

Le sauvetage des églises de Voskopoja (Albanie)

La documentation métrique des fresques pour leur sauvegarde et leur restauration

Figure 1 : Vue générale de l'église Saint-Athanase.



■ Thomas LEROY

Cet article décrit la constitution de la documentation photogrammétrique à destination d'utilisateurs multiples, d'un site patrimonial menacé en Albanie. Un large éventail de techniques, correspondant à la complexité des édifices, a été employé pour restituer les documents. Il faut souligner que le développement depuis plusieurs années déjà, du matériel utilisé pour les applications de photogrammétrie terrestre permet de s'équiper à bas coût et de traiter précisément des sites complexes. De plus, même si les méthodes de restitution des fresques et surfaces courbes sont bien décrites dans la littérature spécialisée, nous devons nous attacher à en banaliser l'usage comme pour les relevés photogrammétriques conventionnels.

■ mots-clés

photogrammétrie numérique, développement de surfaces, redressement d'images, fresques.

Niché dans les montagnes du sud de l'Albanie, Voskopoja a longtemps caché les vestiges de sa gloire passée. Centre de pèlerinage orthodoxe réputé au XVIII^e siècle, le village, alors une ville de 30 000 âmes, abritait de nombreuses églises et un monastère. Six églises restent debout aujourd'hui, dans des états de conservation variés. Comme toute église orthodoxe, elles abritent de nombreuses fresques couvrant intégralement les parements intérieurs.

Celles-ci sont déjà endommagées par l'usure du temps, le vandalisme, les conditions historiques et sérieusement menacées par les infiltrations d'eau.

Découvrant la disparition programmée des trésors de Voskopoja, l'ONG Patrimoine sans Frontières (PSF) décide de monter un comité scientifique pour entreprendre la sauvegarde du site. Des membres de l'Ecole Nationale du Patrimoine (ENP, Paris), du ministère de la culture albanais (IMK), des architectes

■ ■ ■ et historiens de l'art se penchent sur les problèmes de conservation, de diagnostic et de restauration. Tous conviennent que la première étape urgente est une campagne de relevé exhaustive sur les trois églises les plus menacées.

Il s'agit en effet de documenter intégralement les intérieurs et extérieurs pour fournir une base documentaire à tous les intervenants. Il faut évaluer la surface de fresques à restaurer, prévoir les échafaudages, analyser les déformations des églises, comparer les plans aux typologies régionales (Albanie, Grèce, Macédoine), enregistrer l'état existant des fresques (arrêt virtuel des dégradations) pour y reporter les interventions prévues.

Bref, tout manque, les architectes réclament des dessins figurant les structures puisque les volumes intérieurs étant entièrement peints, ils sont très difficiles à évaluer.

Les restaurateurs, eux, ont besoin d'une représentation métrique des fresques la plus lisible possible : arcs doubleaux, dômes, culs-de-four, trompes rendent leur appréciation impossible sans un système de représentation spécifique.

En établissant un enregistrement géométrique et radiométrique complet, on peut constituer une base de donnée permettant de restituer chaque partie des églises en tenant compte des besoins de tous les utilisateurs futurs.

Pour chaque église les documents suivants sont ainsi à produire :

- dessins au trait à l'échelle 1/50^e : vue en plan, coupes longitudinales et transversales multiples de manière à voir chaque parement intérieur (Figure 1).
- images redressées à l'échelle 1/20^e : chaque parement doit être représenté sous forme d'images redressées ou développées, incluant toutes les surfaces courbes (y compris le sol et le plafond).

C'est avec ces spécifications qu'une équipe d'évaluation (PSF, ENP, IMK) et de relevé (Art Graphique & Patrimoine) se rend sur place durant l'été 2003.

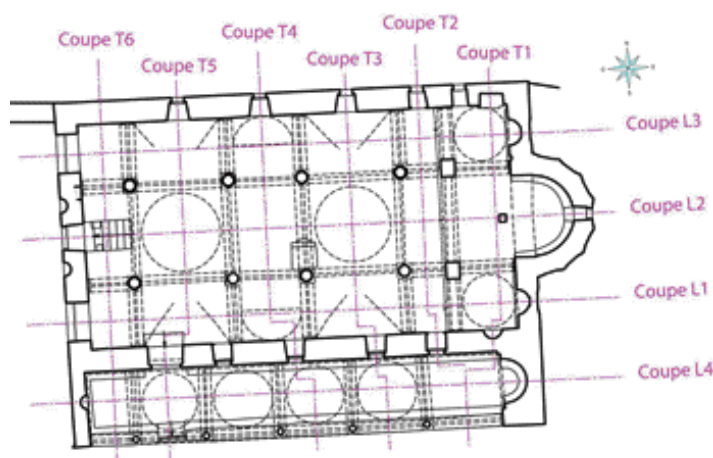


Figure 2 : Plan de repérage des coupes, église Saint-Athanase.

Saisie des données

Le but du relevé étant fixé, il devenait possible de définir le matériel à employer en fonction des contraintes extérieures. A l'époque, en effet, il reste plus de 6 heures de route depuis Tirana pour rejoindre le village, dont l'approvisionnement électrique est aléatoire. L'import de matériel de mesure pose aussi certains problèmes.

Un des objectifs du relevé est aussi de démontrer, s'il était encore nécessaire, qu'on peut arriver rapidement à des résultats très satisfaisants avec du matériel courant.

Nous optons donc pour une station totale sans réflecteur et un appareil photographique Fuji S2 Pro (6 M pixels) muni de focales précalibrées (15 mm, 24 mm, 30 mm) et d'un flash externe puissant. Le générateur de courant a été acheté sur place.

La mission, planifiée en France d'après notre expérience, prévoyait 3 à 4 jours de relevé par église.

■ Prises de vues

Des tables de prise de vue montrant les champs maxima et les distances optimales par rapport aux objets photographiés en fonction des focales utilisées ont grandement aidé au bon déroulement de la mission (tableau 1). Cette table permet de garantir la qualité des images en fonction de leur échelle moyenne d'impression.

Focales	Distance maximale à l'objet	Taille terrain maximale de l'image
15 mm	3.3 m	5.1 m x 3.4 m
24 mm	5.3 m	5.1 m x 3.4 m
30 mm	6.6 m	5.1 m x 3.4 m

Tableau 1 : Paramètres de prise de vues selon la distance focale pour des impressions à l'échelle 1/20^e à 300 dpi (taille terrain du pixel : 1.7 mm).

Cette phase d'acquisition d'images doit être très mécanique pour éviter les oublis et assurer une qualité d'image constante. Toutes les parties ont été photographiées sous trois angles différents, l'appareil photo étant relié à un ordinateur portable où un opérateur s'assurait de la qualité globale de l'image avant de l'archiver suivant le zonage adopté en début de chantier (par exemple T6L1 pour la cellule sud-ouest).

■ Relevé tachéométrique

Le relevé très répétitif est une source bien identifiée d'oubli de données. Pour chaque station d'appareil, une liste des éléments à relever permet de se contrôler et l'emploi d'un système de levé codé a été un gain de temps significatif. Peu ou pas de croquis sont nécessaires et tous les contrôles de marche sont affichés en temps réel.

Le calcul de l'ajustement final, le dernier jour de relevé, permet le contrôle général de la précision et l'évaluation des

manques éventuels sur le levé codé, ce qui donne alors lieu à des compléments manuels ponctuels.

L'interprétation des sections sur place, vue la nature du site, permet de s'affranchir d'une saisie pénible en photogrammétrie convergente. En effet, l'appréhension des volumes sur des surfaces entièrement peintes et sombres est délicate.

Photogrammétrie

■ Ajustement

Etant donnée la diversité des documents à produire, les tâches de bureau sont soigneusement planifiées, les éléments architecturaux sont identifiés et numérotés.

Heureusement, dans la masse d'images saisie, toutes ne font pas l'objet d'un calage photogrammétrique. En fait, seules les positions des images permettant de définir les détails non

mesurés sur place sont calculées ainsi que les jeux d'images qui traitent des plafonds.

Le nombre de points de contrôle mais surtout leur cohérence sur l'ensemble d'une église permettent de s'affranchir d'un ajustement global. Des ajustements locaux comprenant au moins 5 points de calage s'insèrent donc parfaitement dans le système de coordonnées général. On travaille directement avec des images dont l'éloignement moyen est compatible avec l'échelle de restitution.

Les calibrations des objectifs ont été faites en France et contrôlées en Albanie, ce qui n'a pas révélé de différences significatives dues au transport.

■ Surfaces planes

Les parements plans ont été redressés en utilisant une transformation projective à 5 paramètres, ceux-ci étant directement



Figure 3 : Développement photogrammétrique du chevet, à gauche l'image originale, à droite l'image développée.
($R = 1.83$ m, $\sigma_R = 1.1$ cm)

■ ■ ■ surdéfinis par les points de contrôle multiples. Les distorsions des objectifs, importantes pour les courtes focales, sont prises en compte lors de cette opération. Sur un objectif de focale 15mm, on arrive à des distorsions maximales proches du $1/10^{\circ}$ de mm, ce qui correspond sur l'image à une quinzaine de pixels.

Dès l'acquisition sur le terrain cependant, nous avons noté que la structure des fresques serait un problème. En effet les fresques sont peintes sur un mélange de paille et de plâtre frais lissé grossièrement sur la maçonnerie. Les altérations du temps ont aussi provoqués des renflements importants. Aucune surface n'est donc réellement plane.

Pour minimiser cet effet de relief, les photos ont été prises le plus orthogonalement possible aux parois en utilisant la plus longue focale utile disponible.

Les images redressées sont directement connectées au plan moyen défini par les points de contrôle et sont mosaïquées automatiquement par une procédure interne. Il reste alors à apporter la touche finale, c'est-à-dire rattraper les différences radiométriques résiduelles et ajuster les petites discontinuités géométriques dues essentiellement à la planéité imparfaite des parois. Cette tâche est effectuée avec le logiciel *The Gimp*, libre de droits.

Un calque contenant les points de contrôle aide à s'assurer de la précision globale, estimée à 1-2 cm.

■ Surfaces analytiques

Arcs doubleaux, voûtes en berceau, voûtes d'arrête

La représentation développée des parties cylindriques est intuitive, elle permet une représentation plane qui conserve les distances et les surfaces et met à disposition des utilisateurs une vue synthétique d'un élément architectural qui présente de très fortes déformations sur une simple photographie (Figure 3).

Des procédures de développement de cylindres précédemment développées pour le plafond de la Galerie des Glaces à Versailles ont été réutilisées.

Les images développées de cylindres nécessitent la connaissance précise de nombreux paramètres (Figure 4).

• **les 5 paramètres du cylindre** : nous approchons le problème de façon généralisée, ce qui permet de traiter tous les cas de figure, quelque soit la position ou l'orientation du cylindre dans l'espace. Sont nécessaires : un point fixe $P_0 (X_0, Y_0, Z_0)$, trois rotations suivant un référentiel topographique (α, ν, κ) pour orienter l'axe du cylindre (Kraus, 1996), et le rayon moyen. Certains paramètres n'ont pas d'influence, ainsi X_0 , Y_0 , ou Z_0 peut toujours valoir 0 et κ vaut toujours 0. Ces paramètres sont déterminés par un ajustement appliquant le principe des moindres carrés.

• **la position du centre perspectif de l'image à développer**, grâce aux nombreuses prises de vues et à cause des poutres transversales, un ajustement par la méthode des faisceaux

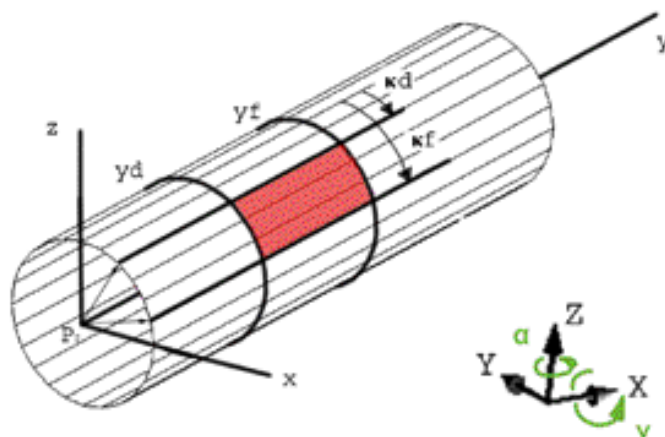


Figure 4 : Paramètres de développement d'un cylindre.

a été préféré à une transformation linéaire directe (DLT).

• **les quatre paramètres de la zone d'intérêt sur le cylindre doivent être connus** : deux angles κ_d , κ_f , et deux distances à P_0 : y_d et y_f

• **taille terrain du pixel développé** pour le rééchantillonnage (1.7 mm et ici interpolation bilinéaire).

On déduit, pour chaque pixel de l'image développée, sa position XYZ qui est basculée dans l'image correspondante par les équations classiques de photogrammétrie. On obtient alors un triplet RVB (Rouge, Vert, Bleu) correspondant à la couleur sur site de ce pixel (Karras, 1997).

On s'aperçoit très vite que plusieurs images sont nécessaires pour documenter complètement une voûte cylindrique ; grâce aux paramètres de zone d'intérêt, on peut aboutir à un mosaïquage quasi automatique.

Evidemment, le passage par une modélisation paramétrique des voûtes induit une approximation. On reste tributaire de la forme réelle de celles-ci.

Comme on l'a vu plus haut, le principe de fixation des fresques crée une imprécision de la surface. Ces imprécisions, vues sous plusieurs angles de prise de vue se traduisent par des écarts parfois importants lors du mosaïquage.

Nous avons appliqué cette procédure aux arcs doubleaux, mais l'étude des résultats de l'ajustement de surface a montré que l'on pouvait être meilleur. En effet, la section des arches ressemble plus à une anse de panier qu'à une portion purement circulaire. Une approche différente a donc été adop-

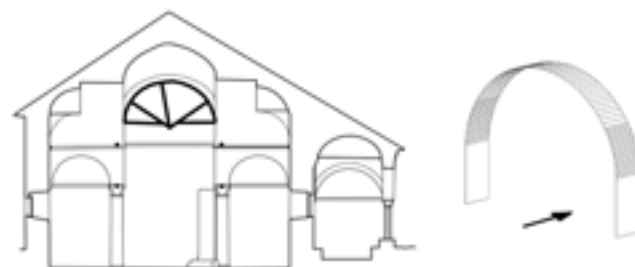


Figure 5 : Section transversale T4 (vue Est), et le doubleau principal composé de quatre portions circulaires.



Figure 6 : Développement d'une voûte d'arrête.

tée, en exploitant le résultat du dessin des fonds de coupes qui reproduisaient le profil exact des arcs (Figure 5).

On considère qu'un arc peut se modéliser comme une anse de panier extrudée. Grâce à leur faible profondeur (jamais plus de 60 cm), on peut supposer que la direction d'extrusion est perpendiculaire au plan de coupe.

Le développement d'une procédure de traitement multicylindres a donc augmenté considérablement la qualité de notre travail. L'utilisateur n'a qu'à sélectionner le profil dans Autocad et une commande spécifique crée le fichier de paramètres pour le développement. Le programme développe les différentes portions de cylindre et les raboute.

La qualité géométrique des développements de surface y a gagné, en outre cela nous a permis de traiter des formes plus complexes comprenant des portions planes. A terme, toute courbe ayant subi une extrusion droite peut être développée par cette procédure. La longueur d'extrusion est le paramètre sensible qui permet au modèle de s'écarter de la réalité.

Les parties cylindriques devaient aussi être représentées en orthophoto dans les sections longitudinales. Un programme a été créé spécialement pour réduire les développés à une orthophoto, selon leur rayon moyen.

Au total, 18 arcs, 6 berceaux et 4 voûtes d'arrête amenant à des développés en trèfle (Figure 6), ont été réalisés pour la seule église de Saint-Athanase.

Coupoles

Les coupoles devaient être traitées pour être insérées dans les fonds de coupes et dans la vue projetée du plafond.

En tant que surface à double courbure, elles ne sont pas développables sans compromis et il est donc nécessaire de choisir un système de représentation plane de la sphère (projection). Le choix de ce système est crucial, car il permet de conserver certaines propriétés plus ou moins intéressantes suivant les usages futurs.

Les projections conformes conservent les angles, les projections équivalentes conservent les surfaces (cas particulièrement intéressant pour les besoins de quantification des res-

tauteurs), d'autres projections conservent les distances sur des lignes particulières.

Malgré l'intérêt des projections équivalentes, les lourdes déformations induites rendent difficiles l'intégration de ces documents aux côtés des autres productions. Le choix de la projection orthographique a permis l'insertion des coupoles dans les fonds de coupe.

Le traitement mathématique de la projection est assez similaire à celui effectué pour le développement des arcs, le modèle mathématique de la sphère se réduisant à 4 paramètres : coordonnées du centre et rayon. Les résidus de l'ajustement de sphères sur les coupoles n'ont pas révélé de déformation majeure qui nécessite de modifier notre approche.

Chaque coupole est ainsi vue à plat depuis cinq directions différentes (quatre latérales et une vue de dessous). Cependant, pour alléger les calculs et faciliter les exploitations futures, le programme de traitement cartographique développé spécialement pour l'occasion, crée systématiquement une image de transfert, dont les coordonnées cartésiennes (i,j) des pixels correspondent aux coordonnées sphériques (φ, λ). Il s'agit en fait d'une représentation de la sphère avec la plus simple des projections dite "plate-carré". Cette image sert d'image source pour toutes les représentations futures d'une coupole, quelque soit le type de projection envisagé (Guerra, 2000). ■■■



Figure 7 : En haut, modélisation d'une voûte quelconque, en bas, orthophotographie.

■ ■ ■ ■ Autres coupoles

Pour la documentation des surfaces restantes et en particulier de certaines coupoles qui ne peuvent pas, a priori, être réduite à une courbe paramétrique simple, nous avons choisi une méthode purement photogrammétrique qui alliait légèreté de mise en œuvre et rapidité.

Ces surfaces sont documentées par des orthophotos dans cinq directions (cf ci-dessus). Nous avons choisi d'établir une modélisation photogrammétrique des surfaces restantes par un maillage triangulaire. Cette opération a été menée à bien à l'aide du logiciel Photomodeler (EOS Software). En outre, l'habillage photo-réaliste du maillage a été effectué dans le même logiciel. Les ortho-photos ont été créées à partir des modèles 3D texturés produits par cette procédure.

Le procédé est simple mais bien plus long que le traitement des surfaces analytiques, en effet l'approximation de la forme réelle de la voûte nécessite un certain nombre de points pour être réaliste (Figure 7). Cependant, on s'approche au plus près de la réalité et on peut donc créer des documents plus fiables.

Conclusions

Grâce à la complémentarité et à la diversité des techniques mises en œuvre, nous avons pu produire rapidement tous les documents demandés. Les travaux de restauration ont commencé à l'été 2004 et continuent chaque été avec la présence de restaurateurs Français, Grecs, Italiens et Allemands. Les deux autres églises mesurées n'ont pas encore été restituées.

Elles sont complètement enregistrées et s'inscrivent dans un inventaire à une date donnée de ces deux monuments. Leur restitution peut être lancée à tout moment : début de la restauration, dommage important...

Ceci nous amène donc tout naturellement à envisager le problème de la documentation des formes architecturales complexes et de leur préservation. Une campagne photogrammétrique et topographique "bien ficelée" permet de créer un enregistrement métrique d'un édifice sans coût prohibitif et avec un matériel somme toute basique.

On mise sur quelques paramètres pour parvenir à une méthodologie fiable :

- la maîtrise mathématique du matériel (calibrations des optiques non métriques)
- la flexibilité de la photogrammétrie convergente
- les possibilités de traitement des surfaces analytiques
- la création facilitée de modèles 3D texturés par voie photogrammétrique

Les méthodes de relevé décrites paraissent peut être déjà anachroniques. Cependant, même si l'usage d'un scanner-laser est souhaitable pour l'enregistrement du patrimoine, il est séduisant de penser qu'avec des méthodes traditionnelles nécessitant peu de moyens matériels, et en tout cas des moyens conventionnels, on arrive à des résultats tout à fait probants. Ces techniques sont donc tout à fait accessibles. Le

manque de moyens est une limite mais pas une excuse pour expliquer l'absence de relevés. Les techniques à bas coût sont documentées, il manque une diffusion encore plus large et des techniciens suffisamment formés pour les mettre en pratique.

Pour Art Graphique & Patrimoine, le travail sur Voskopoja continue avec la formation au dessin et à la manipulation des images métriques, des jeunes restaurateurs français. ●

Références

Guerra, F., Miniutti, D. *The cartographic projections for the representation of double curved surfaces*. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. XXXIII, Part B5, Amsterdam, 2000, pp. 533-538.

Karras, G. E., Patias, P., Petsa, E., Ketipis, K. *Raster projection and development of curved surfaces*. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. XXXII, Part 5C1B, Göteborg, 1997, pp. 179-185.

Kraus, K. *Photogrammetrie, Band 2 Verfeinerte Methoden und Anwendungen*, 1996, Dümmler Verlag, Bonn.

Leroy, T. *Saving Voskopoja, complete photogrammetric coverage of three Albanian painted churches*. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. XXXVI-5/C34, Torino 2005, pp. 414-419.

Contact

Thomas LEROY

ingénieur topographe ENSAIS

Art Graphique et Patrimoine

15-15bis avenue J. Jaurès - F-94340 Joinville le Pont

www.artgp.fr

Email: t.leroy@artgp.fr

ABSTRACT

Keywords: Digital Photogrammetry, Image Unwrapping, Rectification, Frescoes.

This paper gives an overview of the way to produce exhaustive multi-user documentation of an endangered site in Albania through photogrammetric applications. The complexity of the structures to be documented has led us to use a large range of available photogrammetric and survey techniques. The development of low-cost photogrammetric material: softwares, cameras, personal computers, offers the possibility to achieve quickly the survey and restitution of complex architectures and frescoes. Though methods to document frescoes are already well described in the literature, we have to spread their use by convincing the users of their utility, and to find ways to perceive unwrapped documents as the classical photogrammetric documentation.