ciment et de la charge d'un mortier:

- Description de la texture du mortier à différentes échelles en microscopie optique puis électronique et en luminescence.
- Nature des constituants élémentaires (majeurs et mineurs) par fluorescence de rayons X en dispersion d'énergie dans une colonne de microscope électronique à balayage.
- Nature des constituants cristallisés du ciment de dimension inférieure à 63 mm (diffraction de rayons X sur poudre préparée par broyage, cuve à ultra-sons et tamisage). Accessoirement, nature de la charge.

3.3 Résultats expérimentaux et discussion

L'examen à la loupe binoculaire de la surface plane et polie de fragments solides de mortier, montre qu'ils comportent dans un "ciment" (ou liant) assez homogène, une charge grossière de grains minéraux qui peuvent atteindre des dimensions millimétriques. L'observation de la texture, à des échelles millimétrique ou centimétrique a été réalisée à partir de deux échantillons. Dans les deux cas, l'aspect du ciment est homogène et la charge de granulométrie variable et grossière. On note l'existence de pores nombreux, parfois de dimensions millimétriques, répartis de manière aléatoire. La charge des échantillons de mortier analysés est composée de fragments solides de gypse; cristaux de quartz, feldspaths potassiques, feldspaths sodiques, rares fragments de dolomite et de calcite.

Constituants élémentaires du ciment

La poudre minérale, disposée sur un porte échantillon en téflon, fut "pressée et surfacée"; l'analyse en fluorescence de rayons X a pris en compte quatre aires rectangulaires différentes de même surface, 1,9 x 1,5 mm (BDX 8486) et 2,2 x 1,8 mm (BDX 8488), afin d'évaluer la dispersion des mesures (écart-type) qui exprime le taux d'hétérogénéité du liant. Dans le tableau 1, on a reporté les teneurs moyennes mesurées, exprimées conventionnellement en teneurs d'oxydes de l'élément détecté, avec leur écart-type (moyenne des écarts à la valeur moyenne).

Oxydes	Na_2O	MgO	Al_2O_3	SiO_2	P_2O_5	S	K_2O	CaO	TiO_2	MnO	Fe_2O_3
Moyennes	0,64	2,21	7,14	25,09	nd	17,33	2,18	40,25	0,58	nd	4,78
Ecart-type	0,33	0,12	0,24	0,67	nd	0,19	0,09	0,83	0,11	nd	0,12

Tableau 1: *Constituants élémentaires du mortier de Jâm, Afghanistan. Analyse en fluorescence de rayons X prouvant que les composants de l'argile (Si, Al, O,...) sont présents dans le liant du mortier solide alors que la critallinité de l'argile introduite dans la phase plastique du mortier a disparu (cf. fig. 8). Question: comme il n'y a pas eu cuisson, comment expliquer cette disparition? (Expérimentation Marion Sabathé et Sophie Desgouilles, 2005).*

Commentaire

On remarque la teneur élevée en composés de Si, Al, S, Ca et Fe (cumul de l'ordre de 95 %). Si et Al sont compatibles avec la présence d'argile et de silice (quartz). Ca avec celle de chaux ou de gypse. Mais la teneur élevée en S favorise la présence de gypse. Fe enfin avec celle d'hématite (Fe_2O_3) qui donne la coloration ocre jaune. À ce stade, il s'agit de résultats très banals. Par précaution on va vérifier la cristallinité des constituants qui conduit à la détermination d'un matériau.

Recherche des phases cristallisées du "ciment"

Compte tenu de la discussion précédente on s'attendait à voir apparaître dans les diffractogrammes, les signaux (raies de diffraction) spécifiques et intenses de phases cristallisées: calcite ($CaCO_3$) formée à partir de la chaux, ou/et gypse ($CaSO_4$, $2H_2O$) formé à partir du plâtre ainsi que les signaux caractéristiques d'une ou plusieurs argiles (silicates d'aluminium)

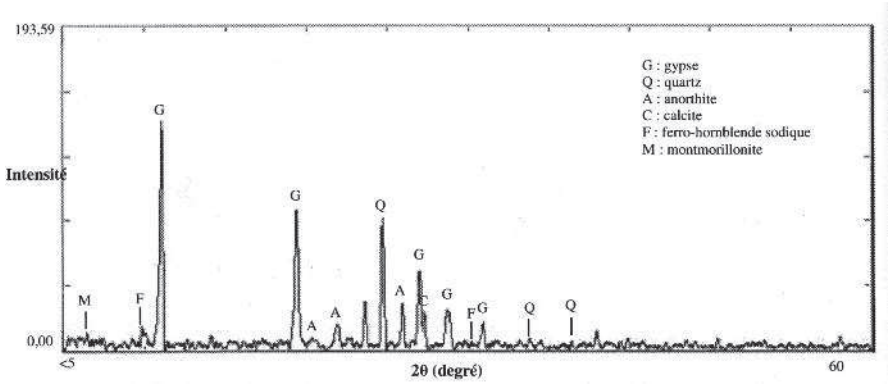


Fig. 12 Mortier de Jâm, Afghanistan. Dans le spectre de diffraction de rayons X du liant du mortier à l'état solide, on ne trouve pratiquement que du gypse, alors que la phase plastique du mortier était un mélange de plâtre et d'argile. Question: qu'est devenue la cristallinité de l'argile? (Spectre: Marion Sabathé et Sophie Desgouilles, 2005).

et hématite (Fe_20_3). Le spectre de diffraction X obtenu (Fig. 12) est très différent et n'est pas celui qui était attendu.

Commentaire

On remarque la présence prépondérante de gypse (G sur le spectre) et de quartz (Q) et très minoritaire d'anhydrite (A ou $CaSO_4$) et de calcite (C ou $CaCO_3$). En revanche les argiles attendues dans la zone des petits angle (<5°) sont absentes à l'exception de traces en limite de détection de vermiculite (V) et peut-être de kaolinite (K). Il en est de même du composé du fer qui n'est pas cristallisé.

Une anomalie: la disparition des argiles et interprétation

S'il n'y a pas de calcite, cela prouve que le mortier plastique utilisé était du plâtre et non de la chaux. En revanche, l'absence totale de cristaux d'argile est anormale car l'analyse élémentaire a renseigné sur la présence importante de silicium (SiO_2) et d'aluminium (Al_2O_3) constituants des argiles. Il a fallu un certain temps pour comprendre ce qui s'est passé. En renouvelant plusieurs fois l'expérience aux "petits angles" (domaine du spectre où se situent les raies de diffraction spécifiques des argiles), nous avons bien repéré quelques indices de présence au niveau des raies habituelles spécifiques des argiles mais globalement, leur absence fut confirmée, alors que leurs constituants principaux sont bien présents (SiO_2 et Al_20_3).
En affinant l'analyse, nous avons remarqué la similitude des spectres obtenus avec ceux des argiles chauffées et en cours de céramisation. On constate logiquement, en général à des températures voisines ou supérieures à 550°C au fur et à mesure d'une élévation de température, la perte progressive de cristallinité des argiles traduisant leur amorphisation. En céramologie, on explique le phénomène par le départ d'eau

de mouillage puis celle des hydroxydes (de fer, manganèse, calcium,…) qui relient les couches de silice et d'alumine des cristaux d'argile. Les édifices cristallins sont détruits.
À l'évidence, ce résultat a quelque chose de paradoxal car les argiles du mortier de Jâm n'ont jamais été cuites et pourtant, de manière reproductible, tout se passe comme si on analysait une céramique. Que s'est-il donc passé au cours de la "prise" de ce mortier d'argile et de plâtre?

Interprétation: céramisation des argiles sans cuisson
La formation de gypse cristallisé s'opère de manière irréversible à partir du plâtre qui déshydrate l'argile par capture successive de l'eau de mouillage (celle qui la rend plastique et malléable) puis de l'eau structurelle (eau et hydroxydes inter-foliaires) de l'argile elle-même, qui perd sa cristallinité.
Nous proposons de relier les deux processus observés: cristallisation du gypse et disparition de la cristallinité des silicates d'aluminium. Le silicium et l'aluminium toujours présents sont en quelque sorte la "mémoire" de la présence initiale de l'argile. **Autrement dit, tout se passe comme si les argiles se céramisaient à température ambiante, c'est-à-dire sans cuisson, de manière athermique**.
Vis-à-vis de la résilience du minaret de Jâm, le rôle de l'argile est donc capital. Elle forme avec le plâtre, un mélange plastique qui deviendra au cours de la prise une "solution solide" c'est-à-dire un matériau composite performant pour la fonction recherchée. Ce point de vue n'est pas sans conséquences sur la dureté du mortier et son étanchéité qui se renforcent, à l'égal des propriétés correspondantes d'un matériau céramique obtenu par cuisson. Au total, l'architecte a choisi le meilleur mortier possible.

4. Le double escalier hélicoïdal de Jâm. Contribution d'un parti-pris architectural à la résilience du minaret de Jâm

4.1 L'intérieur du minaret et la piste du parti-pris architectural.
En 2003, deux d'entre nous (M.S. et S.D.) ont pénétré dans le minaret comme au temps de la découverte, par l'ouverture ménagée par nos prédécesseurs qui ont agrandi un soupirail à environ deux mètres au-dessus du sol actuel, sur la face Nord qui surplombe le Hari Rud. À l'origine, on entrait dans le minaret par une porte située sur la face Nord-Est, aujourd'hui enfouie

sous les sédiments mais reconnue lors de sondages (Sourdel-Thomine 2004, se référant au rapport Le Berre de 1960).
L'espace libre intérieur a une géométrie circulaire (rayon 4,90 m autour d'un pilier axial et massif dont la section circulaire a un rayon de 1 m à la base et de 0,465 m à son sommet, 42 m plus haut. Si la base du minaret est très massive, en revanche entre 42 m et 64,10 m, la partie supérieure est «creuse» et légère. Sur une hauteur de 22,10 m. environ, il n'y a plus de pilier central et le mur extérieur nettement aminci, est conforté par quatre tirants de briques qui raidissent la structure.

4.2 Organisation intérieure
Par rapport au centre de la base circulaire du pilier qui est aussi le centre de la base du minaret et sur la médiatrice de chacune des huit faces de l'octogone de base, on trouve successivement: à 1 m, la surface du pilier, à 2,45 m la paroi intérieure du minaret et à 4,85 m, la face extérieure. Si on vise les sommets de l'octogone, la dernière mesure passe à 5 m. Au Sud, un mur entre le pilier et la paroi empêche que l'on fasse le tour du pilier.

4.3 Surprise
La suite est très inattendue, pour ne pas dire extraordinaire. Dans l'espace libre situé entre 1 m et 2,45 m, soit sur 1, 45 m de large, en deux points diamétralement opposés correspondant respectivement aux faces Ouest et Est, on observe deux départs d'escaliers. Dans les deux cas, la montée se fait dans le même sens, contraire à celui des aiguilles d'une montre. Deux personnes empruntant en même temps chacun de ces deux escalierset montant vers le sommet du minaret, aboutissent sans jamais se voir, 42 m. plus haut, à deux autres portes diamétralement opposées elles aussi. L'une au Nord et l'autre au Sud. Elles donnaient accès à un balcon qui permettait de passer d'un escalier à l'autre. La double hélice, comme le pilier central, se termine plus haut (à 42 m.).

4.4 Des escaliers hélicoïdaux imbriqués
Au premier abord, on ne comprend pas cette singularité architecturale, jusqu'au moment où l'on réalise qu'il s'agit en fait de deux escaliers hélicoïdaux identiques. La largeur de l'escalier à la base du minaret est de 1,45 m et diminue au fur et à mesure de l'élévation pour atteindre environ 1,15 m à 38 m. Chaque escalier compte 7 spires avec un pas de 6 m. Ils sont imbriqués l'un dans l'autre et leurs accès sont décalés de

180°, de telle manière que l'espace de circulation, pour celui qui gravit ou descend a 2,6 m de hauteur.

4.5 Fonction de ce double escalier
S'il s'était agi seulement d'accéder au sommet de l'édifice, un seul escalier eût classiquement suffi. Finalement, c'est le doublement qui est inattendu et pose problème. À moins que ces deux escaliers en forme de spirales imbriquées l'une dans l'autre, aient une signification ésotérique ou religieuse – aspect que nous n'avons pas exploré –, nous penchons plutôt pour une option rationnelle consistant à augmenter la résistance mécanique du minaret afin de renforcer sa résilience vis-à-vis des risques naturels (inondations, séismes et sans doute rafales de vent). Les hypothèses des auteurs cités vont dans le même sens et font allusion au "renforcement de la construction" sans exclure, non sans malice "la satisfaction du royal orgueil du commanditaire" (Sourdel-Thomine, 2004, p. 67).

4.6 Détour
En d'autres termes, tout se passe comme si *Ali ibn Ibrahim al-Nisaburi* avait introduit deux ressorts dans sa tour. En effet, un escalier en spirale peut être considéré comme un ressort dont l'introduction dans un tube renforce la résistance à la flexion, à la déformation et à l'écrasement. C'est une propriété naturellement adoptée par la texture de certaines tiges végétales ou retrouvée par exemple, en chirurgie coronarienne avec l'usage de"stents". Horizontalement et verticalement une relative élasticité est conférée à la structure par le mode de scellement des marches au pilier central et à la paroi du mur extérieur.
En demeurant qualitatif, on peut dire qu'un ressort a la capacité de stocker de l'énergie mécanique et de la restituer mais surtout dans le cas présent, de transmettre par l'intermédiaire de chaque marche, une contrainte radiale (horizontale) au pilier central qui la diffuse dans toutes les directions par l'intermédiaire des marches opposées. Ces marches, selon le rapport de la DAFA (Le Berre 1960 et Sourdel-Thomine, 2004, p. 55-64) au nombre de 159 pour l'escalier qui part du côté Ouest (le seul alors dégagé), sont formées de 4 à 6 briques de 5 cm d'épaisseur en moyenne, avec un nez de bois, souvent disparu, elles ont entre 21 et 33 cm de hauteur (contremarche), pour une foulée de 40 à 42 cm contre la paroi intérieure du fût. Elles sont une fois sur deux (en alternance) scellées soit sur le pilier central, soit sur la paroi du mur extérieur.

4.7 Pourquoi une structure à deux escaliers imbriqués?
En dehors d'une "fantaisie" ou d'une extravagance du maître d'oeuvre, la piste qui fut le plus sérieusement explorée concerne son rôle structurel, susceptible de contribuer à préserver l'édifice, contre les deux risques naturels majeurs qui le menacent de la manière la plus évidente depuis sa création à la fin du XII[e]s. ap. J.C.: inondations et tremblements de Terre. Autrement dit, ce double escalier hélicoïdal, trop complexe pour être fortuit, a certainement une fonction "consolidante" et par conséquent, préventive. Cet aspect du problème nous a amenés à adjoindre à notre groupe d'expertise, un architecte spécialiste du comportement des édifices vis-à-vis de la sismicité (A.B.) dont l'analyse est en cours.

5. Synthèse et bilan de l'expertise. Recommandations et épilogue

5.1 Synthèse et bilan
Afin de déterminer l'origine de la résilience du minaret de Jâm, inscrit par l'Unesco sur la Liste du patrimoine mondial en danger et recommander une stratégie de sauvegarde et de conservation, deux pistes d'investigation ont été empruntées. Celle des matériaux "traditionnels" et celle du "parti-pris architectural".
La première a mis en évidence **le rôle d'un matériau, le mortier de liaison des briques.** Partant de l'idée que l'édifice est un empilement ordonné d'éléments discontinus, il est rapidement devenu évident que ce qui confère à l'édifice, sa cohérence et sa rigidité, c'est le mortier. Autrement dit, **son rôle pour assurer la résilience du minaret est capital**. Dans une région du monde où le mortier de chaux semble inconnu ou méconnu non seulement au XII[e] s. mais de nos jours encore (...), le mortier plastique et bien "collant" de plâtre et d'argile qui se transforme en mortier composite solide de gypse et d'un minéral amorphe (silicate d'aluminium "céramisé" sans cuisson). En retenant ce matériau traditionnel, l'architecte a fait le meilleur choix possible.
Sur la seconde piste, on a trouvé l'expression **d'une brillante-réflexion conceptuelle.** L'architecte a habilement abaisséle centre de gravité de l'édifice – vers le tiers de la hauteur du minaret – et surtout, créé une œuvre hors du commun en inventant ce fascinant double escalier hélicoïdal dont chaque

marche joue en cas de séisme, le rôle de dissipateur de contraintes. Cette structure singulière confère ou renforce rigidité et élasticité au minaret – ce qui représente **une part importante de sa résilience**. Pour des raisons certainement différentes, on ne retrouvera l'idée correspondante que bien plus tard, entre 1517 et 1537 avec ... Léonard de Vinci à Chambord en France ou plus récemment à Rome, au musée du Vatican où l'architecte Momo conçut un escalier de ce type en 1932.

5.2 Recommandations

À ce titre, pour le présent et le proche avenir, à partir de l'expertise préliminaire réalisée et de nos observations, nous préconisons les mesures sécuritaires suivantes.

Dans l'immédiat. Former (en Europe ou/et en Afghanistan), des cadres afghans de la protection et de la conservation du patrimoine et poursuivre avec la même assiduité et application (Manhart, 2004), les campagnes de protection contre les crues du Hari Rud et du Jâm Rud: missions d'Andrea Bruno au nom de l'Unesco et des pays qui soutiennent ses interventions, en particulier Italie et Suisse (Bruno, 2003).

Rapidement à cause de l'inclinaison (Fig. 13). Procéder en urgence à une recherche de la cause de cette inclinaison et à des mesures de sa sensibilité vis-à-vis de la sismicité locale et de paramètres liés à des accidents météorologiques éventuellement attribuables à l'évolution actuelle du climat. Entreprendre des sondages archéologiques afin de connaître la nature du substrat et essayer de déterminer la limite mécanique de sa résilience vis-à-vis du déséquilibre des pressions exercées. De manière préventive, il est impératif de mettre en place sur le minaret, comme on le fait de nos jours notamment pour des ponts, des barrage ou des tours de centrales nucléaires, un équipement automatisé permanent de contrôle ou/et de détection de l'existence ou de la formation de contraintes ou/et de fissures. Notamment en certains points dont on sait qu'ils sont critiques. Tel la jonction de la partie basse et massive du minaret et de la partie allégée et aérienne, vers 38 à 42 mètres; en effet si l'inclinaison s'accentue, c'est sans doute là que le risque de rupture sera maximal ... L'un

Fig. 13 Le minaret de Jâm et un visiteur local, saisis in situ par Bertrand de Miollis, jeune reporter «artiste peintre » de la mission Paris-Kaboul. Reproduit avec son autorisation (source: ouvrage «Paris Kaboul», éd. Hoëbeke, Paris, p.74, 2004).

Fig. 14 et 15 Afghanistan, 2003. Images saisies après l'étape de Jâm, entre Band-e-Amir et Bamiyan; réponse intemporelle et symbolique à la question: c'est comment l'Afghanistan quand c'est la paix? (ph. Max Schvoerer, 06/09/2003).

d'entre nous (A.B.) a entrepris une analyse approfondie de cette question par rapport au risque sismique.

Matériaux. Utiliser lors des futures interventions protectrices ou réparatrices encadrées par l'Unesco, exclusivement ce "mortier de Jâm" si performant, qui a fait ses preuves et qui peut se préparer localement.

Exploration. Sensibiliser l'opinion publique internationale à la menace qui pèse sur ce chef d'œuvre universel. Dans ce but, le réseau PACT a conçu un projet de musée virtuel consacré à Jâm et à son décor ghoride sur le modèle du musée virtuel Shacultim dont l'objet est la culture timouride (Ollagnier*et al.*, 2009). Enfin, il serait judicieux d'engager un nouveau programme de sondages archéologique au pied et dans l'environnement du minaret (Thomas and Gascogne, 1996; Unesco, 2008).

5.3 Épilogue

L'Afghanistan est un pays d'une richesse patrimoniale considérable qu'il importe de connaître et de sauvegarder (Ceredaf, 2001). Le minaret de Jâm en est un exemple. Souhaitons à ce pays, à son patrimoine et à sa population (Fig. 14 et 15) meurtris par la guerre, de retrouver enfin la paix.

Pour terminer, revenons brièvement vers l'homme qui n'est plus désormais un inconnu, "l'architecte venu du Khorassan: **Ali ibn Ibrahim al-Nisaburi",** concepteur et créateur du minaret de Jâm. En peu de mots et pour conclure, il nous a semblé que son œuvre doit absolument être sauvegardée et que lui-même a sa place au panthéon des penseurs et génies* d'Asie centrale.

Fig. 15

** Thème général d'une conférence présentée à Samarcande par l'un d'entre nous (M.S.), en mai 2014, à l'invitation du gouvernement d'Ouzbékistan et de l'ambassade à Paris (Schvoerer et al., 2014).*

Remerciements

En Afghanistan, à Ismael Khan (Fig. 10), "Gouverneur" en 2003, de la Province de Herât et Mazar Wahidi (Fig. 11), directeur du service de protection du patrimoine culturel de la ville de Herât et de sa Province; ils nous autorisèrent à recueillir à Jâm, le matériel d'étude. Au photographe Reza et à l'ONG "Aïna" de Kaboul, pour leur hospitalité. De même à deux membres de notre équipage scientifique Robert Vergier et Françoise Bourrouilh Le Jan, ainsi qu'au peintre dessinateur de la mission, Bertrand de Miollis; avec son accord, un de ses croquis saisi à Jâm illustre cet article (Fig. 13).
En Europe et en France, à Claude Ney, Ingénieur au CNRS (UMR 5060, Bordeaux). à Laurent Tédeschi de la CESA de Saint-Astier, nos étudiants ToshieTakasahi, Marie-Pascale Lahayne, Sébastien Laleu, Vanessa Marlier et Marion Sabathé, et enfin, le photographe Bruno Pagnanelli dont nous présentons avec son accord, une photographie aérienne du Hari Rud en crue, à Jâm. Quant aux résultats expérimentaux présentés, ils ont été obtenus grâce au soutien de l' CRP2A, UMR 5060, IRAMAT de l'Université Bordeaux Montaigne, du Département SHS du CNRS et du Conseil Régional d'Aquitaine.

Bibliographie

Berchem Van M. , 1911. *L'architecture musulmane de la Perse*. Journal des savants, février, n°2, 11-12.

Boulin J. et Bouyx E., 1977. *Introduction à la géologie de l'Hindou Kouch occidental.* Soc. Géol. France, N° 8, 87-105.

Bruno A., 2003. *Le minaret de Djam.* Patrimoine mondial, n° 29, 4-29.

Ceredaf, 2001. *Afghanistan, patrimoine en péril*. Actes d'une journée d' étude. Éd. Centre d'études et de recherches documentaires sur l'Afghanistan, Paris.

Collectif, 2004. *Expédition scientifique et culturelle sur les routes de la soie, Paris-Kaboul.* Organisation: Olivier Weber et Édouard Cortès. Publication coordonnée par Samuel Douette. Éd. Hoëbeke, Paris, 128 p.

Dupaigne B., 2007. *Afghanistan. Monuments millénaires*. Imprimerie nationale Éditions, Paris, 320 p.

ICOMOS, 2002. *Evaluation par les organisations consultatives pour l'inscription du site de Jâm sur les listes de l'Unesco*. N°211 rev, www.worldheritagesite.org, mai, 4 p.

Kervran M., 2004. *Le minaret de Jâm. Expédition scientifique et culturelle sur les routes de la soie Paris-Kaboul.*Hoëbeke, 70-83.

Lapparent de, A. et Lavigne Sainte - Suzanne J., 1964*. Une coupe géologique entre Charak et Jam (province du Ghor, Afghanistan)*. Comptes rendus sommaires des séances de la Société géologique de France, 203-20

Le Berre M. 1960. *Observations d'architecte – archéologue à Jâm*. Rapport de la DAFA (Délégation Archéologique Française en Afghanistan) avec 200 photographies en noir et blanc au format 6x9 (source pour l'ouvrage cité de J. Sourdel-Thomine).

Macchi G., 2008. *Saving minarets at risk in Afghanistan.Session de formation EURO* - PA risques majeurs du Conseil de l'Europe. CUEBC (Ravello) et réseau PACT. Cours oral et manuscrit, 8 p.

Manhart C., 2004. *Mandat et activités de l'Unesco pour la réhabilitation du patrimoine culturel afghan.* Museum international: face à l'histoire. musées et patrimoine en situation de conflit et de post-conflit., vol. 55, n° 3-4, décembre, 76-82.

Maricq A. et Wiet G, 1959. Le minaret de Djam. La découverte de la capitale des sultans ghorides (XII^{e}-XIII^{e} s.). *Mémoires de la DAFA,* t. XVI, Paris, 11-85.

Menon A., Lai C. and Macchi G., 2004. *Seismic hazard assessment of the historical site of Jam in Afghanistan and stability analysis of the minaret*.Journal of earthquake engineering, vol. 8, NS1, 251-294.

Ollagnier C., Schvoerer M., Levi-Strauss L., Xushvaqtov N., Aminov B. et Cilia E., 2009. *Prototype de "Musée virtuel" de la Culture Timouride.* Réseau PACT en collaboration avec l'Unesco et le Conseil Général de Dordogne (France) *www.culture-timouride.com*.

Ollagnier C., 2010. *De Kairouan (Tn) à Samarcande (Uz), conservation d'un savoir-faire (lustre métallique) et d'un site (palais de Timour).* Thèse de doctorat, Université Bordeaux Montaigne, 4 octobre, 402 p.

Schvoerer M., Vidal M., Coursaut J.D., Anarbaev A. et Ollagnier C., 2014. *Le ciel de Samarcande, l'archéologie et le prince astronome*U-*lughBeg (1394 -1449 ap. J.C.).*TerritoridellaCultura, rivista on line, N°16, 18-26.

Schvoerer M., Ney C. et Massué J-P, 2004. *Quarante jours sur les routes de la soie. À propos de trois étapes majeures de la mission Paris – Kaboul: Herât, Jâm, Bamiyan et Ispahan*. Éd. de l'association "Sciences et patrimoine (PACT)", r. Gounod, Bègles, Fr., 93 p.

Schvoerer M., Boyer R., Bechtel F., Dubernet S., l'Helgouac'h J. et Courtin J., 2000. *Sur l'émergence de l'artisanat verrier en France méridionale au Néolithique final /Chalcolithique: nouvelle analyse physique de la perle de Roaix (Vaucluse, France).* Bul. de la SPF, t. 97, n°1, 73-81.

Sourdel-Thomine J., 2004. *Le Minaret Ghouride de Jâm, un chef d'œuvre du XII^e siècle*. Mémoires de l'Académie des Inscriptions et Belles-Lettres, tome XXIX, De Boccard, Paris, 174 p.

Thomas D.C. and Gascogne A., 1996. *Recent archaeological investigation of looting ground the Minaret of Jâm, Ghur province*. In J. van Krieken-Pieters (ed), Art and archaeology of Afghanistan: its fall and survival. A multi-disciplinary approach. Leiden, E.J. Brill, 155-67.

Unesco, 2002. *Nomination of properties for inclusion on the world heritage list*. Documentation du Centre du patrimoine mondial, 21 p.

Unesco, 2008. *Expert working group on the preservation of Jâm and Herât, Iccrom, Italy (Rome),* Documentation du Centre du patrimoine mondial, 13 p.

Wiet G. et Maricq, 1958. *Un minaret inconnu en Afghanistan*. CRAI, Paris, 114-118.