

LA NUMERISATION 3D DU PONT DE SOMMIERES

*B. CHAZALY*⁴

ATM3D est un bureau d'étude de topographie, nouvellement implantée à Congénies dans le Gard. La société est spécialisée dans le développement et la mise en œuvre de procédés innovants de levés topographiques et de mesures géométriques. L'une de ces technologies dont ATM3D s'est fait une spécialité est le scannage 3D ou lasergrammétrie. Nous consacrons depuis plusieurs années une part importante de notre activité au domaine du Patrimoine Culturel. Cependant, le champ d'applications de ces technologies touche tous les secteurs de la mesure.

La lasergrammétrie permet d'enregistrer la géométrie d'un monument à un degré de finesse, de densité et de précision jamais

⁴ Ingénieur Géomètre Topographe, cogérant ATM3D.

Membre du comité international pour la documentation du patrimoine culturel (comité ICOMOS / ISPRS).

atteint jusque là. Cette technologie en pleine évolution, nécessite la mise au point de logiciels informatiques spécifiques. Dans le cadre de nos travaux de recherche et développement, un projet de fin d'études d'ingénieur a été piloté par la société, en collaboration avec l'Institut National des Sciences Appliquées de Strasbourg. Sandra Berni, élève ingénieur géomètre topographe, a pu tester nos derniers développements informatiques sur le pont de Sommières.

Cette opération a nécessité une campagne de mesures en mai 2005 sur l'édifice, campagne de levé au scanner 3D et prises de vues à orthorectifier. Les premiers résultats ont permis de produire les modèles 3D de précision centimétrique et de mettre en relation le pont et les arches visibles place des Docteurs Dax.

1. Des plans, des cartes, pour quoi faire ?

Afin d'appréhender au mieux notre patrimoine culturel, et d'apporter les informations préalables aux réflexions et actions menées dans ce domaine, les méthodologies mises en place par les différents donneurs d'ordres font appel à de nombreuses techniques (études bibliographiques, bases de données documentaires, photographies, ...). La complexité de la géométrie et de l'environnement de l'objet culturel impose naturellement de faire appel aux techniques de mesure et de représentation graphique. Dans ce contexte, les nouvelles technologies de relevés géométriques et les progrès des traitements informatiques livrent de nouveaux outils d'études.

Connaître et faire connaître.

Un inventaire est indispensable pour permettre une prise de conscience de notre environnement culturel. Le ministère de la Culture, au travers de ses directions régionales, parfois associé aux

collectivités territoriales, tente ainsi de collecter et d'organiser un maximum de données nécessaires au progrès de la connaissance de notre Patrimoine, et à la reconnaissance de ses richesses. Cette immense oeuvre de description produit des éléments documentaires : texte descriptif, photographie, cartographie et représentation graphique. Le relevé de vues en plan, élévation ou coupe est ainsi le principal moyen de description d'un édifice.

Etudier et comprendre.

Le relevé précis, en plan ou en élévation, offre d'abord une vision générale de l'objet à étudier, vision difficile à acquérir directement sur le terrain ou face au monument. L'étude des documents produits permet ensuite de repérer les éléments révélateurs de l'histoire du monument étudié. La géométrie, les alignements, les brisures d'axes, la dimension et la structure des pierres, la présence d'éléments divers (trous de boulin, enduits...), toutes ces informations, souvent caractéristiques, doivent être relevées et mesurées. Elles témoignent de l'histoire et de l'évolution d'un bâtiment ou d'un site, des techniques de construction alors utilisées, voire de la vie quotidienne des occupants qui s'y sont succédés. Elles autorisent parfois la reconstitution virtuelle d'un monument à partir de ses vestiges.

Conserver.

L'établissement de relevés oriente et facilite les travaux à entreprendre pour restaurer un monument. Préalablement, les informations tirées de l'étude du monument peuvent être exploitées pour assurer une mise en œuvre aussi fidèle que possible. Ensuite, le relevé permet de fournir des informations utiles à la gestion de la restauration : définition des parties à restaurer, chiffrage du coût des interventions, conception des échafaudages, etc. Par ailleurs, ces mesures permettent d'évaluer

les désordres apparus sur un monument (fissures, mouvements) et de les suivre dans le temps afin de prévoir et d'organiser les travaux de consolidation nécessaires.

2. Des outils de plus en plus perfectionnés.

Au delà du ruban décimètre et du plomb optique, les techniques professionnelles de mesures mises en œuvre dans le domaine du Patrimoine Culturel sont nombreuses.

Le levé tachéométrique.

C'est la méthode de levé la plus classique. Elle utilise des « stations totales », appareils permettant la mesure et l'enregistrement d'angles et de distance, que quelques calculs transforment en coordonnées. Ce sont des appareils que vous pouvez parfois apercevoir au bord d'une route, lorsqu'un géomètre en fait le levé. Depuis environ 10 ans, ces appareils utilisent un laser assez puissant pour se dispenser de réflecteur lors de la mesure de la distance, permettant de viser des points visibles mais inaccessibles.

Grâce aux coordonnées obtenues, les points visés sont reportés sur un plan numérique. En reliant ces points par des lignes ou des courbes, on redessine petit à petit sur ordinateur l'objet relevé.

Cette méthode permet par exemple de fournir avec précision et à moindre coût le plan général d'un site archéologique sur lequel l'archéologue pourra caler ses relevés pierre à pierre. Elle peut être employée pour la production de coupes horizontales et verticales de monuments.

La photogrammétrie.

Cette technique permet d'obtenir des coordonnées précises

à partir de photographies stéréoscopiques. En photographiant un objet sous différents points de vue, il est possible d'en reconstituer la forme, la dimension et la position. Les photos utilisées doivent avoir certaines caractéristiques (dimension du négatif ou résolution du capteur, optique avec peu de distorsion) et sont prises généralement avec un recouvrement stéréoscopique de 60%.

Des procédures relativement complexes permettent de déterminer mathématiquement et très précisément les caractéristiques de l'appareil photo (distance focale, centre de projection, distorsions) et les conditions de prise de vues (position et orientation de l'appareil photo lors de chaque prise). Avec ces paramètres, et en pointant l'image d'un point dans chacune des photos formant le couple stéréoscopique, on obtient les coordonnées terrain du point visé. Cette opération peut être exécutée sur un appareil spécial, appelé « *restituteur* ». Les derniers développements permettent une réalisation complète sur ordinateur, à l'aide de logiciels spécifiques et à partir de photos numériques.

Ensuite, comme lors du levé tachéométrique, les points restitués sont reportés sur plan et reliés par des courbes pour redessiner l'objet photographié.

Si cette méthode est assez onéreuse, elle est cependant très productive, permettant par exemple le relevé tri-dimensionnel de zones très étendues (photogrammétrie aérienne) ou de grands monuments (photogrammétrie terrestre). Elle permet à l'inverse la restitution fine d'objets relativement petits à partir de prises de vues rapprochées (statues, reliefs).

L'orthophotographie.

C'est une technique en plein développement, dérivée de la photogrammétrie et souvent moins coûteuse. Lorsqu'on prend un

objet en photo, l'image obtenue n'a pas les caractéristiques géométriques d'un plan : l'objet est déformé par la perspective, les imperfections de l'objectif utilisé et le relief de l'objet lui-même. Grâce aux paramètres utilisés en photogrammétrie, et à l'aide d'un modèle numérique de la surface de l'objet, un programme informatique va replacer chaque point de la photographie à sa position géométrique exacte. Cette opération s'appelle l'orthorectification. Elle aboutit à la production d'une image qui conserve toute la richesse d'une photographie, et qui possède maintenant la précision d'un plan de géomètre. L'objet n'est pas redessiné : c'est son image photographique qui est directement utilisée. L'utilisation de la couleur contribue à renforcer cette richesse d'information.

De plus, les outils de traitement d'images permettent d'agir sur le document numérique, notamment sur le contraste pour améliorer l'image et faire ressortir les détails qu'elle renferme. Enfin, tous les logiciels d'infographie permettent de superposer des couches d'informations vectorielles à l'orthophotographie. Il est par exemple possible de superposer les courbes de niveau issues d'un modèle numérique, de digitaliser les contours de chaque élément visible, de mesurer des distances ou des rayons de courbures et d'ajouter des commentaires.

La numérisation 3D.

C'est une activité qui révolutionne les techniques de mesures et que nous allons maintenant détailler.

3. Le relevé par scanner laser 3D.

La lasergrammétrie est une nouvelle technologie qui

bouleverse les méthodes de relevé. Elle utilise une nouvelle génération d'instruments de mesure, les scanners 3D, capables d'enregistrer plusieurs millions de points en trois dimensions en quelques minutes, avec une précision de quelques millimètres et une portée dépassant pour certaines plusieurs centaines de mètres. Le saut technologique réside dans la capacité de ce type d'appareil à collecter un très grand nombre d'informations très rapidement et à distance.

Selon les appareils, le champ de numérisation peut être cylindrique (360° horizontal et limites verticales, 80° par exemple), sphérique (360° horizontal et 180° vertical) ou ne couvrir qu'une fenêtre fixe (capteur non rotatif).

Quel que soit le type de capteur utilisé, le résultat d'une opération de numérisation est avant tout un fichier numérique contenant une série de coordonnées géométriques (X, Y, Z), constituant ce qu'on appelle un « *nuage de points* » 3D. Les capteurs peuvent aussi enregistrer l'intensité de réflexion du signal, qui peut varier selon le type de matériau numérisé. Enfin, il est possible de coupler les capteurs laser à des appareils photo numériques calibrés. On peut alors attribuer l'information de la couleur à chaque point du nuage.

Le nuage de points 3D, l'intensité de réflexion et les prises de vues numériques calibrées et géoréférencées, issus d'une campagne de relevé, sont alors les informations de base, vierges de tout traitement, pouvant constituer une archive 3D brute du site ou du monument numérisé, aux critères de résolution (densité de points au mètre carré et résolution des prises de vues numériques) et d'accessibilité visuelle près.

Développée pour l'industrie pétrochimique et nucléaire, puis appliquée au Patrimoine culturel (Grotte Chauvet, Colosse d'Alexandrie), cette technique assure la production et l'archivage de véritables clones numériques. ATM3D l'a utilisée pour

numériser plusieurs sites prestigieux comme les colonnes de la grande salle hypostyle de Karnak à Louxor en Egypte, les élévations des Thermes Antiques de Cluny à Paris, le château de Chinon ou encore les ruines du théâtre antique récemment découvert à Aix-en-Provence.

Les apports de cette nouvelle technologie sont :

- un volume d'information en 3D d'une extrême densité.
- une grande rapidité d'acquisition : plusieurs millions de points peuvent être numérisés en quelques heures.
- la visualisation en 3D in situ des données acquises.
- échelle d'acquisition 1/1 : les distances peuvent être mesurées directement en 3D dans le nuage de points.
- l'assurance de ne commettre aucun dommage sur l'objet pendant le relevé : les mesures se font sans contact physique, à l'aide d'un laser de classe I (eye safety : aucun danger pour l'œil).
- la possibilité d'accéder virtuellement à des parties inaccessibles physiquement : les mesures au laser sans réflecteur peuvent être réalisées à plusieurs centaines de mètres du monument.
- une plus grande liberté d'exploitation des mesures. Le relevé devient plus objectif et se rapproche du document photographique : l'analyse, l'observation minutieuse et l'extraction de l'information se faisant désormais en aval, une fois le relevé réalisé.
- une documentation révolutionnaire, un archivage 3D des monuments et sites scannés : les données acquises pourront être exploitées avec précision même si l'objet scanné venait à être endommagé ou détruit ; elles constituent aussi un enregistrement fidèle et précis de l'état d'un site avant travaux.

4. Le Pont de Sommières.

L'édification au premier siècle du Pont Tibère a nécessité la construction de 17 arches sur une longueur de près de 200m. Les romains avaient sans doute conscience des capacités du Vidourle à réoccuper régulièrement son lit majeur et l'ouvrage a été ainsi dimensionné pour laisser libre cours aux crues du fleuve. Au Moyen Age, la ville est venue occuper peu à peu ce lit majeur. Aujourd'hui, seules 7 arches sont visibles au dessus du fleuve, les 10 autres ayant été absorbées par l'urbanisation et servant de caves. Quelques éléments sont toutefois visibles, notamment en rive gauche sous les allées voûtées de la place des Docteurs Dax (place du Marché).

La mise en œuvre d'une opération de numérisation 3D sur le pont avait donc un triple intérêt :

- Réaliser un relevé détaillé pierre à pierre du pont, y compris dans ses parties les moins accessibles physiquement,
- Mettre en relation toutes les parties visibles du pont,
- Replacer le pont dans son environnement urbain.

4.1. La phase d'enregistrement.

Nous avons mis en œuvre un scanner 3D autrichien, le Riegl LMS Z 420i. C'est le même appareil qui a numérisé les élévations des temples de Karnak à Louxor. En mai 2005, ce sont alors plus de 50 millions de points qui ont été enregistrés sur le pont et dans son environnement immédiat. Dix-neuf points de vue différents auront permis au scanner de numériser en 3D et de photographier toutes les surfaces visibles sur le Vidourle, la chaussée, les trottoirs sur le pont, et l'intégralité de l'allée Est sous les arcades de la place du Marché. Le tout a été calé au millimètre

sur un réseau de points topographiques aimablement fournis par Philippe Vachez, géomètre expert à Sommières.

L'opération aura mobilisé un ingénieur et un technicien pendant 3 jours.

4.2. Les traitements.

Avec ce type de technologie, les traitements possibles sont nombreux.

Cartographie filaire. Le résultat peut paraître identique à celui d'un relevé photogrammétrique ou tachéométrique : restitution filaire, profils, coupes et courbes de niveaux. L'apport de la lasergrammétrie réside dans la rapidité d'acquisition et surtout dans la densité de l'information acquise. Le produit cartographique est extrait directement du nuage de points : les lignes cartographiées collent à la réalité au centimètre près. Les coupes extraites peuvent être nombreuses et générées de manière quasi-automatique à partir de tranches isolées du nuage.

Nous avons extrait un plan masse de l'emprise du pont, et une série de fins profils verticaux équidistants dont la cartographie révèle le relief du pierre-à-pierre de la face amont du pont.

Orthophotographie. La richesse d'une orthophotographie est indéniable puisqu'elle restitue tous les éléments visibles sur le terrain. La production de document orthophotographique était cependant limitée par la connaissance généralement peu précise du relief de l'objet à représenter. Le traitement de mesures lasergrammétiques permet de produire un modèle numérique spécialement généré pour corriger les photographies et replacer chacun des pixels à sa position exacte dans l'orthophotographie. L'orthorectification est alors d'une extrême précision et peut gérer les prises de vues d'objets dont l'image est très déformée par le relief.

Une vue orthophotographique a été générée sur l'élévation

amont du Pont. Elle a été calée sur un fond cartographique intégrant l'environnement immédiat de l'élévation (quais, Tour de l'Horloge) et des repères altimétriques dont le niveau de la crue de septembre 2002. Cette vue sera prochainement complétée par la restitution orthophotographique de l'élévation visible sous les arcades de la place des Docteurs Dax dont la fameuse 5^{ème} arche, et par le profil complet de la rue Marx Dormoy (prolongement du profil du pont).

Génération de modèles surfaciques 3D. Certains logiciels de traitement permettent de relier les points d'un nuage acquis au scanner par des triangles. Le résultat est un modèle maillé tridimensionnel, une véritable peau numérique qui permet de reconstituer la géométrie de la surface numérisée. La densité des triangles est équivalente à celle des points acquis et le modèle généré représente une information numérique très volumineuse et lourde à gérer. Des outils permettent d'alléger la taille du modèle, en fusionnant par exemple les triangles tout en respectant certains critères fixés par l'opérateur, comme la tolérance de simplification. Dans la mesure où la densité du nuage de points est suffisamment importante et homogène, le modèle maillé peut couvrir l'objet numérisé dans sa totalité. On dispose alors d'une archive 3D de l'objet, que certains qualifient même de clone numérique. De cette archive peut ensuite être extraite n'importe quelle information géométrique : coordonnées de points particuliers, distance, pente, rayon de courbure, brisure d'axe, coupe. L'archive peut aussi être texturée afin d'ajouter l'information de la couleur. Elle peut être exportée dans un format numérique pris en charge dans des machines à commandes numériques, pour la réalisation de maquettes en plâtre ou en résine.

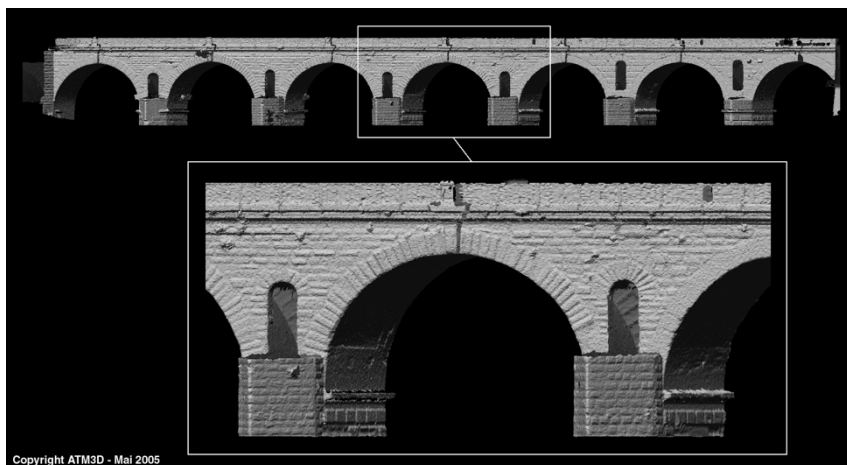
Deux modèles 3D ont été calculés : l'un sur le pont (faces amont et aval, arches, chaussée) et l'autre sur l'élévation visible place du Marché. Ces deux modèles sont d'une précision telle que

le relief de chaque pierre est restitué en 3D.

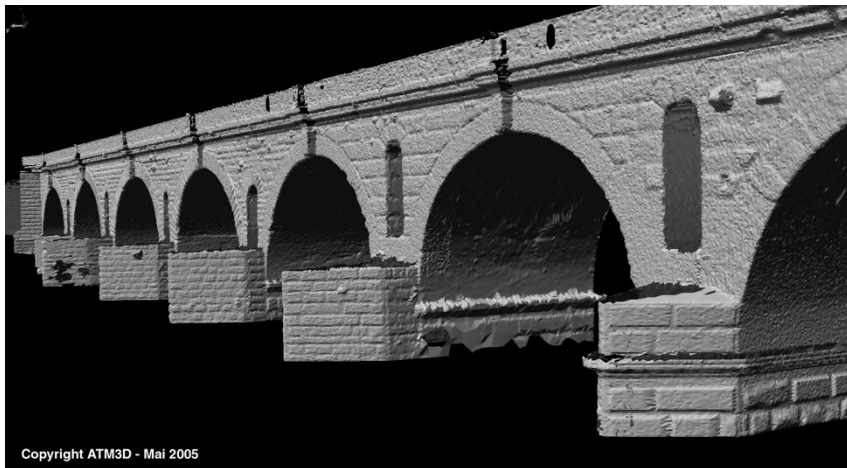
Auscultation 3D. Le traitement consiste à comparer deux séries de mesures, pour détecter et comparer les mouvements d'un monument. Les résultats d'une auscultation s'appuyaient jusqu'à présent sur la mesure régulière de quelques cibles repères. Entre ces cibles, l'information était extrapolée. La lasergrammétrie apporte une information dense, pour ne pas dire continue, sur la manière dont une surface bouge, gonfle, s'affaisse. Elle permet aussi de comparer des mesures à un modèle théorique, ou de dresser des bilans volumétriques précis. Dans le cas du Pont de Sommières, il sera possible de comparer le modèle 3D acquis en mai 2005 à une nouvelle série de mesures, pour caractériser des désordres consécutifs, un nouvel épisode exceptionnel de crue par exemple.

4.3 Les premiers résultats.

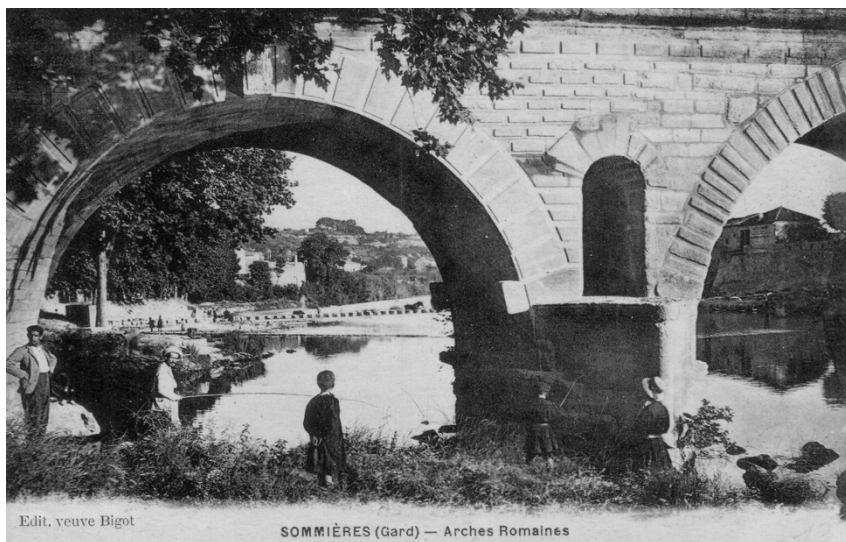
Les modèles 3D étant calés dans le même système de coordonnées, nous pouvons mettre en relation les différentes parties numérisées, et faire déjà quelques constats. Ainsi, il est possible de remarquer le parfait alignement de l'élévation des caves avec celle du pont visible. Il est aussi possible de vérifier la relative régularité des arches : en prolongeant horizontalement dans la ville le profil des arches visibles sur le Vidourle, on constate une bonne superposition à la troisième et cinquième arche tant au niveau du rayon de l'arc de cercle qu'à celui de l'équidistance des arches et de leur altitude.



Le pont de Sommières en 3D vu de l'amont et détail d'une arche
Source : ATM3D



Le pont de Sommières en 3D vu de profil (rive droite amont)
Source : ATM3D



Le pont de Sommières. Arches romaines
Source : Collection A. Jeanjean

Nous pouvons aussi confirmer géométriquement l'observation selon laquelle le Vidourle pénètre le cœur de la Ville lorsqu'il dépasse le niveau des ancoules : les sommets des avant-becs et la chaussée sous la cinquième arche sont à la même altitude à quelques centimètres près.

Les ancoules ne sont pas toutes orientées dans la même direction, l'orthophotographie le montre bien. Seul le premier avant-bec situé entre la sixième et la septième arche semble orienté perpendiculairement au pont, les autres étant inclinés vers la rive droite (la seconde ancoule) ou vers la rive gauche (les suivantes). Ces différences d'orientation sont peut-être dues au tracé du Vidourle à l'époque de la construction du pont.

On devine que beaucoup d'information peuvent déjà être tirées des premières restitutions produites. Le travail des ingénieurs d'ATM3D consiste à compléter cette documentation à partir des nombreuses mesures acquises sur le monument et à affiner toutes les caractéristiques géométriques qu'il est possible d'extraire. En ce qui concerne l'interprétation des restitutions, c'est l'affaire d'autres spécialistes.

5. Conclusion.

La profession de géomètre évolue rapidement au rythme des progrès techniques (informatique, optronique, mécatronique). Pour peu qu'elle adapte sa prestation aux spécificités du Patrimoine, elle est à même de contribuer efficacement à son étude et à sa conservation.

Les documents numériques générés sur le Pont de Sommières permettent une meilleure appréhension du monument, offrant une vision à la fois plus générale de ses élévations et plus détaillée de son architectonique.

Il reste à produire des documents cartographiques plus complets : orthophotographie de toutes les élévations visibles (y compris les parties visibles dans les caves de chaque côté du Vidourle), et esquisses des immeubles et constructions environnantes. Au delà de leur utilité pour l'étude archéologique et architecturale, ces documents auront aussi un fort potentiel didactique. Ils permettront de replacer complètement le pont dans son cadre urbain, et d'illustrer par exemple de manière précise l'impact d'une vidourlade sur la ville. Les derniers développements en matière de supports de communication (internet, multimédia, signalétique) peuvent alors garantir une diffusion satisfaisante de cette nouvelle information auprès du grand public.