

MÉTHODES MODERNES DE DOCUMENTATION POUR LA RESTAURATION ET LA CONSERVATION DU PATRIMOINE

Gunnar Siedler, Sebastian Vetter, Nicolas Martin-Beaumont

Résumé

L'expérience des auteurs dans les domaines de la documentation de la conservation du patrimoine et du développement de logiciels les a conduits à acquérir les connaissances de base nécessaires pour développer des méthodes de traitement d'images et de cartographie numérique. L'entreprise Fokus GmbH Leipzig a été impliquée dans plusieurs projets de documentation et d'étude des peintures murales médiévales, en particulier en Allemagne, en Suède et en Suisse.

La lasergrammétrie ou la photogrammétrie numérique (*structure from motion* - SfM) sont utilisées pour enregistrer les formes (voûtes, absides), les surfaces structurées et les déformations (murs, plafonds, sols). Le modèle photogrammétrique de surface (SfM) qui en résulte est automatiquement texturé avec les images utilisées. La documentation photographique est réalisée simultanément à l'aide d'un appareil photo numérique de moyen format, afin de garantir une résolution d'image suffisante. Souvent, des images de fluorescence UV sont également prises. À l'aide d'un modèle de surface et des images orientées, les textures et les projections orthographiques des voûtes et des murs peuvent être calculées. Les fichiers tif 2D multicouches peuvent ensuite être fusionnés en une seule image. Des images historiques supplémentaires ou des images de fluorescence UV peuvent être traitées de la même manière (en utilisant le même système de coordonnées), afin de produire des plans d'images juxtaposés. En fonction de la taille de l'image et de la résolution requise, des fichiers d'images 2D de plusieurs centaines de Mo sont créés. À l'heure actuelle, ces fichiers ne peuvent être évalués efficacement qu'en 2D. Le projet de recherche PRO-QUATO (2016-2018) a été lancé par l'Institut de photogrammétrie et de télédétection de l'université technique de Dresde et Scan 3D GmbH de Berlin, afin de remédier aux problèmes actuels liés au traitement de la documentation 3D. L'objectif principal du projet était l'affichage de différents contenus d'images sur un modèle de surface multi-texturé et le développement d'outils pour une cartographie 3D efficace en étroite collaboration avec les restaurateurs.

Abstract The authors' experience in the fields of heritage conservation documentation and software development has enabled them to acquire the foundational knowledge necessary to develop methods for image processing and digital mapping. The company Fokus GmbH Leipzig has been involved in several projects documenting and studying medieval wall paintings, particularly in Germany, Sweden, and Switzerland. Laser scanning or digital photogrammetry (Structure from Motion – SfM) are employed to record forms (vaults, apses), structured surfaces, and deformations (walls, ceilings, floors). The resulting photogrammetric surface model (SfM) is automatically textured using the captured images. Photographic documentation is simultaneously performed with a medium-format digital camera to ensure sufficient image resolution. Often, ultraviolet fluorescence images are also acquired. Using a surface model and oriented images, the textures and orthographic

projections of vaults and walls can be computed. The multi-layered 2D Tif files can then be merged into a single image. Additional historical images or ultraviolet fluorescence images can be processed in the same way (using the same coordinate system) to produce juxtaposed image plans. Depending on the image size and the required resolution, 2D image files of several hundred megabytes are generated. Currently, these files can only be effectively evaluated in 2D. The PROQUATO research project (2016–2018) was initiated by the Institute of Photogrammetry and Remote Sensing at the Dresden University of Technology in collaboration with Scan 3D GmbH of Berlin to address current issues related to the processing of 3D documentation. The main objective of the project was the display of various image contents on a multi-textured surface model and the development of tools for efficient 3D mapping in close collaboration with conservators.

Resumen La experiencia de los autores en los campos de la conservación del patrimonio y la documentación del desarrollo de software los ha llevado a adquirir el conocimiento básico necesario para desarrollar el procesamiento de imágenes y los métodos de mapeo digital. La compañía Fokus GmbH Leipzig estuvo involucrada en varios proyectos para documentar murales medievales, en particular en Alemania, Suecia y Suiza. Lasergrametría o fotogrametría digital se utilizan para grabar formas (bóvedas, ABSE), superficies estructuradas y deformaciones (paredes, techos, pisos). El modelo fotogramétrico resultante (SFM) se texturiza automáticamente con las imágenes utilizadas. La documentación fotográfica se lleva a cabo simultáneamente utilizando una cámara de formato medio digital, para garantizar una resolución de imagen suficiente. A menudo, también se toman imágenes de fluorescencia UV. Se puede calcular un modelo de superficie e imágenes orientadas, texturas y proyecciones de ortografía de las bóvedas y paredes. Los archivos 2D 2D multicapa se pueden fusionar en una sola imagen. Se pueden tratar imágenes históricas adicionales o imágenes de fluorescencia UV de la misma manera (usando el mismo sistema de coordenadas), para producir imágenes yuxtapuestas. Dependiendo del tamaño de la imagen y la resolución requerida, se crean archivos de imágenes 2D de varios cientos de MB. Actualmente, estos archivos solo se pueden evaluar de manera efectiva en 2D. El proyecto de investigación Proquato (2016-2018) fue lanzado por el Instituto de fotogrametría y de teledetección de la Universidad técnica de Dresde y GMBH 3D en Berlín, para remediar los problemas actuales vinculados al procesamiento de la documentación 3D. El objetivo principal del proyecto era la visualización de diferentes imágenes en un modelo de superficie de textura múltiple y el desarrollo de herramientas para un mapeo 3D efectivo en estrecha colaboración con los restauradores.

Mots-clés numérisation d'objets en 3D, relevé 2D/3D, projections orthographiques, cartographie 3D

Définition des paramètres de qualité

Échelle de l'image / résolution de l'image

La résolution détaillée requise (taille des pixels sur l'objet), qui dépend de l'échelle et de la résolution de l'image, ainsi que la précision métrique doivent être spécifiées en fonction de la tâche à accomplir sur l'objet. Ainsi, l'utilisateur ultérieur (architecte, planificateur, conservateur, société d'exécution...) peut procéder à sa propre évaluation graphique / métrique et à l'interprétation du contenu dans un logiciel de CAO ou de cartographie.



Figure 1 Résolution des détails en fonction de l'échelle de l'image 1:20, 1:50, 1:100 pour une résolution d'image de 400 dpi. © fokus GmbH Leipzig.

La résolution de détail requise est traditionnellement définie par l'échelle et la résolution de l'image (Siedler, Vetter, 2018). Pour une résolution d'image de 400 dpi (400 points par pouce = 25,4 mm), la taille du point est de 0,0635 mm. En multipliant la taille du point par l'échelle de l'image, on obtient la taille métrique du pixel de l'objet, soit, en arrondissant, 0,06 mm pour une échelle de 1:1, 1,3 mm pour une échelle de 1:20 et 3,2 mm pour une échelle de 1:50 (**fig. 1**).

Le tableau suivant (**fig. 2**) présente les échelles d'évaluation, deux niveaux de qualité (200 et 400 dpi) et les exigences en matière de précision d'évaluation résultant de l'échelle de l'image pour différents exemples d'application. En général, les peintures murales sont traitées à l'échelle 1:10 et à 400 dpi (taille de point de 0,6 mm). Pour les objets plus détaillés, on utilise une échelle de 1:5 et 400 dpi (taille de point de 0,3 mm).

Sector Pixel size 400dpi Pixel size 200dpi Accuracy	1:1 0.06mm 0.13mm 0.5mm	1:2 0.13mm 0.25mm 1.0mm	1:5 0.32mm 0.64mm 2.5mm	1:10 0.64mm 1.3mm 5.0mm	1:20 1.3mm 2.6mm 1.0cm	1:50 3.2mm 6.4mm 2.5cm	1:100 6.4mm 12.7mm 5.0cm
architects/ consultant				x	x	x	x
building archaeology			detail	stone by stone detail	stone by stone	general overviews	
field archaeology			graves, other details	sections, elevations graves	plans		
Conservation	1:1	1:2	1:5	1:10	1:20	1:50	1:100
stone				x	x	x	
wall painting / stucco			x	x	x		
wood / objects archaeology		x	x	x			
wall painting / textile / paper	x	x	x	x			

Figure 2 Vue d'ensemble de la résolution de détail requise en fonction des exemples d'application; résolution de détail (taille des pixels au niveau de l'objet) pour 400 dpi et 200 dpi; précision de l'évaluation en fonction de l'échelle de l'image (0,5 mm x échelle de l'image); peinture murale mise en évidence dans les cases rouges.

Capteur de l'appareil photo

Un appareil photo reflex avec un capteur plein cadre (24 × 36 mm) est un minimum requis. L'utilisation de capteurs à haute résolution ne permet d'obtenir les résultats souhaités que si l'on utilise de nouveaux objectifs calculés avec une capacité de résolution optique appropriée. En outre, l'éclairage de l'objet est nécessaire pour permettre l'enregistrement d'images avec une faible sensibilité ISO.

Pour la documentation d'objets de haute qualité dans le domaine des intérieurs historiques/ peintures murales, l'utilisation d'un appareil photo avec un capteur de taille moyenne est plus utile. Actuellement, nous utilisons pour nos projets des appareils photo moyen format PhaseOne 645D-P65 de 65 mégapixels et PhaseOneXF IQ4 de 150 mégapixels.

Ces systèmes de caméras sont avantageux pour les conditions intérieures en raison de la plage dynamique élevée du capteur moyen et du faible bruit numérique. Une image prise par un appareil photo moyen format de 150 mégapixels remplace quatre à six images prises par un appareil photo reflex. Le nombre réduit d'images qui en résulte diminue la quantité de travail et le risque d'erreurs lors de l'adaptation des couleurs des images.

Méthodes d'évaluation

Toutes les méthodes d'évaluation ne conviennent pas à tous les projets. En fonction de la surface de l'objet (murs plats, voûtes, ornements en stuc), la méthode appropriée doit être choisie (Luhmann, 1978; Pietschner *et al.*, 2003).

La rectification d'images 2D permet la transformation mathématique d'un plan 2D à l'intérieur du faisceau de rayons d'une caméra (projection centrale). Le résultat est un plan d'image à l'échelle réelle qui permet de prendre des mesures de l'objet.

La projection orthogonale 3D suppose toujours l'enregistrement 3D de la surface de l'objet. Les données 3D (nuage de points, modèle de surface texturé) sont projetées orthogonalement sur une géométrie de référence : plan, cylindre, cône (Vetter, Siedler, 2011). La création de données 3D peut être réalisée par photogrammétrie numérique (SfM) ou par lasergrammétrie (TLS). Le résultat est un plan-image à l'échelle réelle (orthophoto), qui permet de prendre des mesures sur tous les plans qui sont parallèles par rapport à la géométrie de référence (Brumana *et al.*, 1992, p. 786-793; Stephani, 1992, p. 821-824).

La documentation 3D des objets est basée sur l'enregistrement 3D de la surface de l'objet par nuage de points à l'aide de TLS ou de SfM. Dans une deuxième étape, les points sont reliés par triangulation pour créer un modèle numérique de surface (MNS). Si nécessaire, le MNS est texturé à l'aide d'images orientées. Le résultat est un MNS texturé à l'échelle réelle, qui permet des mesures tridimensionnelles, la création d'analyses de sections et de déformations ainsi que la création de projections orthogonales sur plusieurs géométries.

Toutes ces méthodes sont applicables mais, sans de bonnes images photographiques, il n'est pas possible d'obtenir un bon résultat. Selon la société de services, la rectification en 2D est la méthode la moins chère, mais elle offre également la meilleure qualité d'image. La projection orthogonale en 3D est la méthode la plus coûteuse en temps, car les images doivent être orientées par photogrammétrie et une numérisation 3D opérée par lasergrammétrie ou photogrammétrie.

Documentation d'un objet en 3D sous la forme d'un modèle de surface texturé

Un avantage du SfM est la création d'un modèle de surface texturé en plus du nuage de points. Ce processus est automatisé, bien que l'utilisateur puisse contrôler la résolution de la texture, la sélection de l'image et les régions d'une image à texturer. Cependant, l'adaptation de la couleur des images et l'attribution de la texture aux régions sélectionnées du modèle de surface sont des processus automatisés (fig. 3).

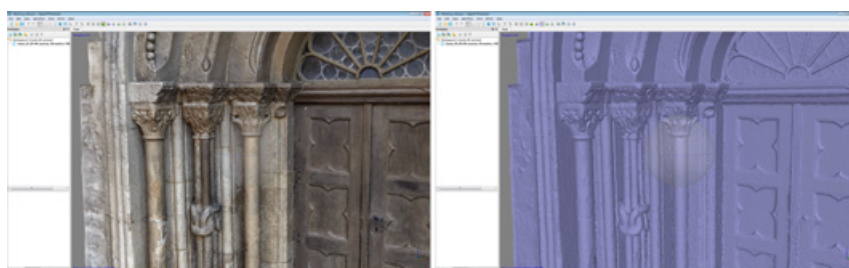


Figure 3 Le modèle de surface texturé (SfM) - distance entre les points de 2 à 3 mm, résolution de la texture à l'échelle 1:20, à gauche; le modèle de surface sans texture d'image (SfM), à droite.

Projection ortho 3D d'images orientées supplémentaires

Dans cette méthode, les images orientées par photogrammétrie avec une résolution de 0,3 à 0,6 mm sont projetées orthogonalement sur un plan d'objet ou un cylindre en tant que plan d'image 2D à l'aide d'un MNS (distance entre les points de 2 à 3 mm). Cette procédure est généralement utilisée pour l'enregistrement des peintures murales. Actuellement, la quantité de données d'image ne peut pas être affichée correctement sur un modèle de surface en raison de la résolution de détail requise de 1:5 / 1:10.

En outre, les images uniques professionnelles avec un éclairage approprié ne peuvent pas être remplacées par un grand nombre de petites images prises pour calculer les nuages de points par SfM. L'adaptation automatique des couleurs et la texturation par SfM sont imprécises, de sorte que l'adaptation des couleurs et le montage des images dans Adobe Photoshop sont difficilement remplaçables.

Exemple de projet de documentation à haute résolution et à l'échelle

Église Saint Christophe à Haufeld

Dans l'église Saint-Christophe à Haufeld (Thuringe), la documentation photogrammétrique de la peinture murale (XIV^e siècle) a été traitée en 2014 par déroulement avec projection orthogonale à l'échelle 1:5 pour une résolution de 300 dpi.

Sur place, près de 200 coordonnées de référence ont été mesurées à l'aide d'un tachéomètre et 39 images de l'état actuel ont été prises avec un PhaseOne 645D-P65.

En outre, la pièce a été numérisée par un scanner laser sous la forme d'un nuage de points dans le même système de coordonnées. Ce nuage de points a servi de base à la création d'un modèle numérique de surface (fig. 4, à gauche).

À l'aide des coordonnées de référence, les images ont été orientées par photogrammétrie et projetées orthogonalement sur un cylindre (géométrie de déroulement) à l'aide du modèle de surface.

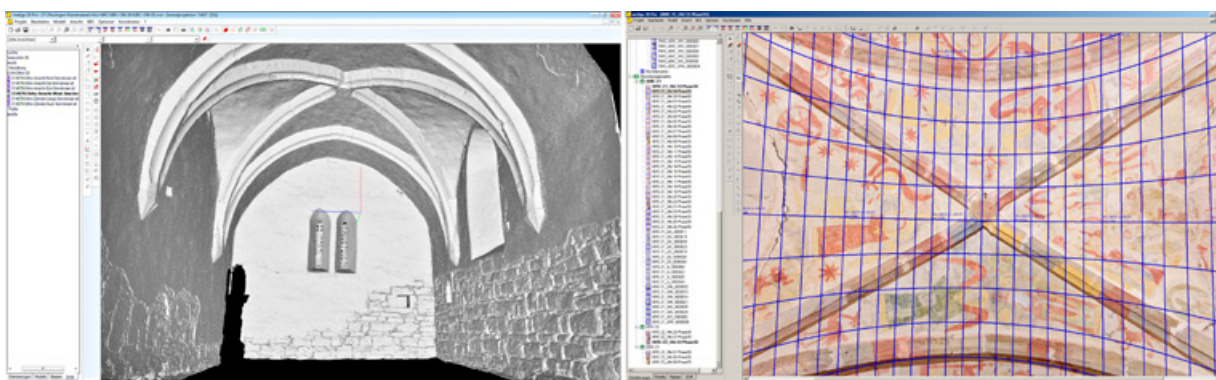


Figure 4 Modèle de surface (TLS), à gauche; projection de la géométrie de déroulement dans l'image orientée, à droite.

Vingt-quatre diapositives historiques en couleur datant de 1944 et conservées au Zentralinstitut für Kunstgeschichte (ZIKG) de Munich ont été scannées à 4000 dpi (5500 × 3700) et

avec une profondeur de couleur de 16 bits (Siedler, Sacher, 2006, p. 189-198). Ces images ont été orientées photogrammétriquement et projetées orthogonalement en utilisant la même géométrie de déroulement. Cela a permis d'obtenir des plans d'images juxtaposés des deux états (1944 et 2014) de la voûte (**fig. 5**).

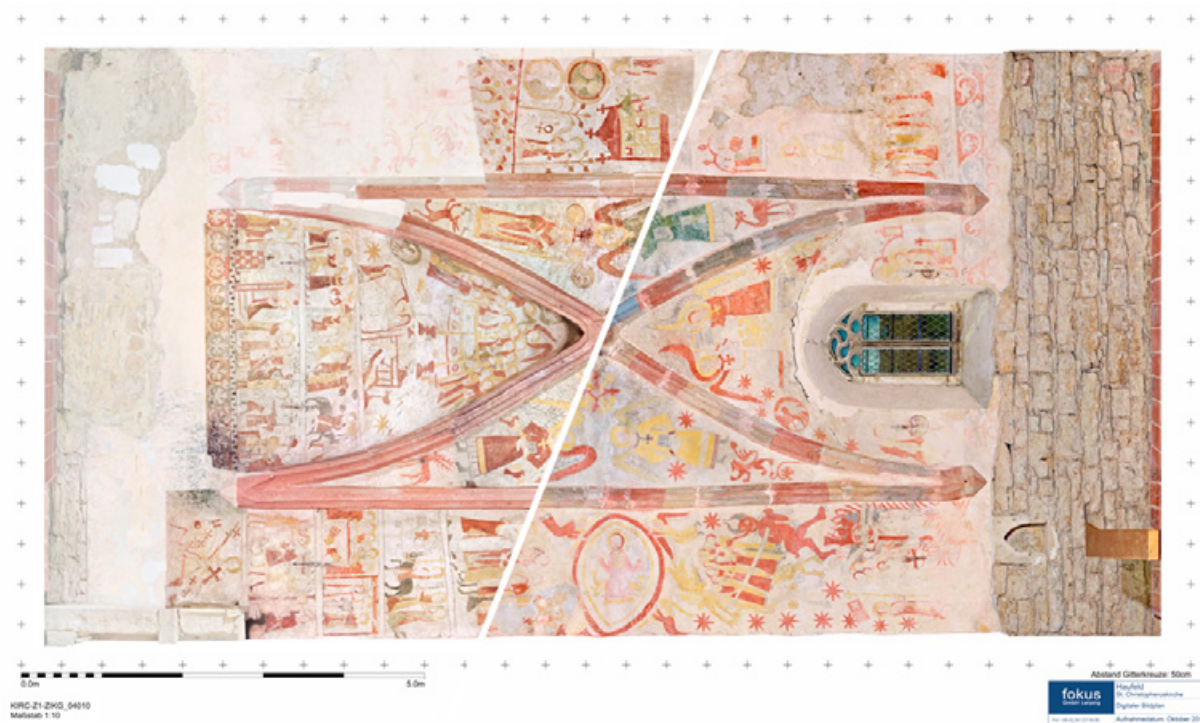


Figure 5 Haufeld, église St-Christophe : déroulement numérique avec projection orthographique à l'échelle 1:10 : diapositive couleur historique du ZIKG, à gauche; documentation (2014), à droite.

Chapelle Saint-Joseph d'Isny

La *Gottesackerkapelle St-Josef* est une rotonde du XVIII^e siècle, qui contient une voûte avec une peinture illusionniste sur une surface d'environ 13 × 18m et a nécessité une évaluation à l'échelle 1:5 pour 300 dpi.

L'enregistrement automatisé de la géométrie par SfM et la texturation automatisée simultanée de haute qualité ont été entrepris. 150 images ont été prises par un appareil photo numérique moyen format (PhaseOne 645D-P65) avec un chevauchement de 60 à 80 %, suffisant pour l'enregistrement de la géométrie. Soixante images supplémentaires ont été prises avec le même appareil à une échelle d'image plus élevée à l'aide d'un système de flash comprenant 4 réflecteurs de 600 watts pour l'enregistrement de la texture (**fig. 6**).

En raison de l'effort plus important requis pour l'éclairage et le placement de l'appareil photo, ces images supplémentaires n'ont été prises qu'avec un chevauchement de 20 %. Toutes les images ont été développées et adaptées en couleur avec Capture One (de la société Phase One).



Figure 6 Image de PhaseOne 645D-P65 pour la création d'un modèle de surface par SfM, à gauche; texturation (résolution plus élevée), à droite.

30 points de contrôle ont été mesurés à l'aide d'un tachéomètre afin de servir de référence pour l'orientation de l'image photogrammétrique. Les deux groupes d'images ont été traités dans Agisoft Photoscan pour le calcul simultané de l'orientation de l'image et la création d'un nuage de points dense (**fig. 7**).

Le modèle de surface (triangulation) a été calculé avec 5,2 millions de points (distance entre les points d'environ 4-5 mm). Pour l'exportation du modèle de surface texturé, la texture a été créée à l'échelle 1:5 et à 300 dpi.

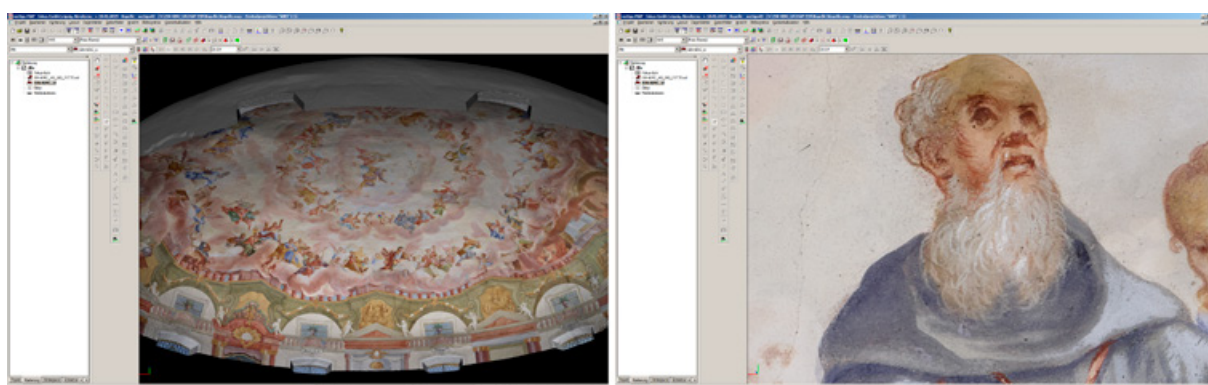


Figure 7 Affichage du modèle de surface texturé dans metigo® 3D : vue d'ensemble, à gauche; détail montrant la qualité de la texture, à droite.

L'exportation de la projection orthographique verticale à l'échelle réelle (**fig. 8**, TIFF) et le déroulement avec projection orthogonale pour huit sections de la voûte sont calculés pour permettre le travail de documentation par les restaurateurs (cartographie de l'état, planification et documentation du travail de conservation).



Figure 8 Plans de l'image fidèle à l'échelle originale traitée à l'échelle 1:5 pour 300dpi : projection orthogonale du plafond, à gauche; déroulement combiné à la projection orthogonale, à droite.

Résultats actuels du projet de recherche et développement PROQUATO

Le logiciel de cartographie Metigo® MAP a été développé depuis l'an 2000 pour créer des cartographies numériques vectorielles, y compris le calcul des masses. Le logiciel est utilisé dans divers domaines de la conservation. Les petits projets peuvent être traités comme un seul projet de cartographie, tandis que les projets complexes, comme une cathédrale, peuvent être organisés comme un projet hiérarchisé, avec plusieurs projets de cartographie pour chaque mur.

Dans le cadre du projet de recherche et développement PROQUATO (optimisation des processus, élargissement de la qualité et outils d'évaluation pour les modèles de surface multi texturés, 2016-2018), les exigences en matière de cartographie 3D ont été analysées et développées en étroite collaboration avec les clients.

Importation de données

Metigo® MAP permet l'importation de modèles de surface texturés au format VRML et OBJ ou sans texture (STL). Pour la cartographie, un maillage composé de triangles est toujours nécessaire.

La fenêtre d'importation (**fig. 9, à gauche**) permet d'insérer un facteur d'échelle pour importer les modèles de surface à l'échelle réelle. La mise à l'échelle à l'intérieur du projet de cartographie n'est pas possible ultérieurement.

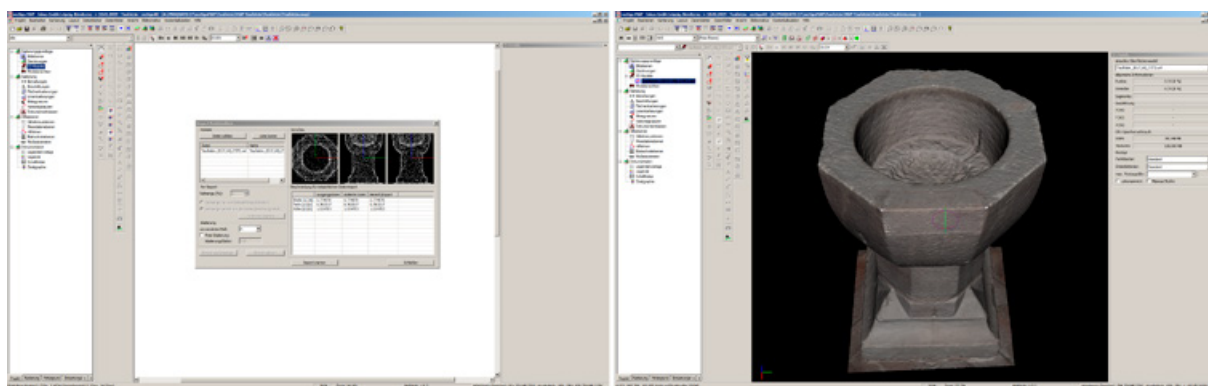


Figure 9 Fenêtre d'importation d'un modèle de surface dans les fichiers STL, VRML et OBJ avec insertion d'un facteur d'échelle et d'une unité, à gauche; affichage 3D d'un modèle de surface texturé, à droite.

Il est possible de naviguer librement dans l'affichage 3D. Dans l'affichage 2D des vues du modèle (projections orthogonales), les données d'image sont réduites à l'échelle et à la résolution du projet.

Si le modèle de surface texturé a été créé dans un système de coordonnées défini, il est possible de combiner la projection orthogonale avec les plans CAO existants (**fig. 10**).

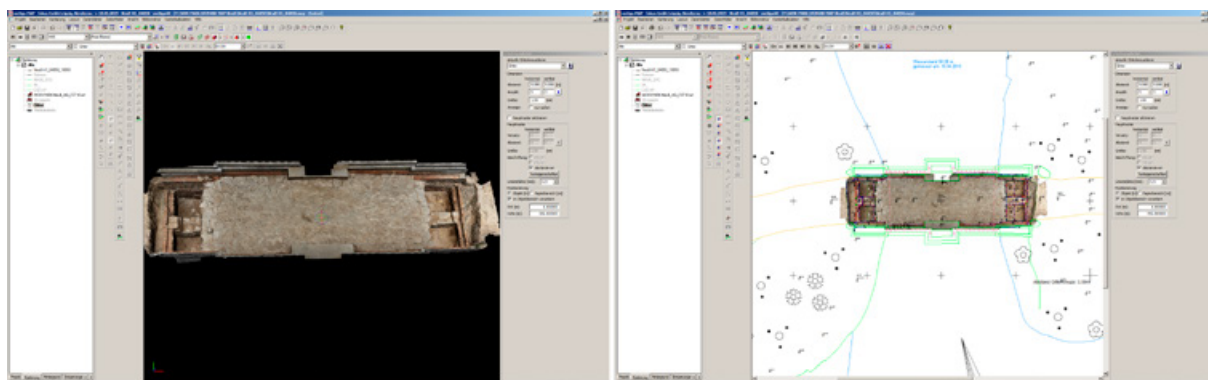


Figure 10 Affichage en 3D du modèle de surface texturé d'une construction de pont exposée, à gauche; combinaison du dessin CAO avec la projection orthogonale, à droite.

Évaluation de modèles de surface complexes par segmentation du modèle

En général, les données 3D sont affichées par OpenGL via la carte graphique. Cela signifie que les performances de l'affichage 3D dépendent principalement des caractéristiques de la carte graphique.

Si le modèle de surface est trop grand pour le matériel utilisé, il est possible d'effectuer l'évaluation uniquement sur des parties du modèle de surface complet. La segmentation permet de charger partiellement le modèle de surface (**fig. 11 et 12**). Au début, l'utilisateur peut charger le modèle de surface à résolution réduite comme un nuage de points complet pour définir des segments, par exemple des parties individuelles d'une façade. Par la suite, seuls les segments souhaités doivent être chargés pour la cartographie.

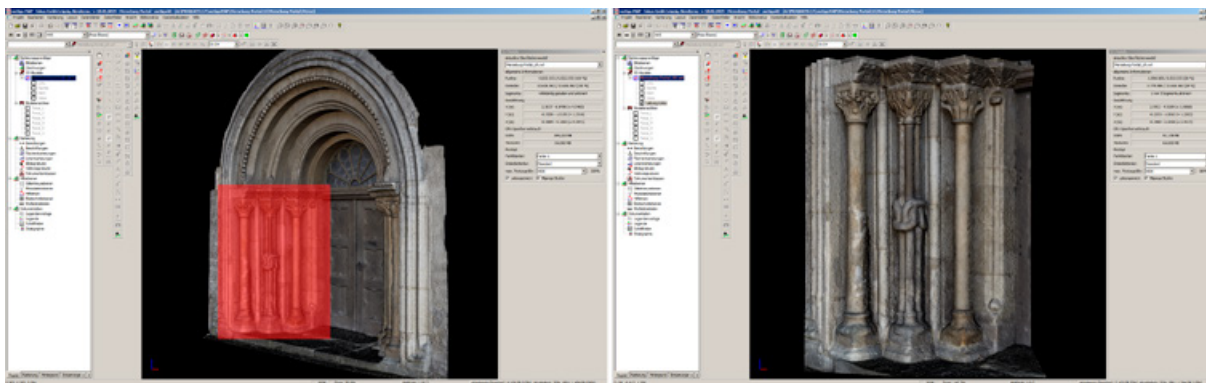


Figure 11 Affichage 3D avec sélection d'un nouveau segment, à gauche; affichage 3D du nouveau segment, à droite.

Pour les objets complexes tels que les figures humaines, il est utile de créer des segments individuels, par exemple pour les bras, les jambes et les mains, car cela facilite la navigation et l'évaluation des endroits cachés (par exemple, à l'intérieur d'un bras).

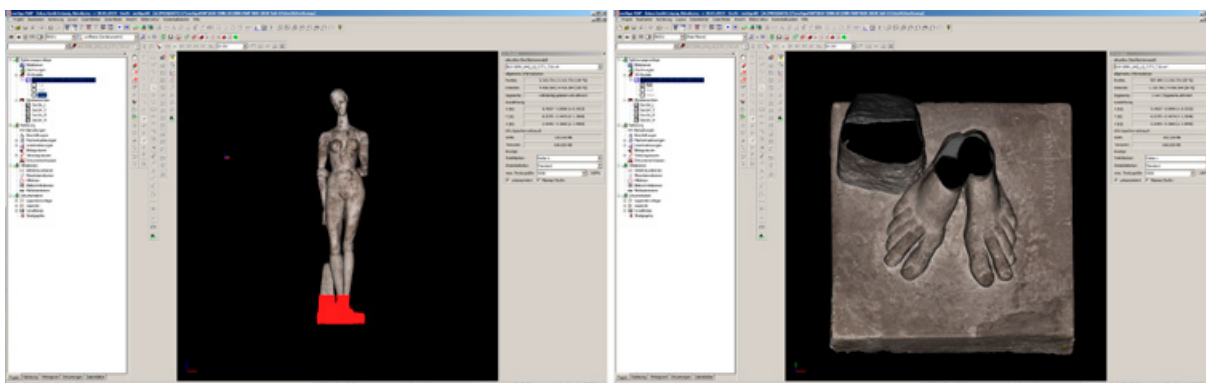


Figure 12 Affichage 3D avec sélection d'un nouveau segment, à gauche; affichage 3D du nouveau segment, à droite.

Modes de dessin pour la cartographie 3D

Le mode polygone 3D permet de cartographier des lignes 3D (fissures, interstices, etc.) ainsi que des zones 3D. Par conséquent, le polygone dessiné est intersecté avec le modèle de surface et son résultat est stocké en tant qu'objet 3D individuel (fig. 13).

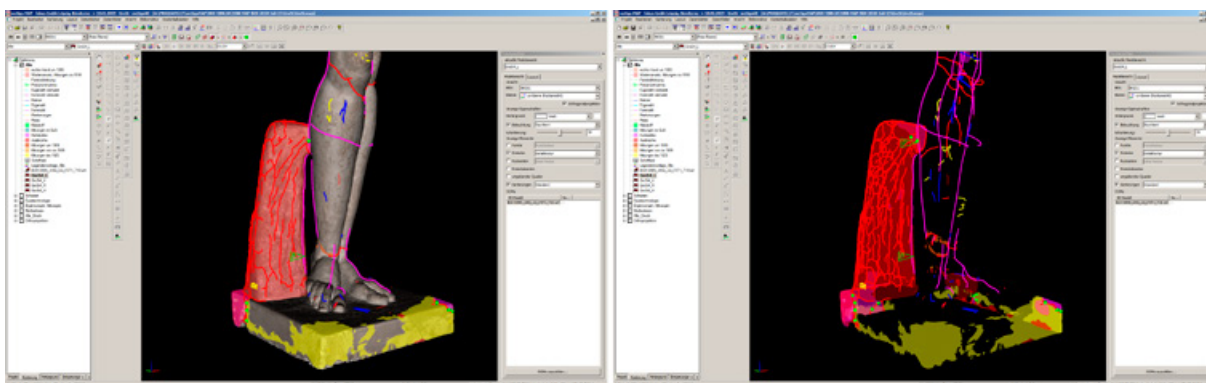


Figure 13 Affichage 3D avec modèle de surface texturé et éléments cartographiés, à gauche; affichage 3D d'éléments cartographiés sans modèle de surface, à droite.

Les outils de coupe pour la cartographie de zone sont disponibles de la même manière que pour la cartographie 2D. Ils permettent d'étendre ou de réduire ultérieurement les zones cartographiées, ainsi que de découper les zones adjacentes en fonction des besoins. En outre, des symboles vectoriels ou des éléments de texte peuvent être utilisés.

La longueur et la surface des polygones 3D sont toujours calculées pour le mètre (fig. 14).

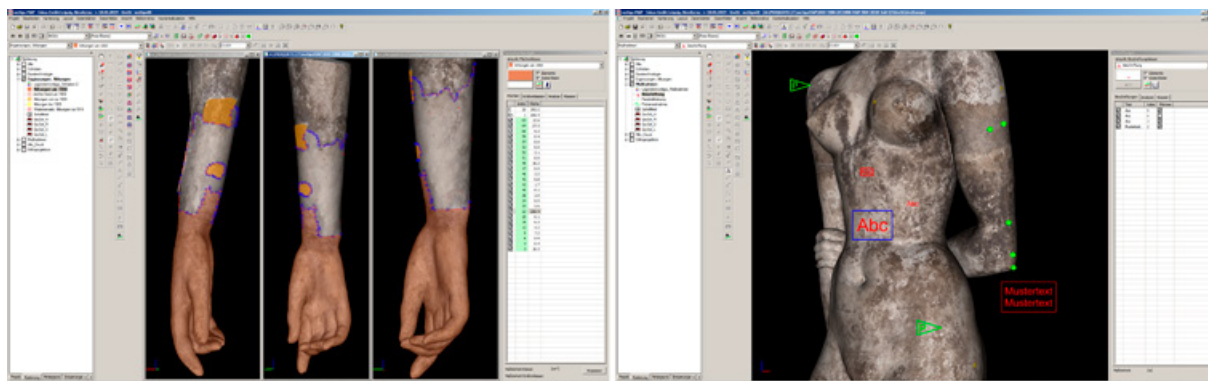


Figure 14 L'affichage 3D montre le découpage personnalisé des zones adjacentes, à gauche; l'affichage 3D montre les symboles vectoriels et les textes pour la cartographie, à droite.

Les lignes de délimitation et le remplissage des zones transparentes peuvent être affichés dans la représentation 3D. Les hachures n'apparaissent que dans les vues du modèle 2D (fig. 15).

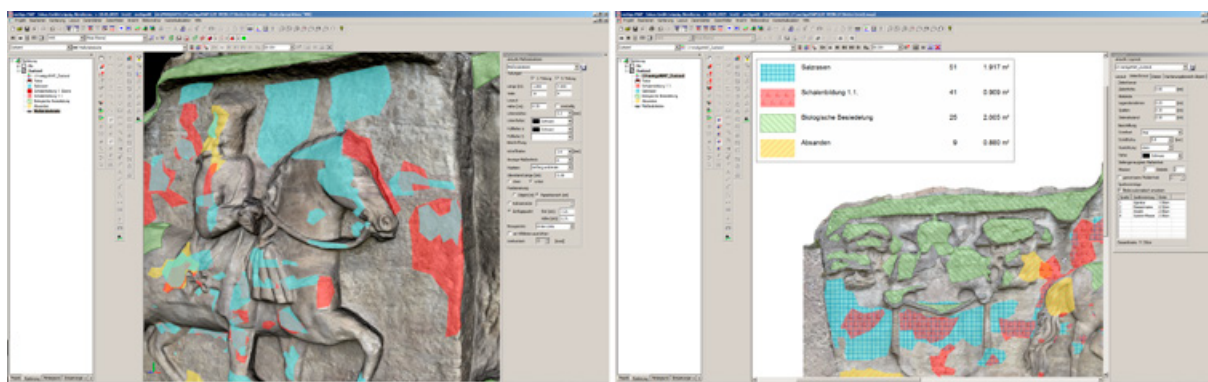


Figure 15 Affichage 3D de la cartographie d'une zone avec remplissage transparent, à gauche; hachures sur la vue du modèle 2D avec projection orthogonale et légende, à droite.

Impression à l'aide de vues de modèles 2D

Il est possible de créer une vue du modèle 2D à l'échelle de l'affichage 3D choisi, qui sera utilisée pour l'impression 2D (fig. 16). Les options d'affichage telles que la qualité de la texture, l'ombrage, l'échelle, la position et le mode de projection (orthogonal/perspective) peuvent être définies.

La création automatisée du « déroulement de la vue du modèle » (intérieur/extérieur; 4/6 vues) permet un affichage complet de l'objet (fig. 16 et 17).

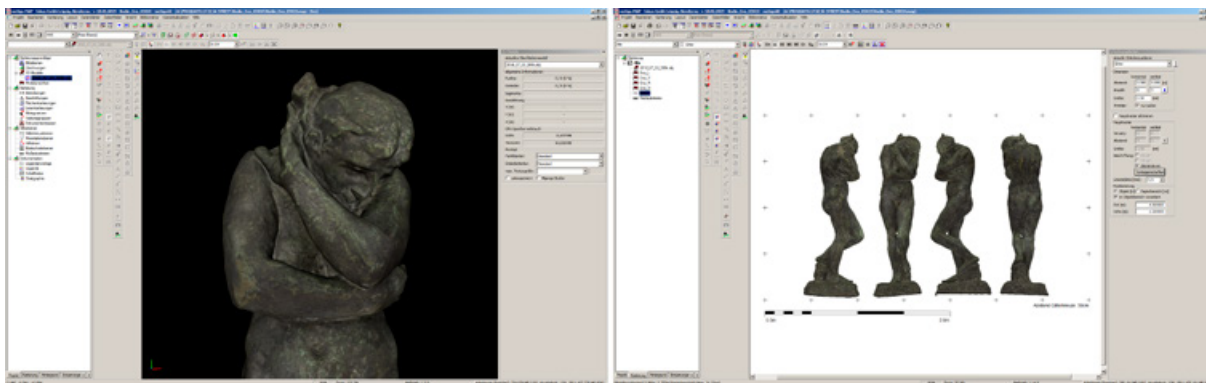


Figure 16 Affichage 3D d'un modèle de surface texturé, à gauche; déroulement extérieur fidèle à l'échelle de quatre vues du modèle par projection orthogonale, à droite.

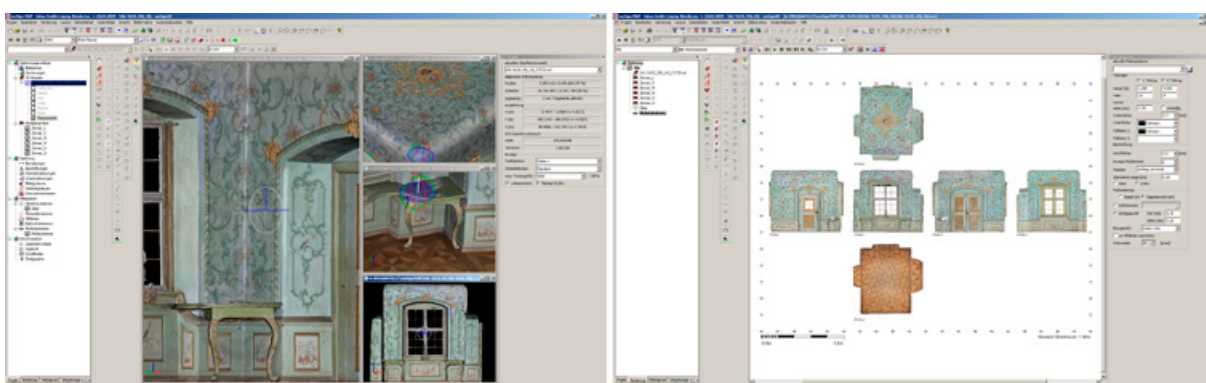


Figure 17 Affichage 3D du modèle de surface texturé de la pièce, à gauche; déroulement intérieur à l'échelle réelle de six vues du modèle avec projection orthogonale, à droite.

Le plan peut être complété par l'insertion de croix de quadrillage, d'une barre d'échelle et d'un cartouche.

L'affichage 3D peut être contrôlé, comme les vues du modèle 2D, à l'aide de groupes de graphiques et d'une légende de groupe (fig. 18).

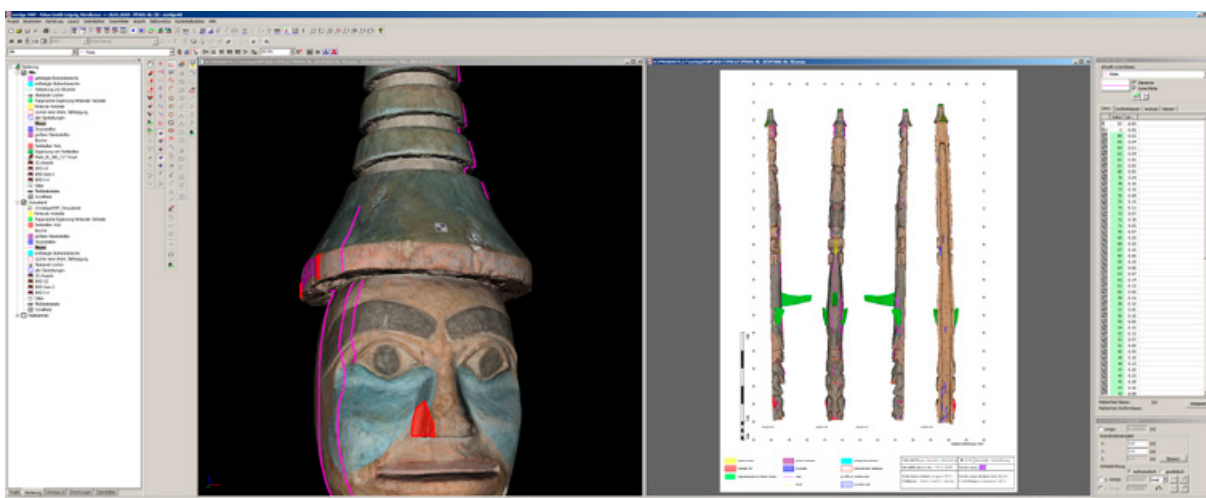


Figure 18 Affichage 3D du modèle de surface texturé du totem avec cartographie : déroulement extérieur à l'échelle réelle de quatre vues du modèle avec projection orthogonale, à gauche; cartographie et légende de groupe, à droite.

L'impression ou la sortie d'image à l'échelle réelle s'effectue de la même manière que pour les graphiques 2D. Actuellement, la cartographie 3D ne peut être transmise qu'en tant que projet de cartographie complet avec le logiciel de visualisation gratuit.

La mesure des quantités est déterminée automatiquement sur la base du modèle de surface à l'échelle. Ainsi, la quantité, la longueur et la surface des éléments cartographiés sont calculées immédiatement et la somme peut être affichée dans la légende pour chaque classe. Si la surface totale de l'objet a été relevée, un pourcentage peut également être indiqué pour chaque classe de graphique dans la légende (fig. 19).

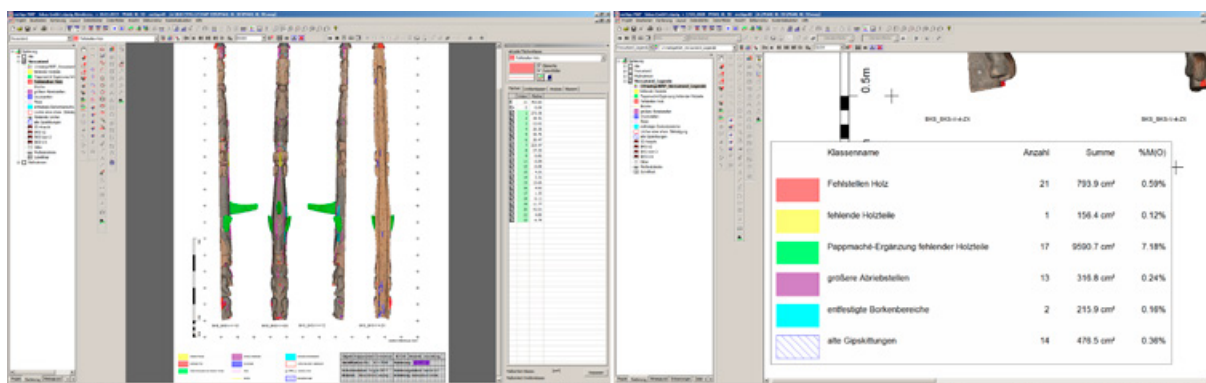


Figure 19 Affichage en 3D du modèle de surface texturé du totem avec cartographie, à gauche; légende de la cartographie incluant le relevé quantitatif, à droite.

Développement actuel

Alors que les plans en 2D peuvent être combinés de manière cohérente pour une évaluation simultanée, il n'existe actuellement pas d'outils appropriés pour ce flux de travail sur une surface en 3D. Il existe actuellement des développements qui permettent une nouvelle texturation d'un modèle de surface, ainsi que la gestion de plusieurs textures sur un modèle de surface. Par conséquent, l'évaluation d'un modèle de surface à textures multiples est possible (fig. 20).

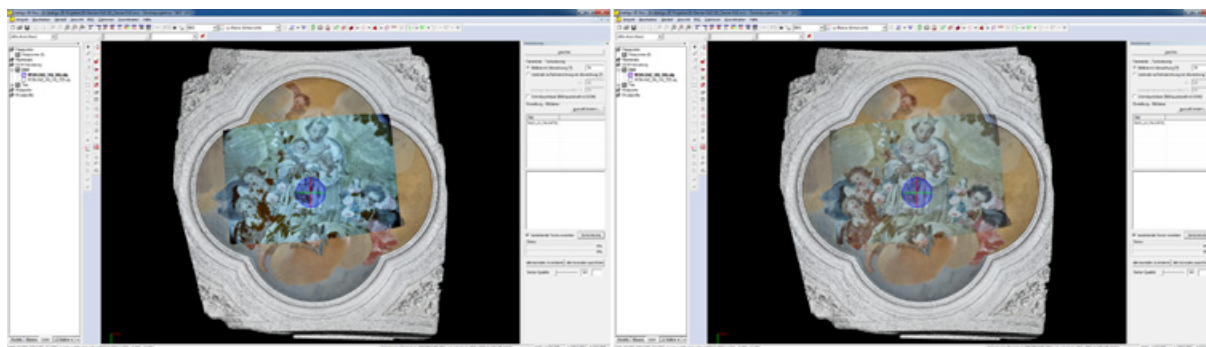


Figure 20 Modèle de surface multi texturé avec une image de lumière du jour et une image de lumière UV : image de lumière UV avec une opacité de 100 %, à gauche; image de lumière UV 3D avec une opacité de 50 %, à droite.

Conclusion

Les procédures décrites permettent de documenter à l'échelle réelle des artefacts en reproduisant fidèlement leur texture. L'objectif est de répondre aux exigences d'une cartographie pour la restauration et d'une qualité photographique adaptée à la peinture murale, et cela même pour les textures des modèles 3D. Les coûts du matériel nécessaire baissent significativement. Le passage de l'évaluation bidimensionnelle à l'évaluation tridimensionnelle est donc désormais possible, en fonction des exigences du projet.

Références bibliographiques

Brumana R., Galeazzo G. (1992), « St. Marcus' Basilica in Venice. An apply of image projection on a dome », dans Atkinson K.B., *XVII ISPRS Congress Technical Commission V: Close-Range Photogrammetry and Machine Vision*, Whittles Publishing, Washington, D.C., Etats-Unis, p. 786-793.

Luhmann T. (1978), *Nahbereichsphotogrammetrie – Grundlagen, Methoden und Anwendungen*. Verlag für Bauwesen, Berlin, Allemagne, 798 p.

Pietschner W., Regensburger J., Rüger K. (2003), *Photogrammetrie. Verfahren und Geräte*, Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg, Allemagne.

Siedler G., Sacher G. (2006). « Photogrammetrische Auswertung historischer Fotografien und Messbilder », dans *Führerauftrag Monumentalmalerei, Veröffentlichungen des ZIKG, Band XVIII*, Cologne, Böhlau Verlag GmbH & Cie, p. 189-198.

Siedler G., Vetter S. (2011). « Automated 3D-object documentation on the base of an image set », dans *Proceedings of the 13th International CIPA Symposium, Prague, République Tchèque* [en ligne]. Disponible sur : (PDF) [Automated 3D-Objectdocumentation on the Base of an Image Set](#) (consulté le 16/3/2025).

Siedler G., Vetter S. (2016), « Modern Methods of documentation – Photogrammetric evaluation of historic images », dans ICOM-CC (éd.), *Actes de l'ICOM CC - Interim Meeting of the Wood, Furniture, and Lacquer & the Sculpture, Polychromy, and Architectural Decorations Working Groups*, Potsdam, Allemagne [en ligne], 11 p. Disponible sur : [Siedler-Vetter_ICOM-CC-2016](#) (consulté le 16/3/2025).

Siedler G., Vetter S. (2018), « Qualitätskriterien bei der Ausschreibung von photogrammetrischen Leistungen », dans Petitz G. et al (éd.), *Natursteinsanierung Stuttgart 2018 – Neue Natursteinrestaurierungsergebnisse und messtechnische Erfassungen sowie Sanierungsbeispiele*, Stuttgart, Allemagne, Fraunhofer IRB Verlag, Seiten, p. 7-22.

Stephani M. (1992), « Object Modelling and Visualization in Architecture », dans *XVII ISPRS Congress Technical Commission V: Close-Range Photogrammetry and Machine Vision*, Washington, D.C., Whittles Publishing, p. 821-824.

Les auteurs

Gunnar Siedler Ingénieur

Sebastian Vetter Ingénieur

Nicolas Martin-Beaumont Photographe et réalisateur. Fokus GmbH Leipzig, Lauchstädter Str. 20, 04229 Leipzig, Allemagne, home@fokus-gmbh-leipzig.de