

Confrontation de la lasergrammétrie aux techniques de relevé conventionnelles et développement d'outils numériques pour la restitution architecturale

A. Fuchs, E. Alby, R. Begriche, P. Grussenmeyer, J-P. Perrin

MAP-CRAI: Centre de recherche en Architecture et Ingénierie - U.M.R. 694 MAP CNRS
2, rue Bastien Lepage 54001 Nancy Cedex - Tel: 03 83 30 81 46
email : fuchs@crai.archi.fr

MAP-PAGE Institut National des Sciences Appliquées, U.M.R. 694 MAP CNRS
24 Bd de la victoire, 67084 Strasbourg, France

Résumé

Dans le cadre d'une campagne de relevé de l'esplanade du Peyrou et de son château d'eau, à Montpellier, différentes techniques de mesure sont mises en œuvre : relevé au tachéomètre des points de contrôle, photogrammétrie, stéréophotogrammétrie et acquisition au scanner laser 3D. Le premier objectif de ce travail consiste en une mise en adéquation de l'élément à relever et de la technique à employer, il s'agit d'une démarche pragmatique fondée sur l'expérience des opérateurs et les caractéristiques propres à chaque technique. Les champs d'application des méthodes de relevé ainsi que leurs limites conduisent à jouer de leur complémentarité, tant au niveau de la précision de la mesure que de la nature des informations recueillies. La mesure simultanée d'un élément architectural par différents appareils permet d'en établir une comparaison raisonnée et par conséquent il devient possible d'évaluer le positionnement du relevé laser 3D par rapport aux autres techniques d'acquisition. Le second objectif se retrouve dans le traitement des données, en effet la finalité de cette campagne de mesure consiste à obtenir un modèle numérique complet du site. Ceci implique un processus complexe de traitement des données collectées par le laser pour aboutir à un modèle Tel Que Construit (TQC), qui représente une synthèse des informations recueillies et jugées pertinentes pour une représentation. La constitution de ce modèle s'inscrit dans une démarche de recherche d'outils numériques facilitant le travail de l'opérateur lors de cette opération qui demeure peu automatisable. Ce travail regroupe et compare un ensemble de techniques d'acquisition, ce qui permet d'établir des comparaisons méthodologiques et matérielles, mais s'intéresse également aux conditions de traitement des données et à la constitution d'un modèle numérique cohérent et exploitable.

Mots Clés : Lasergrammétrie, photogrammétrie, conservation de patrimoine architectural, modèle 3D

Abstract: "Confrontation of laser scanning with conventional surveying techniques and development of digital tools for the architectural restoration"

During the survey campaign of the Peyrou esplanade and its water tower, in Montpellier, various methods were implemented: theodolite, photogrammetry, stereophotogrammetry, and 3D laser scanner acquisition. The first objective of this work consists of an adjustment between the element to measure and the technique to employ. This is a pragmatic approach based on the operators' experience and the specific features of each technique. The application field of the survey methods as well as their limits leads us to make use of their complementarities, both for measurement precision and for the nature of the collected information. The simultaneous measure of an architectural element by various devices allows to establish a reasoned comparison between them and consequently it becomes possible to estimate the positioning of the 3D laser scanner survey in connection with the other acquisition techniques. The second objective is about data processing; indeed the aim of this surveying campaign consists in obtaining a complete digital model of the site. This implies a complex data processing process resulting in an As Built model, which represents a synthesis of the information collected and judged relevant for the representation. The building up of this model takes its place in a research for digital tools facilitating the work of the operator during this process, which remains difficult to automate. This work thus groups together and compares a set of surveying methods, which allows to establish methodological and material comparisons, but handles also the data processing conditions and the building up of a coherent and exploitable digital model.

Keywords: 3D laser scanning, photogrammetry, architectural heritage conservation, 3D model

1. INTRODUCTION

1.1. Initiative du travail

Dans le cadre des travaux de modélisation 3D de la ville de Montpellier, une visualisation 3D photoréaliste de l'esplanade du Peyrou, de son château d'eau ainsi que du cadre bâti environnant sont envisagés. L'usage qui sera fait de cette modélisation servira à illustrer un plan numérique de la ville à vocation touristique. L'objectif du travail consiste à permettre une visualisation 3D photoréaliste du château d'eau du Peyrou et des objets

bâti de l'esplanade qui l'entoure. Le service envisagé s'inscrira dans une série de plans à différentes échelles où l'on pourra venir « cliquer » sur un icône afin d'obtenir une visualisation 3D du Peyrou.

1.2. Objectifs

Les objectifs assignés à ce travail sont multiples car ils relèvent de l'acquisition de données mais également de leur mise en œuvre sous forme de modèles numériques. Les données seront présentées dans un Système

d'Information Géographique (SIG), différents niveaux de zoom sont prévus selon la nature des données produites.

D'autres objectifs se retrouvent dans l'aspect expérimental de cette campagne de mesure. En effet la collecte de données mais surtout la réalisation de modèles numériques 3D font actuellement l'objet de travaux de recherche. Le relevé du château d'eau du Peyrou représente une possibilité d'expérimentation et de validation de ces travaux.

1.3. Equipes

La campagne de relevé a nécessité un travail de collaboration entre deux équipes de l'UMR 694 MAP, le CRAI (Centre de Recherche en Architecture et Ingénierie) et le PAGE (Photogrammétrie Architecturale et Géomatique) avec le service d'information géographique de la ville de Montpellier, dirigé par F. Perdrizet. L'équipe du CRAI, J-P. Perrin, V. Marchal et A. Fuchs, étant en charge des relevés au scanner laser 3D, tandis que l'équipe du PAGE, P. Grussenmeyer, S. Guillemain, E. Alby, s'occupait des autres types de relevés : photogrammétrie, stéréophotogrammétrie, tachéomètre électronique.

Le traitement des données collectées sur le site a bénéficié ensuite des compétences respectives de chaque laboratoire. Le caractère pluridisciplinaire de la campagne de relevés a ainsi permis aux différents acteurs de comparer leurs techniques d'acquisition mais surtout les procédés mis en œuvre dans la phase ultérieure de l'exploitation des données.

2. Contexte historique et géographique

L'esplanade du Peyrou domine le centre historique de Montpellier. Elle comporte quelques éléments remarquables : une statue équestre de Louis XIV, un château d'eau ainsi qu'un aqueduc servant à alimenter ce réservoir d'eau. Enfin un arc de triomphe, porte de la ville, ferme la promenade.

L'esplanade du Peyrou



Figure 1 : l'esplanade du Peyrou

L'aménagement de l'esplanade du Peyrou s'acheva en 1690, elle fut complétée par l'Arc de Triomphe en 1691 et la mise en place d'une statue équestre de Louis XIV en 1718. La vocation initiale de cette place se retrouve dans

l'affirmation du pouvoir royal de Louis XIV sur ses contemporains. Elle conserve actuellement son rôle de promenade d'agrément pour les habitants de la ville. La partie basse de l'esplanade accueille des jardins et des bassins.

Le château d'eau du Peyrou



Figure 2 : le château d'eau du Peyrou

Le château d'eau du Peyrou domine l'esplanade, il s'agit d'un réservoir d'eau dont le traitement architectural monumental, un temple à colonnes classiques à plan hexagonal, s'explique par sa situation. Un bassin décoratif et des escaliers circulaires dissimulent la partie basse du réservoir tandis que la partie haute est surmontée par le temple lui-même. Ce monument serait l'œuvre de l'architecte Jean Antoine Giral.

L'aqueduc St Clément



Figure 3 : l'aqueduc St Clément

L'aqueduc Saint Clément, conçu par l'ingénieur hydraulicien H. Pitot, transporte l'eau de la source du Lez sur plus de 17km. La partie aérienne de l'aqueduc, longue de 880m, haute de 22m, comporte 236 arches de pierre composées en deux séries superposées : la première constituée de grandes arches supporte la seconde formée de petites arcades. Cette disposition constructive évite au radier reposant sur l'ensemble d'être endommagé par des mouvements de maçonnerie. Initiée en 1753, sa construction s'acheva en 1765.

Ces édifices présentent une architecture classique et constituent un ensemble de forme et de nature hétérogènes. Ils possèdent des caractéristiques idéales pour expérimenter différents dispositifs de mesure. En

effet les modes d'acquisition ainsi que les échelles d'appropriation des appareils mis en œuvre pourront se compléter idéalement. Le château d'eau, quant à lui, fera plus particulièrement l'objet de travaux comparatifs entre les mesures réalisées au scanner laser 3D et les autres modes d'acquisition.

3. L'acquisition et le traitement des données

Historiquement, les bases théoriques des techniques de relevé sont posées dès le XV^{ème} siècle. J.-P. Saint Aubin [AUB92] distingue deux axes de développement. Le premier issu « du miroir de Brunelleschi, du châssis à réseau de Dürer [...] et de la modeste planchette de l'arpenteur pour aboutir à travers la chambre claire de Wollaston à la photographie et la photogrammétrie ». Le second issu « d'Alberti et de son plan de Rome, [...], du carré géométrique et se conclut au XX^{ème} siècle avec le théodolite et le distance mètre laser à mémoire ». Il est intéressant de constater que cette dualité se retrouve en ce début du XXI^{ème} siècle dans les techniques d'acquisition et que les problématiques originelles soulevées par la représentation de l'architecture conservent leur actualité.

3.1. Les caractéristiques des différentes techniques de mesures mises en œuvre

Deux grandes catégories de méthodes de relevés sont mises en œuvre : la photogrammétrie et la lasergrammétrie. Un relevé de la topographie générale du site est également effectué au tachéomètre électronique afin de pouvoir repositionner les relevés effectués sur le site et définir les coordonnées des points d'appui destinées à l'orientation des modèles photogrammétriques.

3.1.1. Photogrammétrie

L'usage de la photogrammétrie pour ce projet paraît approprié pour deux raisons : la photographie fournit des informations dimensionnelles concernant la morphologie de l'objet tout en constituant des sources de textures pour le traitement réaliste de l'aspect final du modèle.

Le matériel de prise de vue était constitué de deux chambres de prise de vue argentiques et deux chambres numériques :

Les chambres argentiques :

- Rolleimetric 35 : c'est un appareil 24x36 avec réseau, qui se caractérise par sa petite taille, ce qui le rend très maniable et permet une rapidité d'intervention. Sa distance principale est de 35mm.
- Wild P32 : la chambre P32 est une chambre de prise de vue utilisée en photogrammétrie terrestre, réputée pour la qualité de ses optiques et sa simplicité d'usage. Elle est utilisée avec un trépied, afin de garantir le positionnement des couples stéréoscopiques. C'est un appareil qui possède un format utile de 60x80, 5 repères de fond de chambre (croix) et 64mm de distance principale.

Les appareils numériques :

- Rollei D507 metric : cet appareil possède une focale fixe et un capteur CCD (2/3 de pouce pour une image de 2552 x 1920 pixels). Sa distance principale est de 7.3 mm. L'ajout d'une lentille additionnelle permet d'obtenir une distance principale fixe équivalente à 5mm.

- Minolta Dimage F100 : il s'agit d'un appareil numérique compact « grand public ». Le Minolta possède un capteur CCD 1/1.8 pouce offrant une résolution qui atteint 2272 x 1704 pixels. Complètement paramétrable, le Minolta offre un mode manuel pour la mise au point, ce qui nous permet de maîtriser la longueur focale en butée (grand angle 7.8mm ou télé-objectif 23.4mm), chaque position nécessitant un étalonnage (distance principale, point principal, dimension du capteur, distorsions optiques). Ce problème ne se pose pas lors de l'utilisation des chambres à focale fixe.

La multiplication des appareils de prise de vue peut surprendre mais notre objectif est de confronter le matériel argentique au matériel numérique. Les trois chambres métriques (Rolleimetric 35, Wild P32, Rollei D507) sont utilisées pour la précision qu'elles offrent, tandis que le Minolta Dimage F100 nous permet de tester les performances d'un matériel standardisé bon marché (associé à PhotoModeler).

Cette campagne a été l'occasion de mettre en œuvre deux techniques de photogrammétrie architecturale : la stéréophotogrammétrie et la photogrammétrie multi-images :

- La stéréoscopie est la première technique employée en photogrammétrie. Deux clichés photographiques d'un même objet, pris à partir de deux points de vue différents procurent un effet spatial (stéréoscopique) de l'objet. La stéréoscopie impose quelques contraintes : le parallélisme des prises de vue, le respect de la base (entre 1/5^e et 1/15^e de la distance à l'objet).

- La photogrammétrie multi-images, moins contraignante pour la prise de vue et la restitution, permet la reconstitution de la troisième dimension par l'usage de plusieurs points de vue différents. Cependant quelques règles doivent être suivies afin d'optimiser la saisie de données : faire des prises de vue dont les axes se rapprochent de 90° pour minimiser les erreurs, produire des images sans masque de l'objet, pour les textures mais aussi chercher le plus de recouvrement possible, éviter les vues avec un fort effet de perspective (la précision varie entre le premier plan et le fond de l'image). On favorisera un minimum de trois images en recouvrement (une première perpendiculaire à l'objet et deux autres perpendiculaires entre elles).

Les caméras numériques ont été utilisées pour les deux techniques tandis que les caméras argentiques n'ont été utilisées que pour faire des couples stéréoscopiques. La technique multi-images s'est développée parallèlement aux appareils numériques, ceux-ci ont été favorisés afin d'éviter de scanner les images, procédure relativement longue et fastidieuse.

3.1.2. Lasergrammétrie

La technologie, les différentes méthodes

D'une manière générale deux grandes techniques d'acquisition utilisent le rayon laser : la télémétrie laser et la triangulation. La télémétrie laser utilise la mesure du temps de parcours d'un rayon lumineux jusqu'à l'objet mesuré. La triangulation, technique employée par le scanner utilisé, est détaillée plus loin. Les dispositifs de mesure sont ensuite associés à un système mécanique afin d'augmenter le nombre de points relevés par balayage. Ces technologies de relevé dépendent des principes de l'optique : les parties cachées ou zones d'ombres imposent la multiplication des prises de vue autour de l'objet relevé. (D'après [GOU99])

Le capteur télémétrique SOISIC

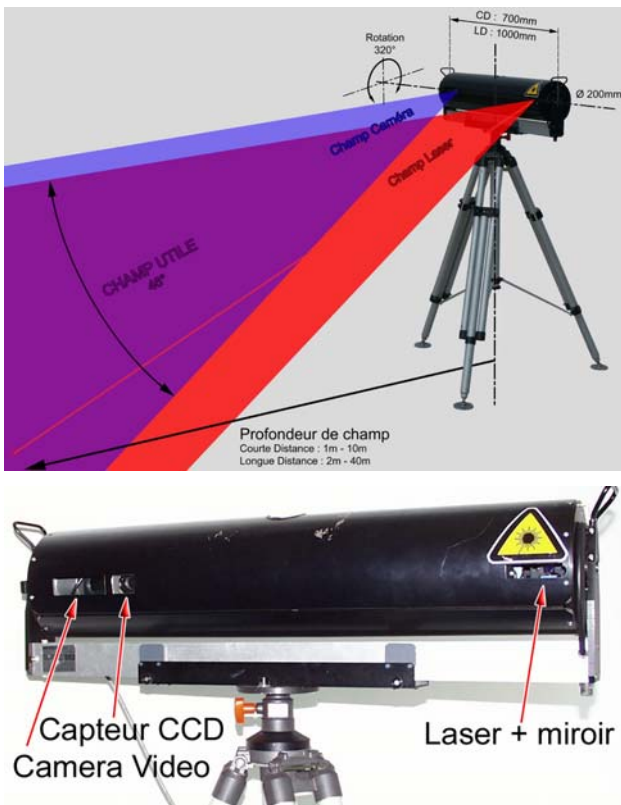


Figure 4 : le capteur « SOISIC » de MENSİ

Le scanner « Soisic » fonctionne sur le principe de l'acquisition par triangulation laser plane. Le scanner se compose d'un capteur (SOISIC), d'un logiciel de consolidation et de modélisation (3DIPSOS). Le capteur fait appel à un faisceau laser de faible puissance réfléchi par un miroir mobile. L'image du point émise par le scanner laser sur l'objet mesuré est relevée par une caméra CCD (coupled charged device) : des coordonnées X, Y et Z sont ainsi déterminées selon les règles de la trigonométrie. Le scanner est un appareil de mesure active, c'est-à-dire qu'il ne nécessite aucun éclairage extérieur et s'adapte automatiquement à la lumière rétro diffusée par l'objet mesuré. Une utilisation optimale de l'appareil suppose une lumière ambiante

relativement faible : les mesures effectuées en extérieur se font ainsi de préférence en faible intensité lumineuse, idéalement en ambiance nocturne [BOE99]. Piloté par un PC, le capteur permet la mesure des coordonnées 3D du spot sur une grande variété de surfaces, à raison d'environ 100 points/seconde (série S de MENSİ). Suivant le modèle du capteur, la profondeur de champ varie de 1 à 60 m environ, la précision de mesure est de 1mm à une distance de 5m. Le scanner est disponible en deux versions : Longue Distance, (portée de 5 à 40 mètres) et Courte Distance (portée de 0.8 à 15 mètres).

L'opérateur définit l'aire de captage et sélectionne la densité du balayage en fonction de l'échelle et de la nature de l'objet mesuré. Parallèlement à la mesure laser, une caméra vidéo enregistre des vues de la scène, qui pourront ensuite être plaquées sur le modèle 3D afin d'améliorer le réalisme. Les nuages de points mesurés en 3D sont stockés progressivement dans des fichiers, chaque « point de vue » sur un objet étant composé des sous-points de vue correspondant aux sphères-témoins et aux différents tirs réalisés sur cet objet. La position du scanner par rapport à l'objet, la précision de la saisie des points et la complémentarité des points de vue sont ainsi autant de facteurs qui concourent à une meilleure exploitation ultérieure du fichier de points obtenus. Les fichiers résultats sont ensuite transférés vers la station de travail où s'effectue le traitement des données.

3.2. Le traitement des données

Les techniques étudiées ont pour caractéristique commune une nette différenciation entre le temps du relevé et celui du traitement, si bien qu'il est tout à fait envisageable de confier les deux étapes à des équipes différentes. Cependant si les techniques d'acquisition de données présentaient un assujettissement commun aux lois de l'optique, la nature des données collectées impose des méthodologies de traitement différentes.

3.2.1 Photogrammétrie

L'équipe MAP-PAGE traite les données issues des relevés photogrammétriques. Pour ce faire elle dispose de trois modes de restitution : les restitutions stéréo analytique et numérique ainsi que la restitution multi-images numérique.

Le matériel de restitution stéréoscopique est constitué :

- d'une part d'une station de stéréorestitution analytique Zeiss Planicomp P33. La restitution se fait directement dans un logiciel de CAO : Microstation ;
- d'autre part de deux stations numériques : système Imagestation SSK de la Société Zeiss – Intergraph et système KLT-Atlas de la société KLT Associates.

La restitution multi-images numérique est réalisée à l'aide du système PhotoModeler de la société EOS system.

3.2.2. Lasergrammétrie : traitement des données

Les données, « nuages de points » :

Le nuage de points est l'ensemble tridimensionnel des points mesurés par le capteur sur la surface de l'objet relevé, chaque point étant référencé au minimum par ses coordonnées (x y z). Suite au relevé, chaque nuage de points va correspondre à une prise de vue et non à un découpage logique de l'objet. Une campagne de relevé complète fournit donc un grand volume de données, variable selon la densité des mesures et la nature de l'objet (jusqu'à 50 millions de points).

Consolidation

Le traitement des données s'effectue à l'aide du logiciel 3D Ipsos qui permet l'importation des fichiers « bruts » au format propriétaire Soisic. La première étape consiste à « consolider » les nuages de points, c'est-à-dire à faire en sorte que tous les sous points de vue s'insèrent dans un repère cartésien global. Des sphères-témoins placées judicieusement autour de l'objet scanné lors de la phase d'acquisition permettent une automatisation partielle de cette étape, ce qui permet un gain de temps intéressant. Ces sphères composent un repère pour chaque sous-point de vue. Un minimum de 3 sphères témoins communes à différents sous point de vue, permet une réorganisation globale des différents nuages de points. Après contrôle du recalage, les nuages de points peuvent être fusionnés en un seul grand ensemble.

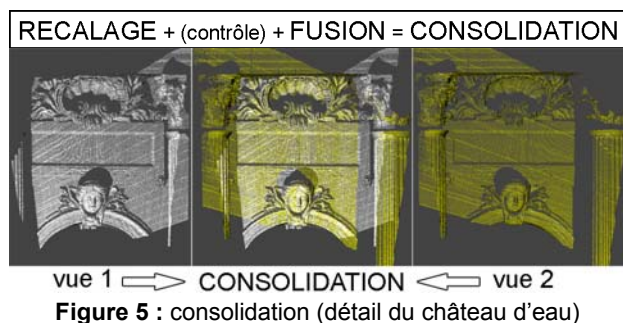


Figure 5 : consolidation (détail du château d'eau)

Segmentation :

La segmentation est l'opération qui permet de constituer des sous-ensembles logiques. Elle se réalise en isolant des ensembles de points correspondant à des parties de l'objet ou de l'environnement. La segmentation s'exécute manuellement : l'opérateur sélectionne sur son écran des zones de l'espace de visualisation, éventuellement en plusieurs étapes (première segmentation suivant un certain angle, puis segmentation plus fine depuis un autre point de vue, etc...). Les sous-ensembles résultants qui vont constituer des listes de points, sont classés dans un tableau hiérarchique structurant, déterminant les niveaux de l'arborescence de ces groupes de liste de points (GLP). Le nuage de points segmenté ne saurait être exploité en l'état, le volume inchangé des données limitant les manipulations. Cependant cette étape permet un export hiérarchisé de données référencé géométriquement. Par ailleurs la segmentation facilite l'éventuelle application d'un maillage sur des sous-ensembles de points plus homogènes en densité.

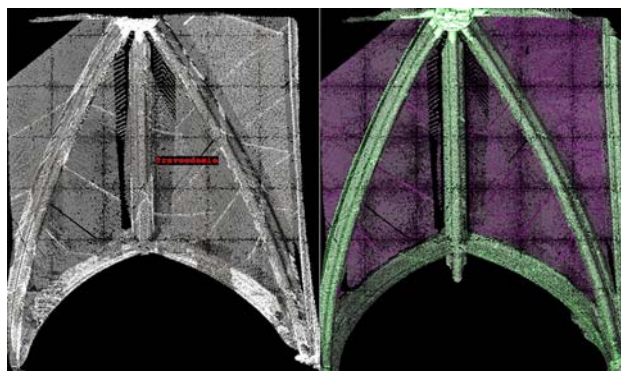


Figure 6 : segmentation (salle capitulaire, Figeac)

4. La constitution de modèles

4.1. Notion de modèle

Les développements scientifiques sont à l'origine de l'évolution constante des techniques d'acquisition et de modélisation, en particulier dans le cadre que nous abordons ici. Mais la notion de modèle ainsi que les processus de modélisation corollaires conservent toutes leurs caractéristiques originelles. Quelques définitions ci dessous rappellent et précisent cette notion :

1° « Ce qui sert ou doit servir d'objet d'imitation pour faire ou reproduire quelque chose [...] Objet de même forme qu'un objet plus grand mais exécuté en réduction. Voir maquette. Modèle de navire, d'un édifice, Modèle réduit: Modèle réduit au 1/100^e » [ROB88]

2-« Le modèle est d'abord la « maquette », l'objet réduit et manipulable qui produit en lui sous une forme simplifiée, « miniaturisée », les proportions d'un objet de grandes dimensions, qu'il s'agisse d'une architecture ou d'un dispositif mécanique. L'objet réduit peut être soumis à des mesures, des calculs, des tests physiques qui ne sont pas appliqués commodément à la chose produite. [...] La notion de modèle est associée à une idée de simplification systématique ». [UNI95]

Le modèle reprend des propriétés et caractéristiques de l'objet original selon sa destination. Si l'on se tient aux domaines de l'architecture et de l'archéologie, il se définit généralement comme une représentation d'un objet en volume à une échelle définie. La représentation architecturale doit donc être adaptée à un objectif qui détermine le choix de la méthode, des procédures et des outils à utiliser.

4.1.1 La modélisation architecturale

L'architecture par essence nécessite un grand nombre de modèles. Si le développement des techniques de saisie et l'informatique facilitent la construction de modèles 3D fidèles à l'existant, la production d'un modèle géométrique reste soumise à une succession d'étapes interdépendantes conditionnées par la nature de l'existant et le type de représentation à atteindre : l'acquisition des données (le relevé), leur traitement et enfin la modélisation (la construction du modèle).

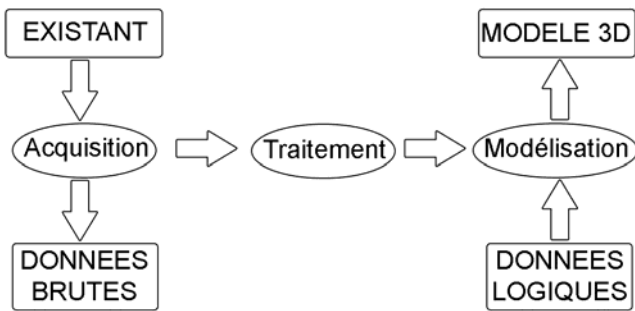


Figure 7 : méthodologie générale de construction d'un modèle 3D (d'après [BEG03]).

Si la méthodologie constitue une constante, sa formalisation varie. En effet on distingue 3 types de modèles : la reconstitution, le modèle « tel que construit » et le modèle « tel que saisi ».

- Le modèle 3D restitution:

En archéologie, le modèle 3D est souvent utilisé pour la représentation des reconstitutions de vestiges en états fragmentaires, on parle alors de modèle 3D restitution. Dans ce cas un modèle élaboré à partir des relevés seuls peut s'avérer insuffisant, c'est pourquoi les mesures sont complétées par l'expertise de spécialistes du domaine (archéologues, architectes, etc...). Ils valident toutes les hypothèses émises lors de la modélisation pour aboutir à la complétude du modèle : une reconstitution.

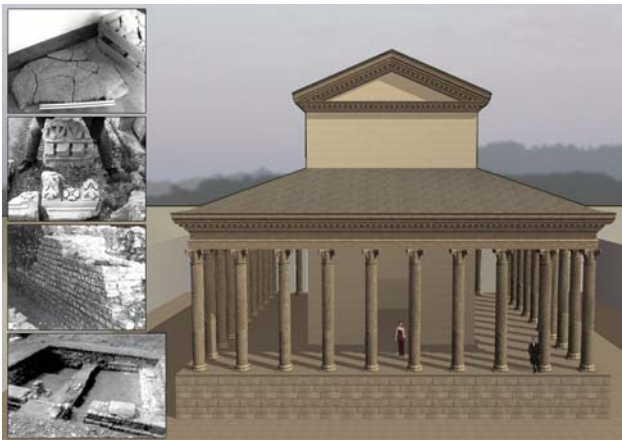


Figure 8 : exemple de restitution archéologique – le temple de Nasium (MAP-CRAI 2003).

- Le modèle 3D « tel que saisi »:

Il représente la construction d'un objet tel qu'il existe. Les informations nécessaires à sa construction sont uniquement issues du relevé de l'objet lui-même. C'est la modélisation la plus fidèle à l'objet mesuré, dont la pertinence relève uniquement de la qualité des mesures et du processus d'élaboration du modèle.

- Le modèle 3D « tel que construit »:

A la différence de la reconstitution, il se réalise sur la base des mesures effectuées sur l'objet sans aucune extrapolation. Par exemple en archéologie, le modèle est utilisé pour masquer, l'effet de l'érosion de la pierre et les défauts mineurs dus au temps. Il s'agit là de retrouver

l'état originel de l'élément relevé. Utilisé dans un cadre industriel, ce type de modélisation permet également le redéploiement d'installations (revamping) en reconstituant l'état réel du bâtiment. La modélisation construite sur la base des mesures jugées nécessaires représente un état géométriquement idéal.

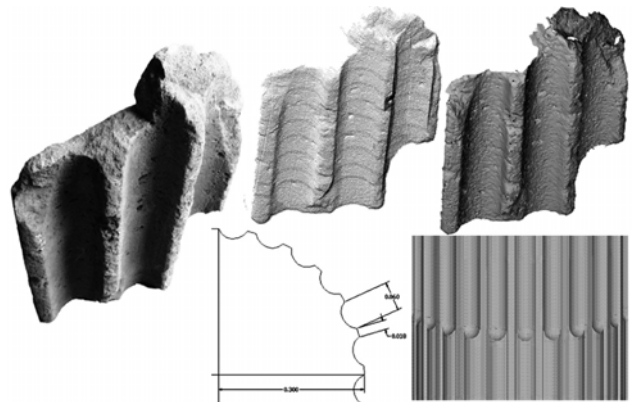


Figure 9 : photographie et modèles - nuage de points et maillage, modèle CAO, image de synthèse.

4.1.2. La modélisation informatique

Durant les dernières décennies, les outils d'acquisition, tout d'abord, ont bénéficié des progrès de l'électronique et de l'informatique. Puis la disponibilité de périphériques graphiques plus performants a mis à disposition des utilisateurs les outils de représentation nécessaires à la conception et à la fabrication assistés par ordinateur.

Les logiciels de modélisation ont ainsi suivi une évolution qui à l'origine correspond à une représentation très « mathématique » de la réalité pour arriver à la synthèse d'image photoréaliste. La géométrie initiale des modélisations sous forme de segments 3D, dites « fil de fer », a rapidement évolué vers des modèles surfaciques, puis volumiques. La modélisation volumique permet une description géométrique et topologique d'objets solides. Pour ce faire les modélisateurs utilisent divers schémas de représentation des solides : instanciation de primitives paramétrables, arbre de construction CSG, représentation par frontière (B-Rep), énumération spatiale, construction par déformation. Les modélisateurs volumiques utilisés actuellement combinent souvent plusieurs de ces techniques de modélisation, on parle de modélisation « hybride ».

Ces généralités liées à la notion de modèle conduisent à souligner l'importance de la téléologie lors de la démarche de modélisation : la finalité, c'est-à-dire le type de représentation envisagé en fonction des données disponibles, suppose une succession d'étapes qu'il convient de faciliter. En effet les outils de manipulation déjà disponibles se révèlent souvent insuffisants devant la spécificité des modèles architecturaux et l'étude des processus de modélisation doit permettre leur développement ou leur optimisation.

Différentes perspectives de développement ont déjà été envisagées dans un cadre archéologique et architectural,

notamment le projet PAROS du GAMSAU qui propose une approche orientée objet de la modélisation et donc le développement d'entités architecturales élémentaires paramétrables. Rafik Brakchi a employé cette méthode pour la modélisation d'un chapiteau corinthien [BRA97]. En se basant sur les traités d'architecture, le GAMSAU développe une bibliothèque d'objets paramétrables pour faciliter la modélisation architecturale. Dans cette démarche, un ensemble de courbes 3D constitue un vocabulaire organisé selon une grammaire qui correspond à des contraintes [DEK03]. A l'école d'architecture de Montréal, Hassoun Karam a développé une application en SGDLsoft afin de modéliser une colonne papyriforme égyptienne. Cette proposition se fonde également sur une connaissance approfondie des règles géométriques de conception de cet élément architectural. [HAS99]. Ces exemples sont révélateurs de l'intérêt porté au développement d'outils spécifiques d'aide à la modélisation architecturale.

Nous allons maintenant aborder l'aspect expérimental de la modélisation, en établissant un parallèle entre les différentes techniques de modélisation de données issues de relevés photogrammétriques et de relevés au scanner laser 3D.

4.2. La restitution : modélisation à partir de données photogrammétriques

4.2.1. Précisions

Contrairement aux données issues des mesures effectuées au scanner laser, les données produites par la photogrammétrie contiennent intrinsèquement le modèle de l'objet mesuré : l'opérateur sélectionne les données qu'il estime pertinentes. Le terme de restitution est donc plus adapté à cette opération que le terme modélisation. Cette méthode permet d'enrichir le modèle progressivement en fonction des buts à atteindre.

Les systèmes employés au MAP-PAGE fournissent des données de natures différentes, ainsi les types de représentation varient en fonction des différents systèmes : Planicomp produit des vecteurs, KLT et PhotoModeler des vecteurs, des surfaces et des modèles texturés.

4.2.2 Réalisations

Les projets de photogrammétrie architecturale réalisés par le MAP-PAGE mettent en œuvre les techniques de stéréorestitution et de redressement d'images [Gru00] :

- Château du Lichtenberg (Parc naturel des Vosges du Nord), relevé d'une partie du Château en vue de la restauration : le relevé avait pour mission primordiale la constitution d'archives, le constat des irrégularités, des dysfonctionnements de la structure et des aberrations d'appareils, qui illustrent les campagnes de constructions.

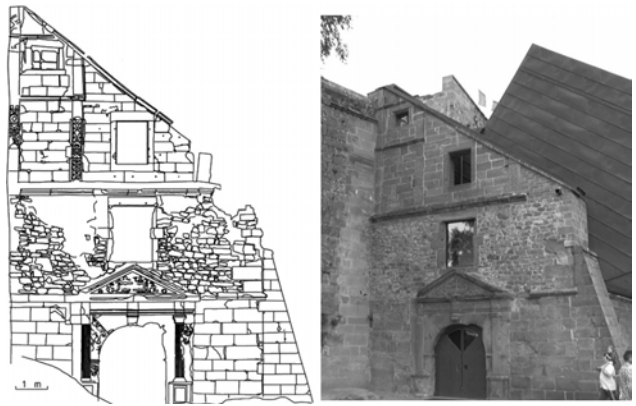


Figure 10 : Château du Lichtenberg : relevé photogrammétrique de 1992 et restauration en 1998 et (stéréorestitution de S. GUILLEMIN).

- Centre de Strasbourg, un immeuble de la rue de la Haute Montée : le relevé architectural était destiné dans ce cas à l'analyse architecturale dans le cadre des opérations de conservation et de restauration.

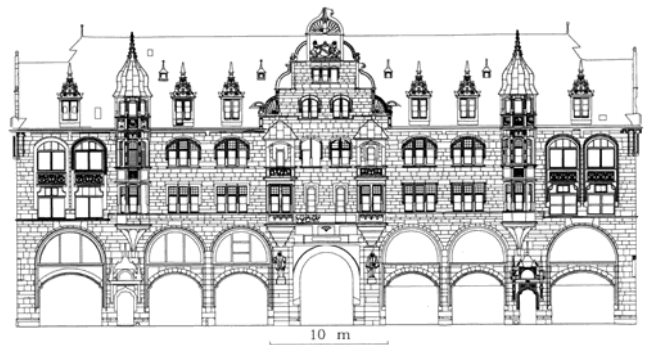


Figure 11 : élévation d'un immeuble de la rue de la haute montée (avec la participation de M. Leleu, architecte)

- Développement d'une méthode de contrôle géométrique des oeuvres d'art susceptibles de subir des déformations liées aux conditions de conservation : l'objet étudié était le retable fermé d'Issenheim et l'objectif était d'évaluer sur une période de 6 mois (correspondant à des conditions de température et d'humidité variables) les déformations du retable. Il s'agissait de mettre en évidence des déformations par des procédés spécifiques, sans toucher l'objet.

- Plusieurs projets dans le centre historique du Caire dont le relevé de l'aqueduc El Ghuri
- Relevé de la Medersa Bouianiya dans la Médina de Fès (Maroc).

4.3. Modélisation à partir de nuages de points

La modélisation à partir de nuages de points correspond bien évidemment au traitement des données fournies par le scanner laser 3D. Nous l'avons vu précédemment (3.2.2.) les différentes prises de vue sont consolidées dans un même référentiel géométrique avant de segmenter le nuage de point obtenu pour faciliter son traitement.

4.3.1 Maillage

Les logiciels de manipulation de « nuages de points » comportent généralement un outil de maillage (ou polygonisation). Des algorithmes construisent des facettes entre les différents points du nuage par triangulation et par des calculs d'approximation des moindres carrés. Les artefacts indésirables liés au relevé ou les trous éventuels dans le maillage sont généralement traités à cette occasion, le nuage de points est ainsi « recouvert d'une peau ». L'optimisation des maillages a connu un développement récent important, car sa nature hautement automatisable repose sur l'optimisation d'algorithmes de traitement. S'il ne s'agit pas de l'approche la plus pertinente pour la constitution de modèles « architecturaux », cette méthode permet de reconnaître des nuages de points d'objets de types complexes (statuaires, détails architecturaux, etc.) et de produire des fichiers destinés à la stéréolithographie (fichiers STL). Par ailleurs l'optimisation de ces maillages permet de diminuer considérablement le volume des données avec une perte d'information éventuelle. Cette méthode de modélisation est adaptée à la création de modèles « Tels que Saisis ».

4.3.2. Modélisation géométrique

La modélisation géométrique utilise les nuages de points comme support de mesure pour la réalisation de modèles Tels que Construits. La modélisation géométrique se fait selon différentes méthodes, souvent complémentaires :

- la modélisation par le biais de primitives géométriques, est basée sur le travail de l'opérateur et une série de primitives géométriques (point, segment, courbe, boîte, cylindre, etc.). C'est le principe retenu par le logiciel 3D Ipsos de Mensi. Cependant dans le cadre de la modélisation architecturale, la méthode s'avère extrêmement longue suivant la complexité géométrique nature de l'objet modélisé.
- la modélisation par reconnaissance automatique et reconstitution, basée sur des outils de géométrie différentielle qui permet la segmentation automatique de nuage de points [GOU99]. Cette méthode est principalement utilisée pour la reconnaissance de cylindres et de leurs dérivés (tuyauterie, pipeline), elle se montre tout a fait adaptée à une utilisation dans l'ingénierie inverse. Quoique rapide du fait de son automatisation, la méthode est inadaptée aux objets architecturaux en général.
- la modélisation à partir de bibliothèques « métiers » paramétriques, également utilisée sous 3D Ipsos, cette logique de développement peut se révéler intéressante, cependant les bibliothèques existantes ne possèdent pas les primitives ou les objets architecturaux nécessaires à la modélisation de l'architecture classique du château d'eau.

Il ressort de cette présentation d'outils de modélisation la nécessité d'un développement d'outils plus spécifiques à l'objet que nous envisageons de modéliser.

4.3.3. Des réalisations et leurs problématiques spécifiques

Au laboratoire du MAP-CRAI, l'utilisation du scanner laser au cours de différents relevés a permis la création de modèles 3D pour la synthèse d'image, la simulation d'illumination, l'archivage numérique de données et l'investigation archéologique :

- Lors de la reconstitution du site de Marmaria à Delphes, plusieurs objectifs étaient poursuivis : tests d'hypothèses de restitution archéologique (morphologie de toitures, ouverture des portes), anastylose virtuelle de certains blocs et statues d'acrotère. [LAR92].
- Le scanner du Pont Marie à Paris a servi de base à la modélisation tridimensionnelle en l'absence de plan et de support d'une simulation d'illumination.
- Le captage réalisé sur le Pont Neuf et le square du Vert Galant a également permis la représentation d'un projet d'illumination incluant la statuaire et la végétation du square.
- La reconstruction du Capitole de Dougga (Tunisie) a donné lieu à la mise en place d'une méthode d'intégration des connaissances dans la chaîne relevé / modélisation / représentation de l'édifice s'appuyant sur les techniques de photo modélisation. [KHA00].
- A la Cathédrale Notre Dame de Strasbourg, différents relevés de la statuaire et d'éléments architectoniques complexes ont permis de compléter l'informatisation de la chaîne de restauration au sein de l'atelier en charge de la maintenance de cet édifice.

5. Relevé et modélisation du château d'eau du Peyrou

Les résultats obtenus avec l'ensemble des techniques mises en œuvre sont présentés ici afin de pouvoir identifier leurs spécificités.

5.1 Photogrammétrie

Un constat s'impose d'emblée : le volume de données numériques produit s'est révélé très important. Le recours à la technique de relevé multi-images encourage la prise d'un grand nombre de clichés. Par ailleurs la multiplication des prises de vues, parfois redondantes, réduit la préparation du relevé autrefois nécessaire, pour la remplacer par une sélection a posteriori des images. La qualité des clichés peut être évaluée sur écran in situ.

5.1.1. Stéréoscopie

Lors des prises de vue du château d'eau, quelques difficultés sont apparues lors de l'utilisation des appareils. Les dimensions de l'édifice imposaient un recul important afin de pouvoir saisir chaque face dans sa totalité.

Les systèmes stéréoscopiques produisent tous les deux des informations tridimensionnelles. Cependant le faible angle existant entre les axes de prise de vue, nécessaire à la vision en relief, pénalise la précision des mesures de profondeur. La figure suivante montre un exemple de stéréorestitution. La superposition des résultats obtenus

avec la filière numérique (KLT) et de ceux obtenus avec la filière argentique (Planicomp P33) permet de constater que le niveau de détail relevé est sensiblement identique. Les opérations de saisie furent plus aisées sur le Planicomp, en raison d'une part de la plus grande expérience de restitution de l'opérateur sur ce type d'appareil, ce qui souligne l'importance de la pratique en restitution stéréoscopique et d'autre des limites imposées par la résolution de la chambre D507. La difficulté provient aussi de la complexité de la scène restituée : les chapiteaux de colonne à feuilles d'acanthes ainsi que les décors sculptés sont par essence des objets extrêmement délicats à restituer.



Figure 12 : modèle obtenu par restitution stéréoscopique (vue 3D et élévation)

5.1.2. Multi-images

Le relevé multi-images est certainement le plus aisé et le moins contraignant de l'ensemble des techniques expérimentées lors de cette campagne. Le château d'eau ne présente quasiment aucun masque et se retrouve isolé au milieu d'un espace ouvert. Le matériel utilisé pour le relevé, qu'il s'agisse d'une chambre professionnelle ou d'un appareil grand public, conserve une grande facilité de manipulation. Toutes ces raisons expliquent la grande quantité d'images collectées, qui constitue un fond d'information brut en soi.

Une fois orientées dans PhotoModeler, ces images permettent la production de différents modèles : filaires, surfaciques. La production de photomodèles a été retenue en raison de la vocation initiale des relevés et de la spécificité (textures) de ce type de modèle, afin d'en évaluer l'apport. Les restitutions envisagées dans un premier temps concernent des détails de l'édifice. Une restitution de la corniche du chapiteau, élément géométriquement régulier, est ainsi proposée :

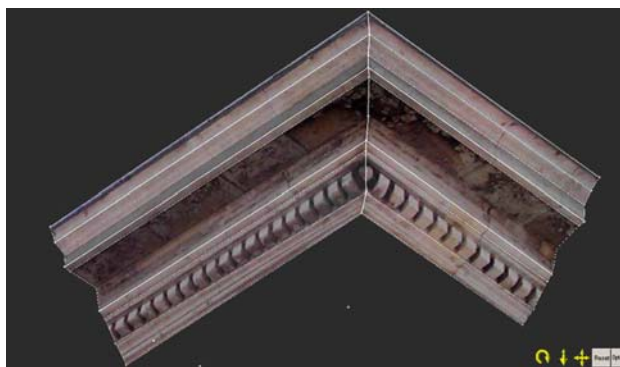


Figure 13 : photomodèle de la corniche (PhotoModeler 5 Pro)

La restitution de ce détail architectural présente les caractéristiques voulues pour la création d'un modèle destiné à la visualisation

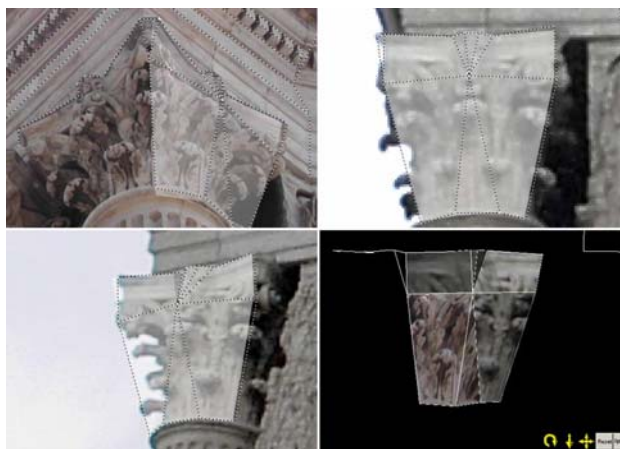


Figure 14 : photomodèle d'un chapiteau corinthien (PhotoModeler 5 Pro)

La figure 14 est révélatrice des limites du photomodèle pour la restitution des détails irréguliers. D'une manière générale, la stéréo restitution paraît plus adaptée à l'élaboration de projections planes tandis que le relevé multi-images convient à la production de modèles 3D.

5.2. Lasergrammétrie

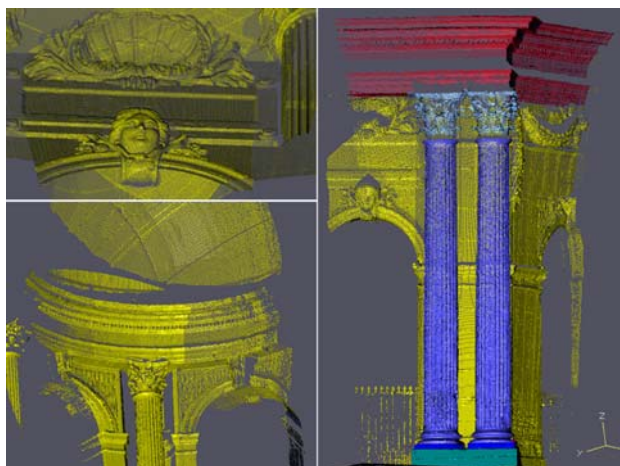


Figure 15 : nuages de points issus du relevé laser.

Le relevé par lasergrammétrie du château d'eau du Peyrou s'est déroulé en plusieurs phases, étalées sur quatre jours. L'essentiel des relevés s'est concentré sur

l'extérieur, l'intérieur du bâtiment ainsi qu'un détail ornemental ont également été scannés. La quantité des points relevés approche les 2 millions. Ces travaux se sont déroulés la nuit car une tentative de relevé diurne de l'intérieur du bâtiment n'a pas donné de résultats satisfaisants. La luminosité diurne importante durant cette période de l'année (mois de juin) en est sans doute la cause. Le relevé réalisé s'est concentré sur une partie du bâtiment (environ 1/6ème) car sa forme hexagonale présente des symétries qui permettront de le recomposer dans son intégralité.

Le parti de réaliser un modèle géométrique à partir de ces mesures a été retenu en raison de la morphologie de l'édifice (symétries, présence d'éléments architecturaux répétitifs) mais également de l'intérêt expérimental de la démarche.

5.3 Proposition d'outils d'aide à la modélisation

Le château d'eau du Peyrou présente toutes les caractéristiques morphologiques d'une architecture classique. Celle-ci est régie par des règles d'harmonie et de convenance qui ont été décrites par différents traités d'architecture (Palladio, Scamozzi, Vignole). Au laboratoire du MAP-CRAI, Reda Begriche a développé différents outils géométriques fondés sur la connaissance des spécificités de cette architecture. Basée sur une vue synthétique de ces traités de composition architectonique de la période classique, sa proposition se concrétise sous la forme d'outils visant à optimiser la production de modèle 3D à partir de nuages de points. La modélisation de l'entablement du château d'eau du Peyrou constitue un support à l'expérimentation de ces outils.

5.3.1. Étude exploratoire d'un entablement classique

Les ordres architectoniques qui régissent l'architecture classique se distinguent en 5 catégories principales : l'ordre dorique, l'ordre ionique, l'ordre corinthien, l'ordre toscan et l'ordre composite. Ce dernier développé initialement par les romains, à partir des ordres précédents, a été diffusé très largement ; c'est pourquoi cette étude s'y consacre plus particulièrement. Par ailleurs sa nature intrinsèque permet d'émettre l'hypothèse d'une extrapolation de la méthode de modélisation à l'ensemble des ordres.

Nous nous intéressons plus spécifiquement à l'entablement. Posé sur les chapiteaux des colonnes, il se compose de l'architrave, la frise et la corniche. Une étude comparative des traités ainsi que la décomposition de l'entablement composite permettent d'aboutir à ce que l'on peut considérer comme une primitive architectonique élémentaire : la moulure. L'exemple de la corniche permet d'appréhender la logique de décomposition qui y conduit :

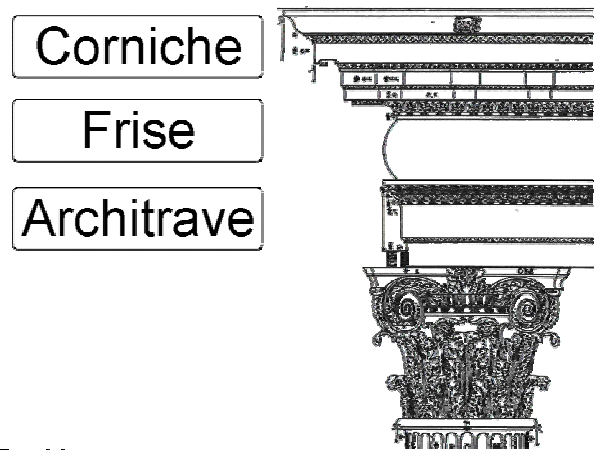


Figure 16 : l'entablement selon Palladio, décomposition [PAL80].

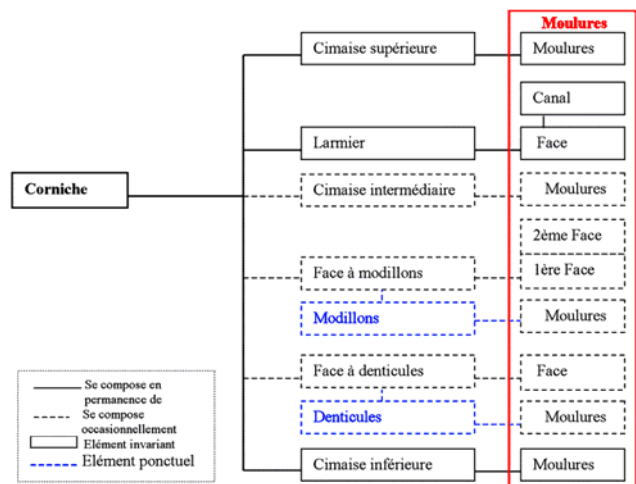


Figure 17 : schéma de décomposition d'une corniche (d'après [BEG03]).

Un travail d'analyse systématique de chaque variante de moulure et des règles de composition les liant entre elles permet ensuite de disposer d'une classification élémentaire des moulures suivant leurs caractéristiques géométriques.

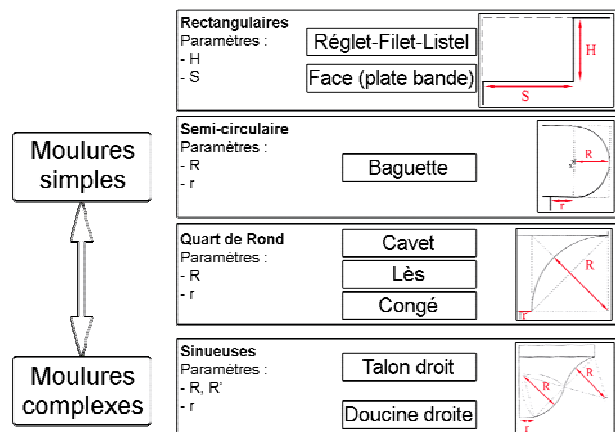


Figure 18 : classification des moulures selon leurs caractéristiques géométriques (d'après [BEG03]).

5.3.2 Formalisation d'un outil d'aide à la modélisation

Les éléments théoriques présentés précédemment et leur synthèse permettent la définition d'outils d'aide à la

modélisation. Le principe général de ces outils s'intègre dans le schéma de fonctionnement suivant :

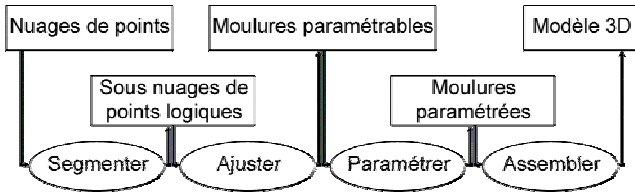


Figure 19 : principe général de construction du modèle 3D à partir des nuages de points (d'après [BEG03]).

La modélisation de l'entablement complet selon ce schéma combine un corps à profil constant et des éléments ponctuels. Le corps à profil constant est réalisé par la translation linéaire d'une combinaison de moulures, en d'autres termes une extrusion. Les éléments ponctuels (denticules, modillons) sont générés selon le même principe puis reproduits en réseau le cas échéant.

Les moulures paramétrables, sur lesquelles repose le processus de modélisation, ont été définies sous forme d'algorithmes dans un modèleur (langage LISP sous Autocad d'Autodesk). Ces moulures permettent une « modélisation guidée » : les points d'ancrage essentiels à la genèse de leur géométrie sont ajustés sur le nuage de points. Le profil du nuage de points support est extrait du modèle consolidé dans le logiciel de traitement de nuage de points.

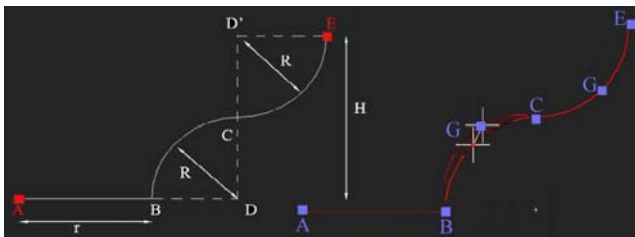


Figure 20 : ancrage et ajustement

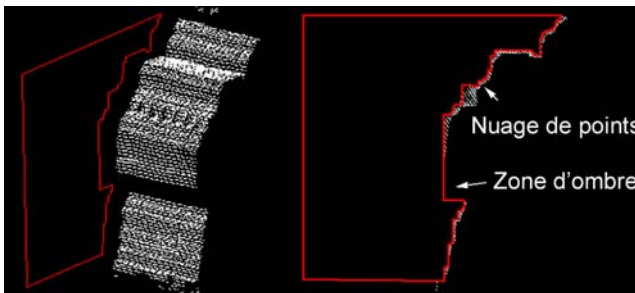


Figure 21 : profil modélisé à partir du nuage de points

5.3.3. Résultats expérimentaux

Appliqués aux mesures effectuées sur le château du Peyrou, les outils développés ont ainsi pu faciliter la modélisation de certains éléments architecturaux. La corniche a été modélisée malgré les « zones d'ombre » du relevé liées à la position élevée. Il convient de noter que dans ce cas très particulier des photographies prises durant les mesures ont permis de s'assurer de la validité de certaines hypothèses de reconstruction.



Figure 22 : rendu du modèle 3D de la corniche et photographie

Les modèles 3D obtenus par l'association des outils développés aux relevés par lasergrammétrie se révèlent tout à fait satisfaisants en termes de précision. Une extension de la méthode aux autres éléments est en cours afin d'obtenir une modélisation complète de l'ouvrage, elle ne concerne que les parties dont les caractéristiques morphologiques permettent une description géométrique. Les éléments de décors tels que les sculptures ou les feuilles d'acanthes du chapiteau, par exemple, en sont exclus : le maillage par triangulation automatique peut donner des résultats satisfaisants de façon plus rapide.

6. CONCLUSION

La confrontation de différentes pratiques de relevé nous a permis de bien évaluer leurs caractéristiques respectives. Si les techniques d'acquisition présentent chacune des spécificités, il est intéressant de constater que les modélisations butent toutes sur un degré de complexité géométrique (décors sculptés, chapiteaux). Deux solutions co-existent en fonction du modèle retenu : le photomodèle qui pour une précision moindre offre grâce aux textures des informations chromatiques supplémentaires associées à une facilité de manipulation ou le nuage de points maillé, dont la précision de mesure accroît proportionnellement le poids du fichier. Il ressort également de ce travail une différence entre les modèles obtenus par la photogrammétrie et ceux obtenus à partir de nuages de points : c'est l'expertise et la technicité de l'opérateur qui contribue à l'obtention d'un modèle de qualité en photogrammétrie tandis que la modélisation architecturale à partir de nuage de points fait apparaître l'importance de la culture architecturale dans l'élaboration de modèles géométriques pertinents. L'étude présentée pourra être complétée par le traitement automatique par corrélation des images numériques en vue de l'obtention d'un nuage de points comparable à celui issu du relevé laser.

Un intérêt majeur de ce travail se retrouve dans la dimension heuristique de la constitution des modèles 3D. En effet cette étape a été l'occasion de cerner toutes les questions pratiques et théoriques soulevées lors de l'élaboration de modèles.

Les perspectives ouvertes lors de la campagne de relevé du château du Peyrou sont multiples : intégration des modélisations dans un modèle du site global, expérimentation sur l'élaboration de modèles hybrides mais également développement d'outils de modélisation supplémentaires.

7. REFERENCES

[AUB92] SAINT AUBIN (Jean-Paul), 1992, - le relevé et la représentation de l'architecture. - Edition de l'inventaire, Paris.

[BEG03], BEGRICHE (Reda), 2003, - « PROFIL – du nuage de points au modèle 3D », – Mémoire de DEA, MAP-CRAI, Nancy

[BOE99] BOEHLER W. et al., 1999, - « The potential of non-contact close range laser scanners for cultural heritage recording », - Actes du XVIII Symposium International CIPA, Postdam, Allemagne.

[BRA97] BRAKCHI (Rafik), 1997, - « Contribution au projet PAROS: Représentation et modélisation du chapiteau corinthien », - Mémoire de DEA : GAMSAU, Marseille

[BUR03], BUR (Didier) et al., 2003, - « Laser scanning as a tool for archeological reconstitution : a gallo-roman temple in Naix-aux-Forges, France », - Actes du XIX Symposium International CIPA, Antalya, Turquie, pp.125-130.

[DEK03], DEKEYSER (François) et al., 2003, - « Relevé du patrimoine architectural par relevé laser, vision par ordinateur et exploitation des règles architecturales », - Acte du colloque Maquette Virtuelle et Patrimoine, Cluny.

[GOU99] GOULETTE (François), 1999, - « Modélisation 3D automatique, outils de géométrie différentielle ». – Les Presses de l'Ecole des Mines, Paris

[GRU00] GRUSSENMEYER (Pierre), GUILLEMIN (Samuel), 2000, - « Patrimoine et photogrammétrie architecturale, 1992-1999 : 8 ans de projets à l'ENSAIS ». Revue d'information des anciens élèves de l'ENSAIS, Arts et Industries n°248, pp. 19-26. ISSN 0004-3982, janvier 2000.

[HAS99] HASSOUN (Karam), 1999 - « La représentation de la colonne égyptienne papyriforme ». Mémoire à Ecole d'architecture de Montréal. Canada.

[KHA00] Moustapha et al., 2000, - « Le projet Dougga – Relevé d'architecture et modèles numériques », - Activités de recherche UMR 694 MAP.

[LAR92] LAROCHE (Didier), 1992, - « La Tholos de Delphes : forme et destination », - Actes du Colloque Perdrizet, Strasbourg, p. 207-223.

[PAL80], PALLADIO (Andréa), 1980 (réédition) - « Les quatre livres de l'architecture », - Editions Arthaud, Paris.

[ROB88] Le petit Robert, 1988, - Dictionnaire de la langue française, dictionnaires le robert, Paris p.1211.

[UNI95] Encyclopédia Universalis, 1995, - :corpus 15.- Paris : Edition Messiaen - Matalité ,p530.

SITES INTERNET :

MAP-CRAI : www.crai.archi.fr

MAP-PAGE : <http://photogeo.insa-strasbourg.fr/>

UMR 694 MAP : <http://www.map.archi.fr/>

REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à remercier Franck Perdrizet, le service d'information géographique de la ville de Montpellier, ainsi que Samuel Guillemin pour son travail de restitution.